

# 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

交通ネットワークの発達は、地域住民の移動利便性を向上させ、地域の経済成長に大きく寄与してきた。しかしながら、交通機関の利便性向上が地球環境に対して負の影響を及ぼしていることは否定できず、例えば、世界全体の最終エネルギー消費の総量に対する運輸部門の割合は約3割を占めており、かつ、その構成比は年々増加傾向にある。今後、深刻化する環境問題への対応は必要不可欠であるが、その際に、現在実現されている円滑なモビリティ水準を低下させることは我々のクオリティ・オブ・ライフの低下に直結することから、環境負荷の削減とモビリティ水準の維持向上の両立を図る施策を検討する必要がある。

施策を具体化させるためには各地区において地域の実情を踏まえた定量的な目標設定が重要になる。その点で、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）<sup>1)</sup>という概念は、先に述べた利便性向上と環境負荷削減のジレンマを解消し、各都市の身の丈に合った実現性の高い達成目標を設定する上で有用であると考えられる。

本研究では、各都市において今後の運輸部門における環境施策の方向性を定める上で基本情報として活用することを想定し、運輸エネルギー消費削減目標の設定方法を提案する。データセットについては、途上国と先進国を含む世界46都市データ（1990年）<sup>2,3)</sup>を用い、方法論については前述の Eco-efficiency の概念をデータ包絡分析法（DEA）<sup>4)</sup>のフレームワークに基づいて運輸部門

に適用することにより評価する。なお、この世界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課題認識

#### （1）運輸部門における環境効率性に関する既往研究

運輸部門における環境負荷削減に関する研究は世界で行われており、例えば、Ramanathan and Parkh (1999)<sup>5)</sup>は、インドにおける持続可能な開発のための環境負荷のあり方について検討のために、公共交通へのモーダルシフトとCO<sub>2</sub>削減量の感度分析を行っており、Andre and Hammarstrom(2000)<sup>6)</sup>は、運転速度と環境負荷の関係性を分析している。また、Frank et al.(2002)<sup>7)</sup>は、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、土地利用パターンや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ことについて言及している。

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。先行研究では、従来の 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しており、例えば、Senbil et al.(2005)<sup>8)</sup>は、上述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）を使用して各都市の交通システムの環境評価の定量化を図っている。Feng et al.(2007)<sup>9)</sup>も同様に、SFA を使用して各都市の交通システムの環境効率性評価を行っている。また、McMullen and Noh(2006)<sup>10)</sup>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。

また、国土交通省の交通調査統計課分析室は、平成

\*キーワード：環境計画，地球環境問題

\*\*正員，修（工），復建調査設計株式会社地域経済戦略チーム  
（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）

19 年 2 月 20 日、日本国内の運輸部門から排出される CO<sub>2</sub> の環境効率改善指標の試算結果を公表した<sup>11)</sup>。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（デカップリング）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 CO<sub>2</sub> 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。

## （２）課題認識

これらの環境効率性評価は、今までなされてこなかった環境と利便性の同時評価を行っている点で評価でき、環境効率性をもとに各エージェントにとって身の丈に合った実現性の高い環境負荷削減目標を設定することが可能になる。また、感度分析や回帰分析を組み合わせることにより、今後の環境施策の方向性について議論することも可能である。

しかし、これらの研究例における環境効率性評価手法に関しては、計算手法は異なれども、大別すると以下の２点において課題が残る。

まずは、都市・交通の多様性の表現である。都市形態や都市の交通政策の方向性は様々であり、この違いは都市のインフラ整備状況、交通投資、土地利用形態等に起因している。環境効率性を評価する際に、この都市・交通の多様性を無視してしまうと、得られた効率性指標を各都市の環境負荷削減目標値の設定に適用する際に、全都市で画一的な削減目標を掲げることに繋がる恐れがある。前述の Senbil et al.(2005)<sup>8)</sup>の研究では、SFA の説明変数として、CBD 人口や道路延長、自動車分担率といった都市・交通に関連する指標を使用することにより、多様性の表現を図っている。しかし、SFA のような回帰分析による環境効率性算出法では、パラメータ推定値が全サンプルで一律に設定されてしまう問題がある。そのため、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モデルの導入が必要になるものと考え、McMullen and Noh(2006)<sup>10)</sup>の研究と同じく、DEA の適用によって解決を試みる。

