

DEAを応用した運輸部門におけるCO₂削減可能量の推定及び削減対策の検討*

Potential Reduction of CO₂ Emissions in Transport Sector and Its Countermeasures Based on DEA*

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地球温暖化問題への対応として、昨今では国家レベルのみならず、地方公共団体レベルでも自主的かつ積極的な対策が必要とされている。CO₂に代表される温室効果ガス削減に向けた、実効性の高い施策案の具現化のためには、各主体における数値目標の設定が重要であり、「地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る実行計画策定マニュアル及び温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン（環境省地球環境局、平成19年3月）」¹⁾においても、実行計画で達成すべき目標設定の重要性について述べられている。しかし、数値目標の設定方法については手法が確立していない状況にある。

平成21年度環境白書²⁾によると、我が国における二酸化炭素の排出量のうち、運輸部門は全体の約17%を占めており、これは産業部門（約38%）に次いで多い。しかし産業部門に関しては、様々な省エネルギー対策技術の導入など取組が進んでおり、基準年である1990年との比較では-2.3%と、排出量は減少しているのに対し、運輸部門に関しては、基準年と比較して+14.6%と増加している。また、運輸部門からの排出量のうち約9割が自動車からの排出となっていることから、人流・物流を含め、陸上輸送からのCO₂削減が急務となっていることが伺える。

各自治体における運輸部門の環境負荷削減目標及び削減対策の検討に際しては、それぞれの自然的社会的条件を踏まえた上で、持続可能性の観点から物流・人流におけるモビリティの維持向上と環境負荷低減のバランスを考慮する必要がある。その点でYoshino et al. (2010)³⁾が提案したDEA（データ包絡分析: Data Envelopment Analysis）に基づくEnvironmental efficiency index（環境

効率性指標）は、各都市の都市・交通特性を鑑み、各都市の身の丈に合った実効性の高い環境負荷削減目標を設定することが可能であることから、この方法論は基礎自治体における環境負荷削減目標の設定に対しても応用が可能であるものと考えた。

本研究では、ケーススタディーとして中国地方を例に、DEAに基づく環境効率性指標を用いた、基礎自治体の運輸部門におけるCO₂排出削減目標量の設定方法を提案する。また、同手法を応用し、自治体別のCO₂削減に向けた効果的な施策の方向性検討を併せて行う。

2. 既往研究のレビュー

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環境効率性の概念は、Senbil et al. (2005)⁴⁾等の研究で採用されており、彼らはSFA（確率的フロンティア分析: Stochastic Frontier Analysis）を使用して環境効率性を算出し、それをもとに各都市の環境削減ポテンシャルを評価している。吉野ら(2006)⁵⁾やFeng et al.(2007)⁶⁾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試みている。これらの評価事例は、今までなされてこなかった環境負荷量と交通利便性を同時に評価している点で新しい。しかし、これらの研究例では、使用モデルの構造上の制限により、分析対象都市の都市・交通形態の多様性や、環境効率性から導出される施策案の実効性が十分に考慮されないという問題を残していた。

前述のYoshino et al. (2010)が開発した環境効率性評価モデルは、DEAをベースモデルとして使用することで、これらの問題の解消を試みており、開発したモデルを使用して先進国・途上国を含む世界46都市の運輸部門のエネルギー消費構造の評価を行っている。本研究では、DEAに基づく環境効率性評価モデルのフレームワークをベースに、基礎自治体の運輸部門CO₂削減目標の設定及び今後の環境対策案の検討が可能となるように環境効率性評価モデルの定式化を行った。

*キーワード：地球環境問題，総合交通計画

**正員，修（工），復建調査設計(株) 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）

3. 環境効率性評価モデル

(1) DEAについて

DEAはCharnes et al. (1978)⁷⁾によって経営分析手法の一つとして開発され、計算の容易性、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。

