環境施策が都市交通システムのエネルギー効率性に与える影響の分析

ーDEA(データ包絡分析)とMalmquist 指数によるアプローチー

世界各国で地球温暖化等の環境問題への対応の必要性が高まっている社会的背景のもと,各都市の運輸エネルギー消費構造の多様性を考慮した上で,実現可能な運輸エネルギー消費削減目標量を設定することは,環境的に持続可能な交通(EST)の実現において不可欠なプロセスである。本論文では,既存の環境効率性評価モデル(EE model)を活用することで,世界各都市の交通システムのエネルギー効率性を算出し,各都市の都市交通形態に適合した運輸エネルギー消費量の目標値を設定する。更に,DEA(データ包絡分析)及びMalmquist 指数を用いることで,エネルギー効率性の観点から各都市において環境負荷抑制を推進する上で効果的な環境施策のシナリオ設定方法の提案及びエネルギー効率性に与える影響の分析を行う。

|キーワード|| エネルギー効率性, データ包絡分析法, Malmquist 指数, 運輸エネルギー, 環境施策

吉野大介

YOSHINO, Daisuke

修(工) 復建調査設計(株)地域経済戦略チーム副主任研究員

藤原章正

FUJIWARA, Akimasa

工博 広島大学大学院国際協力研究科教授

1 研究の背景と目的

1.1 都市・交通部門における環境施策

交通機関と交通ネットワークの発達は、人々の移動利便性の向上や物流・人流の円滑化をもたらし、世界各国の経済成長に大きく寄与してきた。しかし、同時に温室効果ガスの排出や運輸エネルギー消費量の増大など、地球環境に対して負の影響を及ぼしてきたことも否定できない事実である。

各国の京都議定書目標達成計画で共通する視点として 取り上げられているように,エネルギー起源の地球温暖化 ガス削減施策として運輸部門における対応が不可欠であ ることは言うまでもなく,近年,環境的に持続可能な交通 (EST)の必要性が高まっている。EST普及推進を具体化 させるためには、その前段階として、各都市の実情を踏ま えた定量的な目標設定が重要になる.しかし、EST施策 を講じる際に、現在実現されている円滑なモビリティ水準 を大幅に犠牲にすることは、人々のクオリティ・オブ・ライフ の低下につながる可能性がある.また,交通容量が不足 する途上国都市においては、新規交通インフラ整備が今 後も必要であることが多く、環境負荷を考慮しつつ、モビ リティを高める必要性が高い. そのため、都市交通に関連 する施策立案にあたり、今後は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を両立する解の探索が 重要な視点となろう. しかしながら, 利便性の維持向上と 環境負荷削減はトレード・オフの関係にあり,両者の最適 解の探索は容易ではない.

1.2 効率性による環境負荷削減目標の設定

持続可能な開発のための世界経済人会議(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Eco-efficiency(環境経済効率性)」の概念は、先に述べたモビリティの維持・向上と環境負荷低減のジレンマを解消し、各都市の都市交通形態に適合した、実現性の高い達成目標を設定する上で有効であると考えられる。Yoshino et al. [2010]2)は、このEco-efficiencyの概念を都市・交通部門に適用し、交通に起因する価値(例えば、利便性向上)と交通に起因する環境負荷(例えば、運輸エネルギー消費)を同時に考慮した環境効率性指標(Environmental efficiency index)による運輸エネルギー消費削減目標の設定手法を提案し、両者の最適解の探索手法を提案した。

1.3 研究の目的

本論文では、まずYoshino et al. [2010] ²⁾が環境効率性指標を算出するために開発したEE model (Environmental efficiency model)を用い、世界各都市の運輸エネルギー消費目標量を算出する。分析には、途上国と先進国を含む世界46都市データを使用する。世界46都市データは国際公共交通連合(UITP)がKenworthy、Laube両博士の協力のもとで収集されたものであり、両博士の著書「An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities 1960-1990] ³⁾に掲載されている。当データは都市・交通に関連する様々な指標が4時点(1960、1970、1980、1990)にわたって取りまとめられているが、本論文内では、

このうち、1990年のデータを用いた分析結果について記載している。

次に、EE modelによって得られた結果をもとに、モーダルシフトやエネルギー原単位の改善、都市間エネルギー消費権取引といった都市・交通部門における環境施策が各都市のエネルギー効率性に対して及ぼす影響を、DEA(データ包絡分析)及びMalmquist指数を用いて計測し、各都市において環境負荷抑制を推進する上で効果的な環境施策のありかたを探るための方法論を提案する。

2---環境効率性算出に関する既往研究

Frank et al. [2002] 4) の指摘のように,交通機関からの環境負荷排出は各交通機関の車両特性のみならず,当該地区の土地利用パターンや,個人の旅行行動特性等の様々な外的要因から影響を受けている. 従って,交通システムの環境負荷排出構造を評価する際には,環境負荷の排出量の絶対数のみではなく,環境負荷に影響を及ばしている要因も評価の対象に含める必要がある.

このような学術的背景を受け、近年、Eco-efficiency指標の運輸部門への適用が進んでいる。これはEco-efficiencyの「環境パフォーマンス/財務パフォーマンス」という算出構造を応用し、各都市の都市交通システムの輸送能力と輸送に伴う環境負荷量の比によって運輸部門の環境構造を評価するアプローチである。例えば、Senbil et al. [2005] を Feng et al. [2007] は、上記の指標を環境効率性(Environmental efficiency)として定義し、SFA(確率的フロンティア分析)によって算出される効率性スコアをもとに、各都市の交通システムの環境評価を行っている。また、McMullen and Noh[2006] は、DEAによる距離関数アプローチを用いて、交通機関別に旅客数や走行マイルといったサービスレベルを向上させつつ環境負荷を削減するための目標設定を行っている。

実務レベルにおいても、都市・交通部門への環境効率性概念の浸透は進んでおり、例えば国土交通省の交通調査統計課分析室は、平成19年2月20日、日本国内の運輸部門から排出されるCO2の環境効率改善指標の試算結果を公表した8)。この試算は、温暖化対策の推進にあたっては、環境と経済の両立を可能にするために、経済が成長しても環境負荷増大につながらないようにする必要があるという問題意識から行われたものであり、国土交通省が公表している輸送活動の活発さを示す輸送指数と、国内輸送に従事する輸送機関が排出したCO2量を、基準年度を100とした指数で表示した排出指数の比率によって環境効率改善指標を試算している。

しかし,これらの先行事例における環境効率性評価手

法に関しては、都市毎に異なる環境負荷排出構造の表現が十分に考慮されておらず、また、結果をもとに政策分析に踏み込んでいる例も見当たらない。その点に関して、Yoshino et al. [2010] 2) は、DEAコスト効率モデルをベースモデルとしたEE modelを開発することで解決を図った。本論文はこのEE modelの特性を活かした分析であり、当モデルの理解が不可欠であるため、基本概念と定式化の概要について、以下再掲する。