もう 1 つの課題は、算出される環境効率性指標から導出される施策案の実効性である。環境効率性指標に関しては、分子に相当する交通システムの利便性を高め、分母に相当する環境負荷量を減らすことで値が向上するが、利便性向上及び環境負荷削減については、各都市のキャパシティーを踏まえると限界が存在する。しかし、従来の指標算出手法では、モデル内で限界値の設定がなされていないため、政策立案に耐え得るほどの現実性が確保できない指標に陥る可能性があった。この問題への

対応策として、本研究では、DEA の一種であるコスト効率モデル<sup>12),13)</sup>を採用することで解決を試みる。

## ３．DEA モデルとコスト効率モデル

### （１）DEA とは

DEA は、Charnes et al. (1978)<sup>4)</sup>によって経営分析手法の一つとして開発され、計算及び理解の容易性から様々な分野において、効率性評価手法として利用されてきた。DEA は、最も優れたパフォーマンスを示す事業体をもとに生産フロンティアを計測し、この生産フロンティアを一つのベンチマークとして、他の事業体を相対的に評価することができる手法である。

SFA も DEA と同様に生産フロンティアを計測して効率性算出を行う手法であるが、表-1 に示す通り生産フロンティアの推計方法が異なる。SFA は、パラメトリックにフロンティアを推計するため、仮説検定や統計的ノイズの除去が可能であるというメリットがあるが、統計的な信頼性確保のためには多数のサンプルが必要である。本研究の場合、都市データのサンプル数が 46 であることから、SFA では統計的な信頼性が十分に確保できない可能性がある。ただし、DEA はノン・パラメトリックにフロンティアを推計するため、SFA では可能な仮説検定が DEA では不可能である。また、異常値による影響を受けやすいデメリットがあるため、事前にデータセットを十分に精査する必要がある点に留意する。

表-1 DEA と SFA の比較

|            | DEA: データ包絡分析                                                                      | SFA: 確率的フロンティア分析                                              |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 共通点        | 生産フロンティアを設定し、フロンティアをもとに事業体の効率性を算出する                                               |                                                               |
| フロンティア推計方法 | ノン・パラメトリック法<br>統計的推計を行う際、母集団の分布型に仮定を設けない手法                                        | パラメトリック法<br>統計的推計を行う際、母集団の分布型を仮定しておく手法                        |
| 長所         | 1. 多入力・多出力システム下での効率性計測が可能<br>2. 関数型・分布型の仮定が不必要<br>3. サンプル数が少なくても相対的な効率性を比較することが可能 | 1. 統計的ノイズを排除することが可能<br>2. 仮説検定が可能                             |
| 短所         | 1. 統計的ノイズを排除することが不可能<br>2. 仮説検定が不可能<br>3. 異常値の影響を受けやすい                            | 1. 事前に関数型と分布型の仮定が必要<br>2. サンプル数の確保が必要<br>3. 分布型の仮定が結果に大きく影響する |
| 適用例        | 非営利団体の経営効率性の計測                                                                    | 営利団体の経営効率性の計測                                                 |

出典：Lin and Tseng(2005)<sup>14)</sup>をもとに筆者が作成

### （２）DEA モデルとコスト効率モデルの違い

通常の DEA モデルでは、出力／入力（いずれも複数指標の取り扱いが可）という比例尺度により、相対的な効率性を算出する仕組みであり、各事業体の生産性を評価することが可能である。効率性の低い事業体は、効率的な事業体を目指し、出力を増加または入力を減少させることによって効率化を図る。

一方、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。コスト効率モデルでは、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する点が最大の特徴である。コスト効率モデルでは、与えられた出力変数およびコスト変数のレベルを維持した上で、入力変数の最小化を図ることを目的としている。