3—EE model

3.1 エネルギー効率性の算出

EE modelのベースモデルであるコスト効率モデルは、コスト最小化の視点で事業体の相対評価を行う手法である。DEA基本モデルで使用される入力変数と出力変数のほかに、入力変数の単価を表すコスト変数を導入している点に特徴があり、所与の出力変数およびコスト変数のレベルを維持しつつ最小化した入力変数の値と、観測された入力変数の比率によって効率性を算出する。EE modelは、コスト効率モデルにおけるコスト変数を、単位当たりエネルギー消費量に置き換えることで、各都市のエネルギー消費構造の評価を試みるモデルである。

本論文で扱うエネルギー効率性は、都市レベルで一定のモビリティ水準を担保した上で、各都市のエネルギー原単位の制約(つまりはエネルギー技術の水準)のもとで私的交通及び公共交通のエネルギー消費量をいかに抑制しているかを表す指標として定義する。各変数の設定に際しては、欠損値や異常値等のデータ収録状況を鑑み、DEAの原則である入力変数と出力変数の間に正の相関があるものについて選定するよう留意した。

入力変数については、各都市各交通手段における利用 状況を示す項目として私的交通および公共交通のトリップ 距離[km/人]、コスト変数は、各交通手段利用時に発生 するエネルギー消費量を示す項目として、私的・公共交通 のエネルギー原単位[MJ/人km]、出力変数については、 各都市の総合的なモビリティ水準を示すトリップ平均速度 (全交通手段平均)[km/h]を設定した。

なお、トリップ平均速度を算出する際の公共交通の速度設定については、アクセス・イグレス交通の速度や乗り換え時間等については考慮しておらず、ラインホールの平均速度のみを用いている。各都市の純流動ベースでの平均速度が取得できなかったためこのような設定方法を採用しているが、より厳密な評価を行うためには、純流動での速度を採用する方が望ましい。

以上の変数設定のもと、都市kにおけるエネルギー効率性(EE_k)は、以下の式(1)によって表わされる.

$$EE_{k} = \frac{c_{k}^{*}}{c_{k}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_{ik} x_{i}^{*}}{\sum_{i=1}^{m} p_{ik} x_{ik}}$$
(1)

ここで、 x_{ik} 、は入力変数(観測値)、 p_{ik} はコスト変数(観測値)、iは入力変数の種類を示すサフィックス(本論文では2種類)、 c_k は運輸エネルギー消費量 $[MJ/\Lambda]$ (観測値)、 c_k^* は最小化された運輸エネルギー消費量 $[MJ/\Lambda]$ (推計値)を意味している。最小化されたエネルギー消費量とは、現在の出力変数(平均トリップ速度)の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、これを形成する x_i^* は、次節のエネルギー消費量最適解算出式によって算出される入力変数の最適解である。

3.2 エネルギー消費量最適解の算出

3.2.1 分析の前提条件

最適解の算出にあたり、都市の発展段階および交通インフラ整備水準の非可逆性を考慮し、都市の運輸エネルギー消費構造の異質性(例えば、公共交通依存型か私的交通依存型か)を取り扱うために、EE modelにおける私的・公共交通トリップの最適解の算出にあたって、以下に示す3つの条件を考慮している。詳細はYoshino et al. [2010]²⁾及び吉野ら[2010]⁹⁾に詳しい。

- ・フロンティア形成不能都市の設定
- ・政策的閾値をもつ入力変数の導入
- ・同質な都市グループの形成

このうち、「同質な都市グループの形成」の条件設定については、本論文において結果の考察を行う上で理解が不可欠であると考えられるため、以下に再掲する.

3.2.2 同質な都市グループの形成

都市形態や社会経済状況に影響を受け、交通施策の 方向性は都市によって様々であることから、モビリティを向 上させる際に力点を置く交通手段は都市毎に異なる。 DEAによって設定される各都市の改善案は、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フロンティ ア上の都市の集合のこと、ベンチマーク)を形成し、対象 となる参照集合所属都市の折衷案として設定される。し かし、モビリティの形成におけるメカニズムが全く異なる 複数都市が参照集合のペアを形成する場合、両者を折衷 させることは現実的でない。

この解決案として、フロンティア形成の際に、都市交通 形態が大きく異なる都市の間で凸の生産可能性を成立さ せない手法を提案する。つまり各都市において、参照集 合の組合せを同じタイプの都市で設定する方法である。 ただし、各都市の潜在的な成長の可能性を考慮した評価 を行うため、ある都市が自都市と異なる都市特性を有す る都市を参照することは許容する(例えば, 私的交通依存 型都市が公共交通依存型都市を参照するなど).

都市のクラスタリングに関しては、効率性算出の前に分析者がアプリオリに付与する必要がある。本論文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している。都市のインフラ供給状況と各都市の交通手段選択は相関が高いことから、私的交通・公共交通のインフラ供給を表す代表的な変数を分類に使用した。使用した変数は1人当たり道路延長[m/人]及び1人当たり公共交通路線長[m/人]である。

クラスター分析の結果,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。なお,分類結果は第4章表—1の算出結果と併せて掲載している。

3.2.3 エネルギー消費量最適解の算出

3.2.1節で記載した3つの条件を制約式に加え,都市kにおけるエネルギー消費最適値は,以下の式(2a)-(2m)で表わされる混合整数型問題によって算出される.

目的関数

$$\operatorname{Min} \quad c_k = \sum_{i=1}^m p_{ik} x_i \tag{2a}$$

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} x_{ij} \lambda_{Bj} + \sum_{j=n''+1}^{n'''} x_{ij} \lambda_{Cj} \le x_i,$$

$$(i = 1, 2, \dots, m'),$$
 (2b)

$$x_{ik} \le x_i$$
, $(i = m'+1, \dots, m)$, $(2c)$

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} y_{rj} \lambda_{Bj} \ge y_{rk},$$

$$(r-12...s)$$
(2d)

$$\sum_{i=1}^{n'} \lambda_{Aj} = z_A,\tag{2e}$$

$$\sum_{j=n'+1}^{n''} \lambda_{Bj} = z_B, \tag{2f}$$

$$\sum_{j=n''+1}^{n'''} \lambda_{Cj} = z_C, \tag{2g}$$

$$x_i \ge 0,$$
 $(i = 1, 2, \dots, m),$ $(2h)$

$$z_A + z_B + z_C = 1, (2i)$$

$$\lambda_{Aj} \ge 0, \qquad (j = 1, 2, \dots, n'), \tag{2j}$$

$$\lambda_{Bj} \ge 0,$$
 $(j = n' + 1, \dots, n''),$ $(2k)$

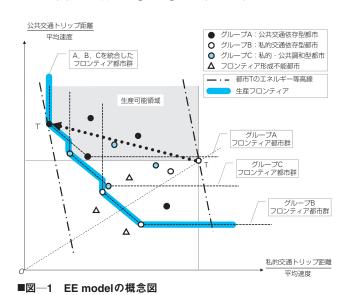
$$\lambda_{Cj} \ge 0,$$
 $(j = n'' + 1, \cdots, n'''),$ (21)

$$z_A, z_B, z_C = 0 \text{ or } 1.$$
 (2m)

ここで、iは入力変数の種類を示すサフィックス(i=1, 2, …, m'までは政策的閾値をもたない入力変数,i=m'+1, …, mまでは政策的閾値をもつ入力変数),rは出力変数の種類を示すサフィックス(r=1, 2, …, s),A,B,C は所属グループ,jは都市(j=1, 2, …, n'まではグループ A(私的交通依存型都市),j=n'+1, …, n"まではグルー

プB(公共交通依存型都市), j=n"+1, …, n""まではグループC(私的・公共交通調和型都市)に所属, j=n""+1, …, nまではフロンティア形成不能都市(途上国都市), c_k は1人当たりの私的・公共交通エネルギー消費量の和, x_{ij} , は私的及び公共交通トリップ距離(入力変数), p_{ij} は私的及び公共交通エネルギー原単位(コスト変数), y_{rj} はトリップ平均速度(出力変数). x_i は変数としての入力であり, 与えられた各交通手段のエネルギー原単位[MJ/人 km]に沿って総運輸エネルギー消費量が最小になるように決められる. λ_{Aj} , λ_{Bj} , λ_{Cj} はそれぞれn'次元, n"-(n'+1)次元, n"-(n''+1)の非負ベクトル, z_A , z_B , z_C は0-1のバイナリ変数である. λ_{Aj} , λ_{Bj} , λ_{Cj} の値が1.0に近づく程, 都市jを参照する傾向が強いことを意味する. EE model の概念図については, 以下図—1に示す.

EE modelでは、各都市は、まずクラスター分析により分類されたグループごとに形成されるフロンティア(図中点線)に基づいてエネルギー消費量の最適解を探索する。そして次に、得られたグループ別の最適解同士を比較して、最も小さい最適解を示したときのフロンティア(図中太線)をもとに、最終的に参照集合を設定する構造になっている。(詳細は吉野ら[2010]9)に詳しい。)



4――都市交通システムのエネルギー効率性評価

EE modelを適用し、世界各都市の都市交通システムのエネルギー効率性及びエネルギー消費最適値を計測した(表一1).表一1において、網掛けをしている都市はエネルギー効率性が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。また、斜体字で示している都市はフロンティア形成不能都市であり、参照集合に所属しない設定を置いている都市である。表中の観測値とはデータから算出される運輸エネ

ルギー消費量の値を意味しており、最適値とはEE model によって算出される現況のモビリティ水準のもとで発揮される最も効率的な運輸エネルギー消費量(つまり各都市におけるエネルギー削減目標値)を意味している。また、参照集合の都市名に続く()内の値はλ値を表している。

同質な都市グループの形成を制約条件に加えることにより、参照集合の組合せは同じグループ内の都市同士で形成される。また、参照集合の設定についてはグループ間の越境を許容するため、EE modelの適用に当たって、より効率的な参照集合の探求が可能となる。

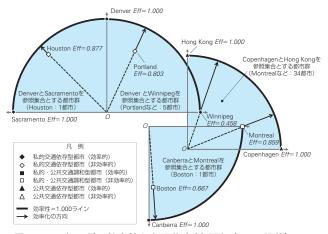
公共交通依存型都市の参照集合であるCopenhagen とHong Kongについては、公共交通依存型都市にとどまらず、世界中の多くの都市に参照されている.

一方, 私的交通依存型都市では, その多くが同じグループのDenverとSacramentoを参照集合として設定している. このことから, 私的交通利用がある程度進行した都市においては, 私的交通依存型のままで効率化を図ることが望ましいことが伺える結果となった.

私的・公共交通調和型都市については、多くの都市が 公共交通依存型都市を参照している。しかし、都市分類 には確定した手法がなく、本論文の提案も試行的な手法 に過ぎない。よって、この結果のみをもって公共交通型都 市の優位性を結論付けることは難しく、他の指標や分類手 法を採用するなど、異なる視点での都市分類を行った上 で今回と同様の分析を行い、結果を比較検証することで、 都市分類の設定方法を精査することが今後必要となる。

なお、Montreal及びWinnipegについては、参照集合に 所属するものの効率的ではない。この結果は、これらの 都市は各都市が所属するグループで形成されるフロンティ ア上に位置するが、他のグループのフロンティアを参照す ることでエネルギー消費構造の更なる改善が期待できる 状態であることを示唆する(図―2参照).

また,本論文では,先進国都市において,都市化が進んでおらず極端にエネルギー消費規模の小さい途上国都



■図─2 エネルギー効率性と参照集合(主要都市のみ記載)