#### 4. 環境効率性評価モデル（EE model）の定式化

（1）環境効率性算出におけるコスト効率モデル導入の必要性

運輸エネルギー消費量削減のアプローチの方向性は大きく分けて2種類あり、1つは排出原単位の削減、もう1つが自動車需要の抑制（または他機関への転換）である。

通常の DEA においては、入出力の比率で効率性を算出する。例えば、本研究のように、各都市の交通システムが、エネルギーを消費することで各々のモビリティ水準を発揮する現象を評価しようとする場合、エネルギー消費を入力に、モビリティ水準を出力として設定し、効率性を算出することになる。しかし通常の DEA では、出力と入力のバランスを評価することは可能であるが、エネルギー消費を構成する要素を細分化し、削減に向けての方向性を検討するほどのスペックは有していない。環境効率性指標をもとにエネルギー消費削減の方向性を具体化するためには、市民の行動ベースでの改善案を提案する必要があるため、少なくともエネルギー消費を構成している交通需要と排出原単位については分離して検討する必要がある。

本研究では、この問題を解決するために、コスト効率モデルを用い、モデル内のコスト変数に排出原単位、入力変数に交通需要に関連する指標を、そして出力変数にモビリティ水準を示す指標を設定する手法を提案する。

（2）コスト効率モデルを用いた環境効率性評価モデル（EE model）

前節で述べた通り、本研究ではコスト効率モデルを用いて、環境効率性評価モデル（EE model: Environmental Efficiency model）を定式化する。

分析に使用する変数については、データの利用可能性を検討した結果、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]を設定する。また、出力変数にはモビリティの高さを示すトリップ平均速度[km/h]を設定している。出力変数に関しては各都市の総合的なモビリティの高さを表現させるため、公共交通・私的交通全ての交通手段のトリップの平均速度を採用している。なお、46都市データにおける私的交通は乗用車及び二輪車、公共交通はバス、鉄道、フェリーを

それぞれ含む。

使用したデータの収集方法については、以下に示す通りである。ただし、都市ごとにデータの収集方法が異なることから、ここでは代表的な収集方法のみ記載している。

表-2 使用したデータの収集方法

| 変数    | 代表的な収集方法                                            |
|-------|-----------------------------------------------------|
| 入力変数  | 私的交通年間平均トリップ長                                       |
|       | 世帯移動調査等により算出                                        |
| 出力変数  | 公共交通年間平均トリップ長                                       |
|       | 乗車調査、乗車券売上げデータ、世帯移動調査等から算出                          |
| コスト変数 | トリップ平均速度                                            |
|       | 私的交通：世帯移動調査に基づいて算出<br>公共交通：運行管理者のAnnual Report等から算出 |
| コスト変数 | 私的交通輸送人キロあたりのエネルギー消費量                               |
|       | 各国の石油連盟等が整理しているデータをもとに算出                            |
| コスト変数 | 公共交通輸送人キロあたりのエネルギー消費量                               |
|       | 運行管理者のAnnual Report等から算出                            |

出典：Kenworthy and Laube(1999)<sup>3)</sup>をもとに筆者が作成

コスト効率モデルを用いた EE model の概念図を図-1に示す。図-1の縦軸・横軸はそれぞれ公共・私的交通トリップ距離／トリップ平均速度（つまり入力変数／出力変数）を示しており、各都市を入出力変数のみで評価した際に最も効率的な生産活動（低入力高出力）を達成している都市の集団（生産フロンティア）は都市 A, B, C を結ぶ破線で表わされる。