学術研究論文 Vol.14 No.2 2011 Summer 運輸政策研究 017

■表—1 都市交通システムのエネルギー効率性評価

	±/□ -	エネルギー	エネルギー洋	当費 [MJ/人]	42.07	# A /#17mi +	-0***************	
	都市	効率性	観測値	最適値	参 照	集合(括弧的]の数字はλの値)	
	Boston	0.667	58,429	38,947	Canberra	(0.976),	Montreal	(0.024)
	Chicago	0.519	56,128	29,126	Copenhagen	(0.835),	Hong Kong	(0.165)
私的交通依存型	Denver	1.000	68,275	68,275	Denver	(1.000)		
	Detroit	0.798	62,733	50,068	Denver	(0.954),	Winnipeg	(0.046)
	Houston	0.877	71,603	62,767	Denver	(0.517),	Sacramento	(0.483)
世	Los Angeles	0.424	62,113	26,336	Copenhagen	(0.847),	Hong Kong	(0.153)
存	Phoenix	0.751	64,661	48,543	Denver	(0.775),	Winnipeg	(0.225)
至	Portland	0.803	70,709	56,777	Denver	(0.676),	Winnipeg	(0.324)
	Sacramento	1.000	76,636	76,636	Sacramento	(1.000)		
	San Diego	0.668	67,213	44,900	Denver	(0.930),	Winnipeg	(0.070)
	Washington	0.422	60,466	25,514	Copenhagen	(0.728),	Hong Kong	(0.272)
	Winnipeg	0.458	39,365	18,018	Copenhagen	(0.363),	Hong Kong	(0.637)
	Adelaide	0.608	37,099	22,557	Copenhagen	(0.860),	Hong Kong	(0.140)
	Amsterdam	0.617	19,820	12,237	Copenhagen	(0.303),	Hong Kong	(0.697)
	Brisbane	0.906	39,296	35,614	Denver	(0.659),	Winnipeg	(0.341)
	Brussels	0.659	28,902	19,039	Copenhagen	(0.378),	Hong Kong	(0.622)
	Calgary	0.629	47,157	29,665	Copenhagen	(0.871),	Hong Kong	(0.129)
	Canberra	1.000	45,010	45,010	Canberra	(1.000)		
	Edmonton	0.561	44,026	24,684	Copenhagen	(0.644),	Hong Kong	(0.356)
私	Frankfurt	0.697	38,268	26,666	Copenhagen	(0.630),	Hong Kong	(0.370)
私的	Hamburg	0.407	36,744	14,949	Copenhagen	(0.155),	Hong Kong	(0.845)
公	Melbourne	0.623	38,934	24,250	Copenhagen	(0.778),	Hong Kong	(0.222)
· 公共交通調和型	Montreal	0.859	77,788	66,851	Copenhagen	(0.588) ,	Hong Kong	(0.412)
通	Munich	0.797	18,195	14,508	Copenhagen	(0.382),	Hong Kong	(0.618)
詢和	New York	0.467	51,655	24,142	Copenhagen	(0.483),	Hong Kong	(0.517)
型	Ottawa	0.646	33,635	21,733	Copenhagen	(0.520),	Hong Kong	(0.480)
	Paris	0.666	24,255	16,151	Copenhagen	(0.208),	Hong Kong	(0.792)
	Perth	0.534	41,396	22,086	Copenhagen	(0.831),	Hong Kong	(0.169)
	San Francisco	0.418	65,806	27,488	Copenhagen	(0.770),	Hong Kong	(0.230)
	Sydney	0.508	35,053	17,822	Copenhagen	(0.489),	Hong Kong	(0.511)
	Tokyo	0.532	18,243	9,709	Copenhagen	(0.077),	Hong Kong	(0.923)
	Vancouver	0.471	37,146	17,508	Copenhagen	(0.560),	Hong Kong	(0.440)
	Vienna	0.557	20,616	11,486	Copenhagen	(0.128),	Hong Kong	(0.872)
	Copenhagen	1.000	20,430	20,430	Copenhagen	(1.000)		
公共交通	Hong Kong	1.000	9,605	9,605	Hong Kong	(1.000)		
	London	0.648	23,351	15,126	Copenhagen	(0.281),	Hong Kong	(0.719)
	Singapore	0.753	18,078	13,610	Copenhagen	(0.316),	Hong Kong	(0.684)
依存型	Stockholm	0.873	26,835	23,420	Copenhagen	(0.541),	Hong Kong	(0.459)
型	Toronto	0.576	33,573	19,330	Copenhagen	(0.352),	Hong Kong	(0.648)
	Zurich	0.666	25,230	16,816	Copenhagen	(0.380),	Hong Kong	(0.620)
	Bangkok	0.490	29,959	14,684	Hong Kong	(1.000)		
途	Jakarta	1.256	9,072	11,397	Copenhagen	(0.064),	Hong Kong	(0.936)
上	Kuala Lumpur	0.525	20,003	10,497	Copenhagen	(<i>0.233</i>),	Hong Kong	(0.767)
途上国都市	Manila	1.540	7,316	11,267	Copenhagen	(0.141),	Hong Kong	(0.859)
市	Seoul	1.164	9,598	11,169	Copenhagen	(0.214),	Hong Kong	(0.786)

市を参考にしてしまうと、都市交通の衰退を示唆する可能性があり、最適値の現実性が低くなることを懸念し、途上国都市をフロンティア形成不能都市として設定した。その結果、フロンティアを形成しない途上国都市では効率性が軒並み1を超えた。これは、EE modelの構造上、エネルギー消費量が小さい都市は相対的に効率性が高くなってしまうためである。よって、現行モデルでは、途上国都市が参照集合を目指す場合、効率性を下げることになってしまい、本モデルは途上国都市の環境施策立案に資す

るエネルギー効率性を算出するまでに至っておらず、今後 検討の余地が残る. 現在想定される方向性の一例として、 例えば、途上国都市において、将来、エネルギー問題が 顕在化した際の入出力・コスト変数を別途推計し、その値 をもとに現存の先進国都市と比較検討するなど、既存の 先進国都市をベンチマークとして途上国都市の将来のス マートグロースのあり方について検討する等のアプローチ がある.

5 環境政策による改善効果の評価

5.1 効率性改善に関する既往研究

EE modelにより、各都市における運輸エネルギー消費量の最適値の設定が可能になる。しかし、最適値に近付けるためにはどのような施策が効果的であるか検証することは、EE model単体ではカバーできない。また、EE modelは設定した入出力・コスト変数のみで運輸エネルギー消費量の最適値を定めていることから、各都市の人口・インフラ整備状況等の都市特性は全く考慮されておらず、都市によってはEE modelにおける計算上のフロンティアへの到達が困難となる可能性がある。

DEAで得られる効率性指標をもとに、より現実性の高い改善案の提案を試みている研究は数多くある。例えば橋本[1993]¹⁰⁾は、経験や専門家の意見などの情報をDEAに取り入れる乗法制約法の1つである領域限定法を採用することで、DEAの効率性評価自体の現実性の向上を試みている。また、Brockett et al.[1997]¹¹⁾やThompson et al.[1997]¹²⁾は、DEAが与える効率性(Efficiency)だけでなく、効率化に向けての効果性(Effectiveness)を算出できるcone-ratio DEAモデルを使用して評価を行うことで、効果的に効率化を図るための方向性を定めている。

しかし,内田ら[2007]¹³⁾が指摘するように,ウェイトにアプリオリな制約を課すことによって効率性自体を現実的なものにしようとするアプローチは,事業体が異なる基準によって評価されるというDEAの概念に馴染まない可能性が考えられる.また,アプリオリな要素がDEA分析に組み込まれることにより恣意性が混入する危険性もある.そこで本論文では,エネルギー効率性の改善評価に関しては,EE model内に制約条件として組み込まずに,別途モデルを作成することで対応する.

5.2 環境施策による効率化へのアプローチ

EE modelのフレームワークに則って効率化を進める場合、そのアプローチは2通り考えられる。1つ目は「エネルギー原単位の大きい交通手段から小さい交通手段への転換」、もう1つは「エネルギー原単位の抑制」である。前者は、例えば私的交通利用から公共交通利用へのモーダルシフト施策に該当し、後者は燃費改善等のエネルギー原単位改善施策に該当する。なお、前者に関しては、本事例分析では各都市の公共交通インフラ整備施策に関する資料が入手できなかったことから検証していないが、本手法では新規ハード整備による効率性改善案もシナリオとして想定可能である。

さらに、各都市内の輸送機関の間でのエネルギー消費 のシフトではなく、EE modelによって算出される効率性指

学術研究論文

標をもとに、都市間でエネルギー消費量をトレードし、全体での効率化を図る方法として、都市間エネルギー消費 権取引施策も考えられる.

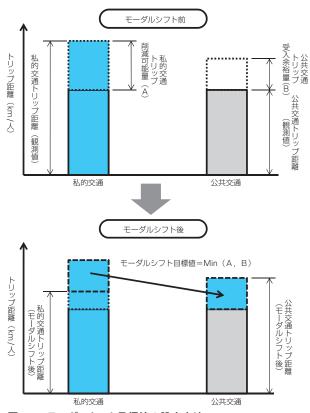
本論文では、以上の3施策(モーダルシフト、エネルギー原単位改善、都市間エネルギー消費権取引)を実施した際にエネルギー効率性に与える影響を検証する。まず、本節では効果検証に先立ち、次項以降でそれぞれの環境施策の改善シナリオの設定方法を提案する。

5.2.1 モーダルシフト施策

(1)DEAによるモーダルシフトの表現

モーダルシフト施策による改善効果を検証する際には、非現実的な改善案の提示を避けるため、まずはどの程度のモーダルシフトが現実的に許容されるかを検討する必要がある。本論文では、図一3に示す通り、私的交通トリップ距離の削減可能量と公共交通トリップ距離の受入余裕量をそれぞれ算定し、両者のうち値が小さい方を「モーダルシフト目標値」として設定する注1)。なお、私的交通トリップ距離削減可能量及び公共交通トリップ距離受入余裕量の設定にあたっては、都市特性の似通った実在する都市をベンチマークに設定することで現実性が確保できるものと考え、DEAを用いる。ここで提案するDEAモデルは、前述のEE modelと区別するため、以降、私的交通利用効率性モデル及び公共交通利用効率性モデルと呼ぶことにする。

これら2つの利用効率性モデルについては、DEAの最



■図─3 モーダルシフト目標値の設定方法

も一般的なモデルである出力を維持した上で入力を最小化する入力指向型モデルではなく、入力を固定した上で出力を最大化する出力指向型モデルをベースに構築する。DEA出力指向型モデルは、効率値 η が1のときに効率的であるが、効率値 η が1以上の値をとり、値が大きくなるほど非効率的であることを意味する。なお、私的交通・公共交通利用効率モデル共に使用するモデルは共通であるが、後述の通り使用する変数が異なる。

以上の条件のもとで構築した利用効率性モデルを以下の式(3a)-(3i)に示す。

目的関数

Max
$$\eta$$
 (3a)

制約式

if $j = 1, \dots, n'$ (Developed Cities)

$$-\sum_{i=1}^{n'} x_{ij} \lambda_j + x_{ik} \ge 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$
(3b)

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_j \ge \eta y_{rk}, \quad (r = 1, 2, \dots, s), \tag{3c}$$

$$\sum_{j=1}^{n'} \lambda_j = 1, \tag{3d}$$

$$\lambda_i \ge 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n'). \tag{3e}$$

if $j = n'+1, \dots, n$ (Developing Cities)

$$-\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \lambda_j + x_{ik} \ge 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$
(3f)

$$\sum\nolimits_{j=1}^{n}y_{rj}\lambda_{j}\geq\eta y_{rk}\qquad \qquad \left(r=1,2,\cdots,s\right) \tag{3g}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \tag{3h}$$

$$\lambda_i \ge 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n). \tag{3i}$$

ここで、x、yはそれぞれ入力・出力変数、i、rはそれぞれ入力・出力変数の種類を示すサフィックス、jは都市を表し、j=1、2、…、n'は先進国都市、j=n'+1、…、nは途上国都市を表す。 λ は非負のウェイトを表す。制約式に関しては前半が先進国都市の場合の制約式、後半が途上国都市の場合の制約式をそれぞれ表している。ここでは、途上国都市の場合は、全ての都市を参照集合として採用する可能性があるが、先進国都市の場合は、交通インフラの整備が進んでいるため、途上国都市のように、抜本的な交通利用変容を達成することは現実的でないと考え、途上国都市を参照しないという仮定を置く。

(2)公共交通利用効率性モデルにおける変数設定及び結果の解釈

公共交通利用効率性モデルは、公共交通平均トリップ 距離の余裕量を把握することを目的として構築する。効率 性が1のとき、公共交通利用は現在の都市条件のもとで飽 和状態(これ以上利用を増やすことができない状態)を意 味し、効率性が1を超えると、現状の都市条件のもとで公 共交通利用を増やせる可能性があることを示唆する。 入力変数は、46都市データ内に収録されている項目のうち、各都市の公共交通利用ポテンシャルが把握できる指標を選択した。ここでは、人口条件を示す指標として人口密度[人/ha]、公共交通の普及状況を示す指標として、1人当たりの公共交通専用路線延長[m/人]を選択した。出力変数については、EE modelにおける入力変数である、1人当たりの公共交通平均トリップ距離[km/人]である。

(3)私的交通利用効率性モデルにおける変数設定および結果の解釈

私的交通利用効率性モデルは、私的交通平均トリップ 距離の余剰量を把握することを目的として構築する。効率 性が1のとき、現在の都市条件のもとで私的車両利用は 飽和状態(これ以上の削減ができない状態)であり、効率 性が1を超えると現状の都市条件のもとで削減できる私 的交通利用が存在することを示唆する.

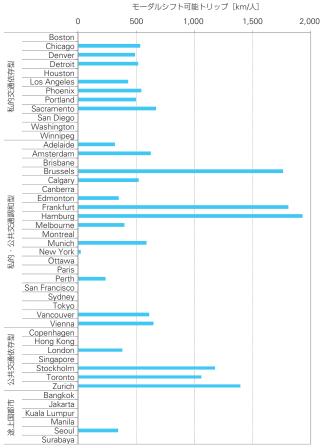
入出力変数の設定については,公共交通利用効率性 モデルと同様に、各都市の私的交通利用ポテンシャルが 把握できる指標を選択し、人口条件を示す指標として人 口密度[人/ha], 私的交通の普及状況を示す指標として, 1人当たりの道路延長[m/人], 1人当たりの私的車両数 「台/人」を選択した. 出力変数については、1人当たりの 私的交通平均トリップ距離[km/人]を設定している. た だし、公共交通に関しては、公共交通利用をどこまで増 やすことができるか、という概念のもとで構築するため、 出力指向型モデルの概念をそのまま適用するが、私的交 通に関しては、私的交通の最大化ではなく最小化を目的 とするべきであるため、そのまま適用ができない、そこで、 私的交通トリップ距離に関しては,最大値と最小値の平 均値(μ)を算出し、(2μ -観測値)を算出することで順位 を逆転したものを用いることによって出力変数の最小化 問題として計算する(算出方法については刀根[1993]¹⁴⁾ を参照).

(4)モーダルシフト目標値の算出

利用効率性モデルの適用によってモーダルシフト目標値は図―4の通り算出された.