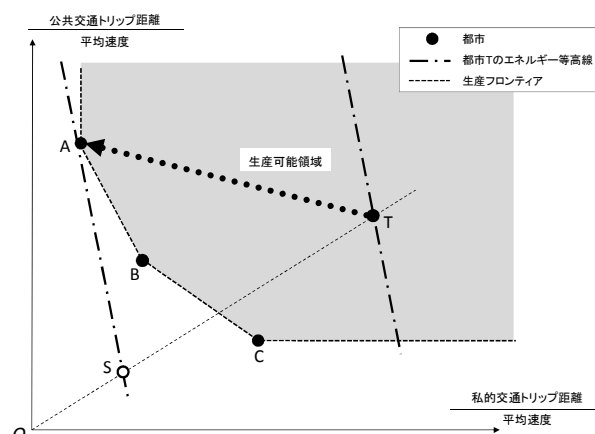


図-1 コスト効率モデルを用いたEE modelの概念図

仮に通常の DEA モデルを用いた EE model を構築する場合、非効率的な都市はこの生産フロンティアを目指して効率化を図ることになる。一方、コスト効率モデルにおいてはフロンティアの設定までは通常の DEA と同様の手順を踏むが、効率化のアプローチが異なり、例えば、都市 T が効率化を目指す場合、都市 T のエネルギー等高線と生産フロンティアが交差する点を目指すことになる。つまり、都市 T の環境効率性は都市 T と都市 A

のエネルギー消費量の比 ( $OS/OT$ ) で算出される。このように、入出力変数によって設定される生産フロンティアとコスト変数によって設定される等高線の組み合わせによって環境効率性を算出する点がコスト効率モデルベースの EE model の特徴である。

EE model において、都市  $k$  の環境効率性( $EE_k$ )は式(1)のように定式化される。

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

ここで、 $x_{ik}$ は入力変数である私的交通及び公共交通トリップ距離(観測値)、 $p_{ik}$ はコスト変数である私的交通及び公共交通エネルギー効率(観測値)、 $i$ は入力変数の種類を示すサフィックス(本研究では2種類)、 $c_k$ はエネルギー消費量(観測値)、 $c_k^*$ は最小化されたエネルギー消費量を意味している。最小化されたエネルギー消費量とは、現在のトリップ平均速度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、 $x_i^*$ は、以下のコスト効率モデル(式(2)-(7))によって算出される私的・公共交通トリップ距離の最適解である。

目的関数

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^m p_{ik} x_i \quad (2)$$

制約式

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_i, \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j \geq y_{rk}, \quad (r=1,2,\dots,s), \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad (5)$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad (j=1,2,\dots,n), \quad (6)$$

$$x_i \geq 0, \quad (i=1,2,\dots,m). \quad (7)$$

ここで、 $y_{rk}$ は平均トリップ速度(観測値)、 $r$ は出力変数を示すサフィックス(本研究では1種類)、 $j$ は都市( $j=1,2,\dots,n$ )、 $\lambda$ は $n$ 次元の非負ベクトルを意味する。この式では、変数としての入力ベクトル  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  が組み込まれ、これは与えられた私的・公共交通エネルギー効率[MJ/人キロ]に沿ってエネルギー消費量が最小になるように決められる。

### (3) 各種条件の導入

前章で説明したコスト効率モデルによる環境効率性の計測により、エネルギー消費構造の詳細な評価が可能

になる。本節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つの条件をコスト効率モデル EE model の制約式に取り入れることで、モデルを更に昇華させる。

#### (a) 政策的閾値をもつ入力変数の導入

コスト効率モデルでは、入力変数である私的交通・公共交通トリップ距離は、ともに削減対象として扱われる。しかしながら、私的交通と比較して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策を検討する際に、一般に削減の対象とされることは少ない。また、近年運輸業者や国・自治体における財政上の問題で公共交通の路線撤退が行われることはあるものの、環境施策の一環として一度整備した公共交通インフラを放棄することは考えにくい。そのため、公共交通利用に関しては現状以上を維持するように制約を加える必要があるものと考えた。本分析では、刀根(1993)<sup>13)</sup>の提案する DEA における政策的閾値の設定方法を参考に、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。具体的には、EE model の式(3)を、式(8)-(9)のように分割することで設定する。

政策的閾値をもたない入力変数 ( $i=1,2,\dots,m'$ )