結果より、Hamburg、Frankfurtなどのヨーロッパの都市において軒並み高い目標値が設定されていることが分かる。これは、これらの都市において公共交通インフラが十分に整備されており、公共交通利用の受け入れ態勢が整っていることを反映しているものと考えられる。

逆に、Boston、Houston等の北米の都市では、多くの都市においてモーダルシフト目標値がゼロという結果になった。これは、これらの都市では、公共交通利用効率性が1であり、現状以上の利用増加を受け入れる公共交



注:途上国都市は先進国都市から参照されない設定を置いている

■図─4 モーダルシフト目標値

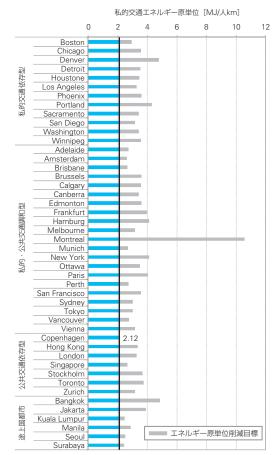
通インフラが整備されていない状況にあることからモーダルシフトが困難であるものと見なされた結果である.

5.2.2 私的交通エネルギー原単位改善施策

私的交通エネルギー原単位の改善のシナリオを講じる際には、京都議定書では最も燃費の優れた都市を目指すトップランナー方式が採られていることから、本論文でもこの考え方を採用する. 1990年における46都市データの収録都市の中で、最も私的交通エネルギー原単位が小さい都市はCopenhagen(2.12[MJ/人km])である(図一5). そこで、全都市がCopenhagenのエネルギー原単位に到達した場合を改善シナリオとして想定する.

図に示す各都市の私的交通エネルギー原単位と2.12 [MJ/人km]との差分(図一5灰色部分に相当)が当該都市のエネルギー原単位の削減目標値となる。例えば、私的・公共交通調和型都市のTokyoの削減目標値は0.90 [MJ/人km]であり、同じ先進国メガシティのNew York(1.99 [MJ/人km])やParis(1.94 [MJ/人km])の削減目標値と比べて小さな値となっている。

なお、エネルギー原単位は各都市における車両・燃料 技術だけでなく渋滞等の影響も受けるため、都市によって はトップランナーでの目標値設定が現実的でない場合も 考えられる。この問題の解決のためには、例えば、前項の

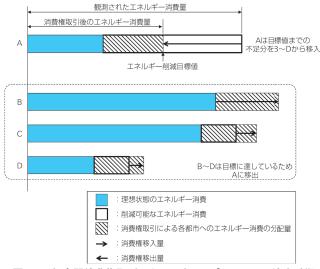


■図-5 各都市の私的交通エネルギー原単位(観測値)と削減目標

モーダルシフト目標値の設定と同様に説明変数から目標値を決定する方法が考えられる。ただし、本研究で収集したデータ内には、各都市のエネルギー原単位の構成要因をカバーできるような変数が設定できなかったためこのような措置を取っている。

5.2.3 都市間エネルギー消費権取引施策

都市間エネルギー消費権取引施策のキャップ及びトレード量の設定に関しては、図―6を用いて説明する.



■図─6 都市間消費権取引におけるキャップ・トレードの決定手順

(1)キャップの設定方法

ここに、運輸エネルギー消費量及びエネルギー効率性が異なるA~Dの4つの仮想的な都市が存在するとする。まず、表—1に示すEE modelで算出したエネルギー効率性スコアに基づいて、全都市の削減対象となる運輸エネルギー消費量の総和を求め、それを等分して全都市に配分する(図—6斜線部に相当)注2)。そして、最適状態のエネルギー消費量と配分されたエネルギー量の和を各都市のエネルギー消費枠(キャップ)とする。

(2)トレード量の設定方法

(1)で設定したキャップを超過するエネルギー消費を行っている都市(図—6のA)は、エネルギー消費権取引によってキャップまでの不足分を消費権の形で獲得することで、エネルギー消費量の削減を図ることになる。逆に現状でキャップを下回っている都市(図—6のB, C, D)は余剰分を消費権として移出する。

なお、本来であれば、トレードの設定に際しては、各都市の支払い意思等の価格メカニズムを考慮した条件設定を行う必要があるが、現時点ではこれらの情報が収集できていないことから、モデル内に組み込むまでに至っていない。よって、ここで示しているのは、あくまでエネルギー効率性の観点から見たトレード量の設定方法の提案であることを断わっておく。

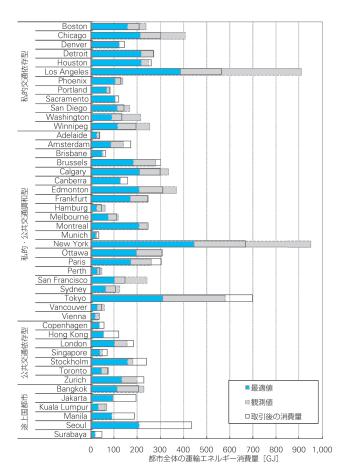
(3)都市間エネルギー消費権取引施策の目標値の算出

以上の手法に基づき,都市間エネルギー消費権取引施 策の目標設定を行った結果を,以下図―7に示す.

なお、エネルギー消費権取引に関する分析は、都市全体の運輸エネルギー消費量を扱う。一方、5.1節と5.2節で行ってきた分析は、個人のエネルギー消費活動に基づいたものであった。ここで、分析レベルの一貫性を保つために、各都市のキャップの決定に際しては、まず個人レベルで算出したエネルギー効率性をもとに、上記の手順に沿って各都市の1人あたりのエネルギー消費キャップを設定した後に、各都市の人口を乗じて都市全体の運輸エネルギー消費量に換算し、各都市全体のキャップの設定を行っている。

図―7から確認できる傾向として、北米の都市の多くが キャップを超過しており(消費権移出側)、逆にアジア・ヨーロッパの都市の多くがキャップに未到達である(消費権移 入側)結果となっている.

ただし、前述の通りトレード量の設定においては各都市の支払い意思等は考慮されていないため、今回の分析結果については、あくまで実行性を考慮していない方法論の提案にとどまる.



■図─7 各都市の消費権取引後のエネルギー消費量

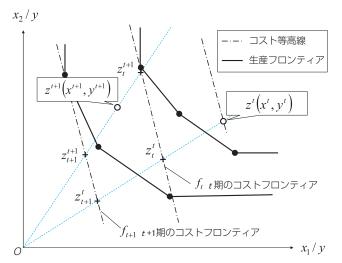
6──政策に伴う効率性の改善効果の評価

6.1 Malmquist指数による改善効果評価手法の提案

前章でシナリオ設定を行った3施策のエネルギー効率性に対する改善効果を定量的に把握するために、Malmquist指数を応用する.