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \leq x_i \quad (8)$$

政策的閾値をもつ入力変数 ( $i=m'+1,\dots,m$ )

$$x_{ik} \leq x_i \quad (9)$$

#### (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る。例えばLos Angelesのような私的交通依存型都市とHong Kongのような公共交通依存型都市では、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生産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することになるが、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ることは現実的でない。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、得られる改善案が現実性の低いものになってしまう可能性がある。

この解決案として、生産フロンティアの形成の際に、

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がある。つまり、各都市において、どのようなタイプの都市であってもそれぞれの都市特性に適した都市を参照集合として設定することが可能であるが、参照集合の組み合わせは同じタイプの都市を設定する方法である。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ることなく、かつ現実的な環境効率性の評価が可能になる、その際の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ア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。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を表-3に記載する。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-3 クラスター分析の結果

| クラスター            | 私的交通<br>依存型都市                                                                                                                                | 私的・公共交通<br>調和型都市                                                                                                                                                                                                                   | 公共交通<br>依存型都市                                                                    |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 道路延長<br>[m/人]    | 7.11                                                                                                                                         | 4.97                                                                                                                                                                                                                               | 2.23                                                                             |
| 公共交通路線長<br>[m/人] | 24.82                                                                                                                                        | 62.19                                                                                                                                                                                                                              | 127.69                                                                           |
| 所属都市             | Chicago<br>Boston<br>Denver<br>Detroit<br>Houston<br>Los Angeles<br>Phoenix<br>Portland<br>Sacramento<br>San Diego<br>Washington<br>Winnipeg | Adelaide<br>Amsterdam<br>Brisbane<br>Brussels<br>Calgary<br>Canberra<br>Edmonton<br>Frankfurt<br>Hamburg<br>Melbourne<br>Munich<br>New York<br>Ottawa<br>Paris<br>Perth<br>San Francisco<br>Sydney<br>Tokyo<br>Vancouver<br>Vienna | Copenhagen<br>Hong Kong<br>London<br>Singapore<br>Stockholm<br>Toronto<br>Zurich |
| 都市数              | 12                                                                                                                                           | 21                                                                                                                                                                                                                                 | 7                                                                                |

#### (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、得られる環境効率性指標が現実的で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。なお、途上国都市の定義については諸説あるが、ここでは国際通貨基金（IMF）の定める Advanced Economies の構成国に所属する都市を先進国都市、それ以外の都市を途上国都市とした。本分析で取り扱う 46 都市のうち、6 都市（Bangkok, Surabaya (Indonesia), Jakarta (Thailand),

Kuala Lumpur (Malaysia), Manila (Philippine), Seoul (Korea) が途上国都市に該当する。

#### (4) EE model の定式化

以上の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 EE model は以下の式(10)-(22)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

$$\text{Min } c_k = \sum_{i=1}^m p_{ik} x_i \quad (10)$$

制約式

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} x_{ij} \lambda_{Bj} + \sum_{j=n''+1}^{n'''} x_{ij} \lambda_{Cj} \leq x_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m'), \quad (11)$$

$$x_{ik} \leq x_i, \quad (i = m'+1, \dots, m), \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} y_{rj} \lambda_{Bj} \geq y_{rk}, \quad (r = 1, 2, \dots, s), \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{n'} \lambda_{Aj} = z_A, \quad (14)$$

$$\sum_{j=n'+1}^{n''} \lambda_{Bj} = z_B, \quad (15)$$

$$\sum_{j=n''+1}^{n'''} \lambda_{Cj} = z_C, \quad (16)$$

$$x_i \geq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (17)$$

$$z_A + z_B + z_C = 1, \quad (18)$$

$$\lambda_{Aj} \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n'), \quad (19)$$

$$\lambda_{Bj} \geq 0, \quad (j = n'+1, \dots, n''), \quad (20)$$

$$\lambda_{Cj} \geq 0, \quad (j = n''+1, \dots, n'''), \quad (21)$$

$$z_A, z_B, z_C = 0 \text{ or } 1. \quad (22)$$

ここで、 $i$  は入力変数の種類を示すサフィックス ( $i = 1, 2, \dots, m'$  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),  $r$  は出力変数の種類を示すサフィックス ( $r = 1, 2, \dots, s$ ),  $A, B, C$  は所属グループ,  $j$  は都市 ( $j = 1, 2, \dots, n'$  まではグループ A (私的交通依存型都市群),  $j = n'+1, \dots, n''$  まではグループ B (公共交通依存型都市群),  $j = n''+1, \dots, n'''$  まではグループ C (私的・公共交通調和型都市群) に所属,  $j = n'''+1, \dots, n$  までは途上国都市

(フロンティア形成不能都市群)に所属),  $c_{kl}$ は1人当たりの交通エネルギー消費量,  $x_{ij}$ 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効率 (コスト変数),  $y_{ij}$ 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, 与えられたエネルギー効率に沿ってエネルギー消費が最小になるように決められる.  $\lambda_{Aj}$ ,  $\lambda_{Bj}$ ,  $\lambda_{Cj}$  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のバイナリ変数を意味する.

この混合整数計画問題は, 以下の列挙法により, 線形計画問題により解くことが可能である.

#### [STEP:1]

$z_A=1, z_B$  and  $z_C=0$ として (グループAの都市群のみの存在を仮定して), 都市 $k$ の最適目的関数値 $c_{kA}$ を求める. この線形計画問題に可能解がなければ,  $c_{kA}=\infty$ とする.

#### [STEP:2]

$z_B=1, z_A$  and  $z_C=0$ として (グループBの都市群のみの存在を仮定して), 都市 $k$ の最適目的関数値 $c_{kB}$ を求める. この線形計画問題に可能解がなければ,  $c_{kB}=\infty$ とする.

#### [STEP:3]

$z_C=1, z_A$  and  $z_B=0$ として (グループCの都市群のみの存在を仮定して), 都市 $k$ の最適目的関数値を $c_{kC}$ を求める. この線形計画問題に可能解がなければ,  $c_{kC}=\infty$ とする.

#### [STEP:4]

都市 $k$ の最適関数値を $c_k^*=\min\{c_{kA}, c_{kB}, c_{kC}\}$ により定める.

つまり, まず各都市は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生産フロンティアに基づいて最適解を探索する. そして次に, 得られた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生産フロンティアをもとにベンチマークを設定することになる.

以上のEE modelの概念図を図-2に示している.

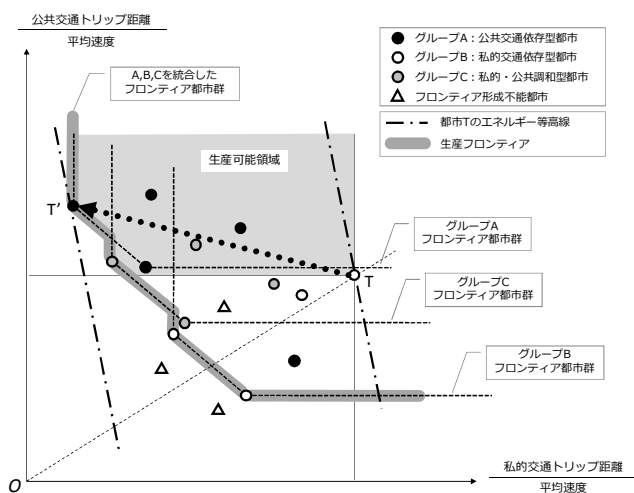


図-2 環境効率性モデルの概念図

$T$  都市が以下のようにプロットされ,  $T$  都市のエネルギー等高線が図-2 の一点鎖線で表される場合,  $T$  都市のエネルギー最適化状態は  $T$  都市と一致するため,  $T$ ,  $T'$  両都市のエネルギー消費量の比を環境効率性として算出する.