図―8において、単時点のEE modelを使う場合、効率化とは都市iが状態ziから状態ziへ改善することを意味するが、施策前後で効率性を比較する場合、with-withoutでフロンティア自体のシフトがあり、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(施策前)の効率性をt+1期(施策後)のフロンティアで評価しなおす必要がある。Malmquist指数は、こうしたフロンティアの時点間のシフト幅を考慮して各都市の効率性の変化及び技術進歩を定量的に評価できる方法論である。ここでは、本来時系列分析に用いられるMalmquist指標を、施策施行前後のフロンティアの構造的な違いを表現するために応用する。

ある都市のパフォーマンスがt期においてz', t+1期において z'^{+1} で示されるとする。同様に、t期においてコストフロンティアは f_i で、t+1期のコストフロンティアは f_{i+1} で表す。図-8において、t期におけるz'が、その期において効率化した場合は、z'で表すことができる。ここで、上の添字tはt期を示し、下の添字tはt期のコストフロンティアを



■図─8 Malmquist指数による効率性の表現

示している。また、t期のパフォーマンスをt+1期のフロンティアで評価する場合には、zはt+1期のフロンティア上のz_{t+1}にシフトすることになる。t+1期のパフォーマンスをt期のフロンティアで評価する場合も同様に考えることができる。

k都市におけるt期 $\sim t+1$ 期でのMalmquist指数の変化率は以下の式(4)の通り定式化される.

 $M_k = CU Index * FS Index$

$$= \frac{F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{F_t(x^t, y^t)} \cdot \left[\frac{F_t(x^{t+1}, y^{t+1})}{F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{F_t(x^t, y^t)}{F_{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(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期間、x及びyの添字がそれぞれデータの取得時期(t:施策前、t+1:施策後)を表している。図-8と対応させると、以下式(5a)-(5d)の通り示される。

$$F_t(x^t, y^t) = z_t^t / z^t \tag{5a}$$

$$F_{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) = z_{t+1}^{t+1}/z^{t+1}$$
 (5b)

$$F_t(x^{t+1}, y^{t+1}) = z_t^{t+1}/z^{t+1}$$
 (5c)

$$F_{t+1}(x^t, y^t) = z_{t+1}^t / z^t$$
 (5d)

なお、式(4)右辺括弧外をCatch Up指数(CU指数)と呼び、括弧内をFrontier Shift指数(FS指数)と呼ぶ。CU指数は、t期からt+1期にかけてのフロンティアへの近傍度を表しており、施策前と比較して施策後に自都市の効率値がどの程度変化したかを表す。CU指数が1と等しいとき、当該都市の効率性が施策実施前後で変動しなかったことを意味し、CU指数が1を超えたとき、当該都市の効率性が下降、つまりフロンティアから遠ざかったことを示し、CU指数が1未満ならば効率性が上昇、つまりフロンティアに近づいたことをそれぞれ意味する。

FS指数は、t期からt+1期にかけてのフロンティアのシ

フト幅を表しており、施策前と比較して、施策後にどの程度フロンティアが移動したかを示す。すなわちFS指数の向上はフロンティア上の都市のエネルギー関連技術の進歩を意味する。FS指数もCU指数と同様に、1と等しいときフロンティア上の都市の技術レベルに施策前後で変化がない状態を示し、FS指数が1を越えると技術レベルの進歩、1を切ると技術後退をそれぞれ意味する。

6.2 施策後のエネルギー効率性算出

モーダルシフト施策およびエネルギー原単位改善施策については、実際に交通利用者の交通行動の変容が発生するため、5.2.1節~5.2.3節で設定したシナリオに基づき入力変数およびコスト変数を更新し、再度EE modelを使用してエネルギー効率性を算出する.

一方、エネルギー消費権取引施策については、実際の交通行動の変容は発生せず、取引において移動した消費権は、その時点で貨幣価値に変化し、取引の際にエネルギー消費量の増減は発生しない。そのため、本論文では、各都市のフロンティアは施行前後で不変であるものと仮定し、まず、施策前の観測データをEE modelに適用して、最小化されたエネルギー消費量 c_k^* を算出し、次に取引によって削減されたと想定するエネルギー消費量(トレード量 $)c_k^*$ を算出して式(6)に代入することによって、施策後のエネルギー効率性を算出した。

$$EE_{k} = \frac{c_{k}^{*}}{c_{k} - c_{k}^{'}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} p_{ik} x_{i}^{*}}{\sum_{i=1}^{m} p_{ik} x_{ik} - c_{k}^{'}}$$
(6)

6.3 施策施行に伴う改善効果の算出

表―2に政策施行に伴う各指数の全都市平均を示す. 本論文では、設定しているシナリオの仮定が施策によって異なるため、横並びでの比較は大きな意味をなさない. そのため、ここではMalmquist指数を構成するCU・FS指数の構成比率を施策ごとに検証することにより改善効果を考察する.

エネルギー原単位改善施策については、FS指数が卓越していることから、施策前後における各都市のエネルギー効率性の改善効果よりも、フロンティア自体のシフト幅が大きく、現在の先進都市群のエネルギー消費パフォー

■表─2 施策施行に伴う変化:各指数の全都市平均と標準偏差

施策	CU指数	FS指数	Malmquist 指数
モーダルシフト	1.029	1.028	1.053
	(0.078)	(0.011)	(0.082)
エネルギー原単位改善	1.011	1.590	1.608
エネルギー原単位以書	(0.019)	(0.518)	(0.527)
都市間エネルギー消費権取引	1.073	1.000	1.073
即川周エイル十一月貝惟取り	(0.433)	(0.000)	(0.433)

注:表中の数値は全都市平均,()内は標準偏差

学術研究論文 Vol.14 No.2 2011 Summer 連輸政策研究 023

マンスが更に向上していることを示唆している. 換言すれば, 当施策は技術革新的要素が高く, 例えばプラグインハイブリッド車や電気自動車の普及促進など, 先端技術を更に進歩させる性格が強いといえる.

都市間エネルギー消費権取引施策の場合は,施策によってエネルギー消費構造の変化が発生するわけではないため,FS指数は1であり,CU指数が卓越している.つまり,既存技術を有効活用して各都市がフロンティアへキャッチアップを進めていく性格を有していることが分かる.つまり,都市間エネルギー消費権取引施策は都市間の交渉によって成立するため,エネルギー原単位改善施策のような技術革新を必要としないことから,制度設計は必要であるものの,技術面における実現性は比較的高く,運輸エネルギー消費の全世界的視野における効率化に対して,有効な施策であるといえる.

モーダルシフト施策はCU指数,FS指数共に同程度の値を有しており,施策の性格としては,先に挙げた2つの施策の折衷的な位置づけである.つまり,フロンティア上の都市とそれ以外の都市双方のエネルギー効率性の改善を誘導する効果が期待できる施策である.

ただし,以上の考察は,分析対象都市全体の平均値からマクロ的に見ることで,施策が持つ一般的な特性を検証したものであるため,個別都市に着目して考察を行う場合,異なる解釈になる場合もあり得る.