## 5. 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-4). 表-4 において, 網掛けをしている都市は環境効率性が 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-4 都市交通システムの環境効率性評価

|                 | 都市           | 環境<br>効率性 | エネルギー消費[MJ/人] |                                       | 参照集合 (括弧内の数字は入の値)                     |
|-----------------|--------------|-----------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                 |              |           | 観測値           | 理想値                                   |                                       |
| 私的<br>交通依<br>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) |
|                 | Bangkok      | 0.490     | 29959         | 14684                                 | Hong Kong (1.000)                     |
| 途上国都市           | 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) |

表-4 より, 公共交通依存型都市の参照集合である Copenhagen や 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おり, その優位性が確認できる. これらの都市は図-3 に示すようにネットワークが放射型で, かつ都市中心部は高密度な公共交通網が発展しているため, 通勤手段分担率 43%と私的交通利用が抑えられており, 更に, 各交通機関のエネルギー効率が優れているため効率的と評価され



たものと考えられ、多くの都市において両都市のような公共交通利用の促進が重要であることが確認できる結果となっている。

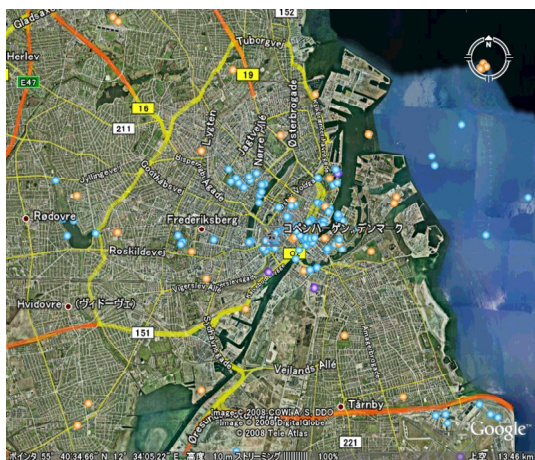


図-3 公共交通依存型都市の参照集合 (Copenhagen) の公共交通網

出典：Google Earth™ 地図サービス

一方、自動車依存型都市では、Denver 及び Sacramento が参照集合として設定されている。これらの都市については、図4 に示すようにネットワークが格子型で、エネルギー消費自体は他都市と比較して多いものの、平均旅行速度 56km/h という、高いモビリティが確保されているため、環境効率性が高い結果となっているものと考えられる。また、多くの私的交通依存型都市は、両都市を参照集合として設定していることから、私的交通利用が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。以上の結果より、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ものと考えられる。

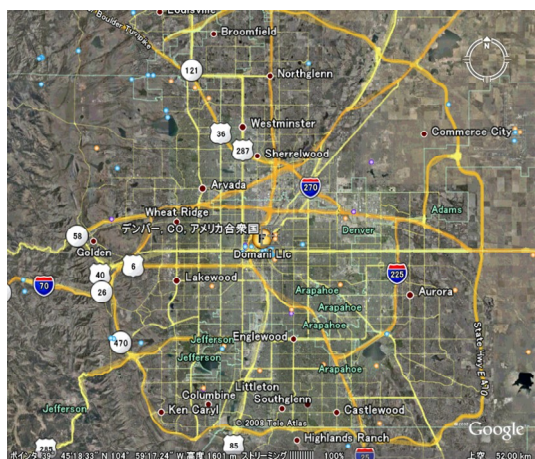


図-4 私的交通依存型都市の参照集合 (Denver) の道路網

出典：Google Earth™ 地図サービス

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できていることが確認できる。

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。これは、これらの都市はそれぞれのクラスター内では最も効率的だが、他のクラスターの都市を所属することで潜在的にエネルギー消費構造の更なる改善が期待できることを示唆する。

## 6. 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コスト効率モデルに基づく EE model を開発した。更に、提案した EE model 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。算出結果からは各都市の特性に応じた参照都市の設定が確認できた。本モデルは現実的な環境負荷目標設定が可能になるような工夫を施しており、本モデルで得られる目標設定は、実効性の高い環境施策立案のための基本情報としての活用を想定している。