7――まとめと今後の課題

7.1 まとめ

本論文では、EE modelによって得られる各都市の運輸エネルギー消費目標値をもとに、都市交通部門における各種環境施策のシナリオ設定及び実施効果検証の方法論の提案及び試行的検証を行った。本論文において得られた重要な知見は以下の通りである。

- DEA出力指向モデルをベースとした利用効率性モデル を開発することで、各都市の人口や現況のインフラ整備 状況等の都市交通特性のもとで実現可能なモーダル シフト量の設定方法を提案した.
- EE modelをもとに、各都市のエネルギー消費権取引におけるキャップ・トレード量の設定方法を提案した。この手法は各都市のエネルギー効率性スコアを元に目標設定を行っている点で、各都市のエネルギー消費構造を考慮した上で、全世界的なエネルギー効率性の最適化を図るよう取引量を設定することが可能である。したがって、今後、消費権取引施策を計画する際の有用なツールとしての可能性を秘めているものと考える。
- 3つの環境施策(モーダルシフト,エネルギー原単位改

善、都市間エネルギー消費権取引)がエネルギー効率性に与える影響について、Malmquist指数を適用することで評価を行った。具体的には、Malmquist指数を構成するCU指数及びFS指数の値を検証することで、本論文内で取り扱った環境施策が各都市のエネルギー効率性に及ぼす影響を検証した。その結果、都市間エネルギー消費権取引施策は各都市の既往技術を有効活用して効率化を進める性格を有しており、逆に、エネルギー原単位改善施策は技術革新的要素が強く、先端技術を更に進歩させる性格が強いことが確認された。

7.2 今後の課題

一方,本論文には改善すべき課題も残されている.

- ●本論文で使用しているデータの取得年は1990年であり、 現況の交通状況を捉えたものではないため、本成果の 位置づけは、概念的な方法論の提案に留まらざるを得 ない. UITPでは既に1990年以降のデータが取得され ているため、データの時点更新を行い、現況の交通施 策に転用できる分析を行い、分析結果の有用性を確認 する必要がある.
- EE Modelによって設定されるフロンティアは、取得されているサンプル都市内での比較検証に留まる。よって、本論文で設定されるフロンティアは、各都市におけるファースト・ベストでない可能性がある点に留意する。つまり、本分析により設定した参照集合を参考に、より各都市にとって望ましい(参照集合に設定することで効率性がより高まると想定される)都市を追加するなど、感度分析的なアプローチが必要である。
- モーダルシフト量の設定にあたっては、データ取得項目が限られていたことにより、各都市の公共・私的交通ポテンシャルを完全にカバーできているとは言えず、概略的なものに留まる。また、モーダルシフト施策を実施する際の投資効率なども考慮していないため、追加検討が必要である。
- 都市間エネルギー消費権取引施策の目標設定についても、各都市の交通関連予算などの財政的な情報を入手することができなかったことから、取引の際の価格メカニズムをトレード量設定時に取り入れることができていない。今後、データ収集及びモデルの改良を進め、今回提案した取引施策の方法論の有用性を検証することを課題としたい。

謝辞: 本研究の一部は, 著者の一人が運輸政策研究所客 員研究員の期間中に進めたものである. 関係各位から貴 重なコメント等をいただいたことに対し, ここに謝意を表 します. 注

- 注1)モーダルシフトの設定において、シフト幅の設定についてはいくつかの方法が存在する。ここではシフト幅設定について論点を置かないので、最も単純な方法を想定した。他の設定方法であっても、本手法は適用可能である。
- 注2)注1と同様に、キャップの設定方法についてもいくつかの方法が存在するが、 最も単純な方法を想定した。

参考文献

- 1) Verfaille, H.A., Bidwell, R.[2000], Measuring Eco-Efficiency: a Guide to Reporting Company Performance, World Business Council for Sustainable Development: Geneva.
- 2) Yoshino, D., Fujiwara, A., and Zhang, J. [2010], "Environmental efficiency model based on data envelopment analysis and its application to environmentally sustainable transport policies", the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, CD-ROM.
- 3) Kenworthy, J.R., and Laube, F.B. [1999], An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities 1960-1990, University Press of Colorado.
- 4) Frank, L.D., Jr. B.S., Bachman, W. [2000], "Linking land use with bouse-bold vehicle emissions in the central Puget sound: methodological framework and findings", Transportation Research Part D, Vol. 5, pp. 173-196.
- 5) Senbil, M., Zhang, J., and Fujiwara, A. [2005], "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.
- 6) Feng, T., Zhang, J., and Fujiwara, A.[2007], "Environmental efficiency analysis of transportation system: a stochastic frontier approach with flexible cause-effect structure", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 7, pp. 1475-1489.

- 7) McMullen, B.S. and Noh, D.W.[2006], "Accounting for emissions in the measurement of transit agency efficiency: a directional distance function approach", Transportation Research Part D, doi:10.1016/j.trd.2006.10.001.
- 8)国土交通省総合政策局[2007],「運輸部門のCO₂排出に係る環境効率改善 指標の算出について~輸送指数の利用によるアプローチ~」,平成19年2月 20日.
- 9) 吉野大介・藤原章正・張峻屹[2010], "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",「土木計画学研究・論文集」, Vol. 27, No. 1, pp. 173-180.
- 10) 橋本昭洋[1993], "DEAによる野球打者の評価", 「オペレーションズ・リサーチ」, Vol. 38, No. 3, pp. 146-153.
- 11) Brockett, P.L., Chames, A., Cooper, W.W., Huang, Z.M., and Sun, D.B. [1997], "Data transformation in DEA cone ratio envelopment approaches for monitoring bank performances", European Journal of Operational Research, Vol. 98, pp. 250-268.
- 12) Thompson, R.G., Brinkmann, E.J., Dharmapala, P.S., Gonzalez-Lima, M.D., and Therall, R.M. [1997], "DEA/AR profit ratios and sensitivity of 100 large U.S. Banks", European Journal of Operational Research, Vol. 98, pp. 213-229.
- 13)内田賢悦· 佐々木恵一·加賀屋誠一[2007], "包絡分析法を適用した効率性 総合評価手法の提案",「日本都市計画学会都市計画論文集」, No. 42-3, pp. 511-516.
- 14)刀根薫[1993], "DEAのモデルをめぐって",「オペレーションズ・リサーチ」, Vol. 38, No. 1, pp. 34-40.

(原稿受付2010年11月5日)

Analysis of Influence that Environmental Policies Give Energy Efficiency in Urban Transport Systems – Approaches by Using DEA and Malmquist Index –

By Daisuke YOSHINO and Akimasa FUJIWARA

In order to realize environmentally sustainable transport (EST), it becomes quite important to reduce the environmental load from transport sector while maintaining the level of mobility. This study attempts to apply the Environmental Efficiency model (EE model) to measure efficiency of energy consumption at a given level of mobility. In addition, the effects of some EST policies to raise efficiency are simulated based on DEA (Data Envelopment Analysis) and Malmquist index, including modal shift in a city, technological innovation to improve the intensity of energy consumption in cities and the emissions trading scheme between cities.

Key Words: Energy efficiency, DEA, Malmquist index, Transport energy, Environmental policy

この号の目次へ http://www.jterc.or.jp/kenkyusyo/product/tpsr/bn/no53.html

学術研究論文 Vol.14 No.2 2011 Summer 運輸政策研究 025