今後の課題としてまず挙げられるのは、より充実したデータセットの必要性である。今回使用した 46 都市データに関しては、特に途上国都市においてデータの欠損が多く、モデル内で使用することができない指標に大きく制限がかかることとなった。今後は充実したデータセットのもとで効率性算出のための指標の精緻化を図っていく必要がある。また、モデル式の改良の余地として、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各交通手段のエネルギー効率（輸送人キロ当たりのエネルギー消費量[MJ/人 km]）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。

また、上記の課題とも関連するが、使用するデータの選択によって、効率性が示す意味は異なる。例えば本研究の場合は、公共交通へのモダリティシフトや燃費改善の必要性など、本研究で使用したデータに関連する視点での環境施策の方向性へと議論を発展させることが可能であるものと考えられるが、想定する施策の方向性によって選択する変数を再度検討する必要がある。

本研究で開発した EE model は単なる都市交通の環境診断にとどまらず、各都市における環境施策の効果予測

など、シミュレーション分析としての活用においても有用なツールになる可能性を秘めているものと考えている。現状ではデータ収録状況の関係で 1990 年時点の分析に留まっているが、今後も継続して環境効率性の推移について観察を続けていくことの意義は大きいものとする。

#### 参考文献

- 1) Verfaillie, H.A., Bidwell, R.: Measuring Eco-Efficiency: a Guide to Reporting Company Performance, World Business Council for Sustainable Development: Geneva, 2000.
- 2) Newman, P. and Kenworthy, J.: Sustainability and Cities – Overcoming Automobile Dependence, Island Press, 1999.
- 3) Kenworthy, J.R., and Laube, F.B.: An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities 1960-1990, University Press of Colorado, 1999.
- 4) Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E.: Measuring efficiency of decision making units, European Journals of Operational Research, Vol.2, pp.429-444, 1978.
- 5) Ramanathan, R. and Parikh, J.K.: Transport sector in India: an analysis in the context of sustainable development, Transport Policy, Vol.6, pp.35-45, 1999.
- 6) Andre, M. and Hammarstrom, U.: Driving speed in Europe for pollutant emissions estimation, Transportation Research Part D, Vol.5, pp.321-335, 2000.
- 7) Frank, L.D., Jr. B.S., Bachman, W.: Linking land use with household vehicle emissions in the central Puget sound: methodological framework and findings, Transportation Research Part D, Vol.5, pp.173-196, 2000.
- 8) 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.
- 9) Feng, T., Zhang, J., and Fujiwara, A.: 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, 2007.
- 10) McMullen, B.S. and Noh, D.W.: 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, 2006.
- 11) 国土交通省総合政策局：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），2007.
- 12) Farrell, M.J.: The measurement of productive efficiency, Journal of the Royal Statistical Society (Series A), No.120, pp.253-281, 1957.
- 13) 刀根薫：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, 1993.
- 14) Lin, L. and Tseng, L.: Application of DEA and SFA on the measurement of operating efficiencies for 27 international container ports, Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp.592-607, 2005.

---

## 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\*

吉野大介\*\*・藤原章正\*\*\*・張峻屹\*\*\*\*

先進国・途上国ともに持続可能性の観点から環境負荷削減とモビリティの維持向上の両立が求められる中、本研究ではWBCSDが提案したEco-efficiencyを応用して都市交通システムの環境効率性評価モデルの構築を行う。構築するモデルはDEA（データ包絡分析法）を基本としており、都市交通システムの多様性をモデル内で考慮することができる点が特徴的である。また、モデル内で公共交通依存型都市、私的交通依存型都市、私的・公共交通調和型都市別にベンチマークを設定することで、算出される評価指標に実効性を持たせることを可能とした。

---

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

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

This study attempts to apply the concept of “Eco-efficiency” proposed by WBCSD to solve a dilemma between urban mobility and environmental load in developed and developing cities over the world. Environmental efficiency model based on DEA (Data Envelopment Analysis) is developed to measure the level of environmental efficiency in urban transportation systems by considering the heterogeneity inherent in cities. The model can find the frontier cities by referring the sets of public transport-oriented, private transport-oriented and balanced cities. Consequently, it was found that the proposed method leads to a reasonable and feasible goal of transport energy consumption in each city.

---