DEAの特徴として、以下の点が挙げられる。

- ①生産活動における出力データと入力データの比により効率性を計測
- ②最も優れた事業体をもとに生産フロンティアを計測し、これをベンチマークとした相対比較
- ③入力データ・出力データともに複数項目利用可能
- ④データの単位（貨幣ベース、数量ベースなど）の制約を受けない
- ⑤相対評価のため、優れた事業体と比較し、「どの部分」が「どの程度」劣るか定量化することが可能
- ⑥各事業体に対して定量的な改善策の提示が可能
- ⑦複数のデータを扱う際のパラメータ（ウェイト値）を内生的に決定するノンパラメトリック手法であり、重みづけの恣意性を排除
- ⑧扱うことができる事業体に制約はなく、汎用性が高い

(2) 環境効率性評価モデルの構築

a) 変数の設定

評価モデルに適用する出力変数に関しては、1人当たり運輸部門CO₂排出量 (kg-CO₂/人) を適用する。ただし、DEAは出力最大化を目指す構造であるため、原則として、出力変数については値が大きい方が望ましい指標を採用することになっている。そのため、刀根(1994)⁸⁾を参考に、以下の式を用いて順位逆転させた数値を出力変数としてモデルに適用した。

$$\hat{y} = 2\mu - y \quad (1)$$

ここで、 \hat{y} は順位逆転させた出力変数、 y は観測された出力変数、 μ は y の最大値と最小値の平均値である。

入力変数に関しては、原則として値が小さいほうが望ましく、かつ出力変数と正の相関を有する値を選定することになっているため、環境負荷要因を入力変数とする。今回は入力変数を環境負荷軽減のための政策変数として使用することを想定し、最終的に表-1の変数を選定した。なお、貨物車平均輸送トン数に関しては、値が大きい方が物流効率化の観点では望ましいものと考え、出力変数と同様に順位逆転させた数値を適用している。

表-1 入力変数リスト

	入力変数	出典
1	自動車保有台数(台/世帯)	民力2008
2	自動車分担率(%)	H12国勢調査
3	【順位逆転】 貨物車平均輸送トン数(トン/台)	H17道路交通センサス
4	1人当たり渋滞損失時間(時間/年)	H18年度渋滞損失確定値

b) 市町村別運輸部門CO₂排出量の推計方法

既存統計資料において、市町村別自動車部門（旅客及び貨物）からのCO₂排出量が整理されていないため、松橋ら(2004)⁹⁾¹⁰⁾が提案するOD調査データに基づく自動車起因の排出量推計手法を用いた。

OD調査は、道路交通センサスの一環として行われる自動車の使い方に関するサンプル調査であり、旅客及び貨物の自動車の動きを平日・休日別に把握することが可能である。まず、OD調査のオーナーマスターデータから車種別走行台キロを出発地となる市町村別に集計し、表-2に示す車種別排出係数を乗じてCO₂排出量を推計した。集計方法に関しては、出発地以外にも、目的地、通過地、給油地別などで集計が可能であるが、本研究では、居住者や地元企業の保有車両を対象とする政策評価に適している出発地集計を採用した。なお、表-2の排出係数は、地方運輸局別に車種別走行キロ燃費に車種別燃料構成比の重みづけをした燃料種別CO₂排出係数を乗じて求めている。

表-2 OD調査CO₂排出係数(中国運輸局管内)

車種	(g-CO ₂ /台km) 原単位
軽乗用車	208
乗用車	267
バス	800
軽貨物車	213
小型貨物車	271
貨客車	271
普通貨物車	655
特殊車	655

表-3 CO₂排出量算出のための各指標の出典

	指標	出典
1	車種別走行台キロ	H17道路交通センサス
2	車種別走行キロ燃費	H19年度交通関係エネルギー要覧
3	車種別燃費構成比	H20年度自動車輸送統計年報
4	燃料種別CO ₂ 排出係数	H14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会エネルギー工業プロセス分科会報告書(燃料)

c) 制約条件の設定

各自治体において、都市形態や交通施策の方向性は様々であるが、従来型のDEAモデル（DEA-CCRモデル等）を用いて環境効率性を評価した場合、異なる都市特性を有する自治体の組み合わせによって、ある自治体の

参照集合が形成される際に、その折衷案をその自治体の改善案とみなすことになる。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自治体を折衷させて参照するという事は、現実的には考えにくい。そのため、従来型のDEAのように、全ての自治体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陥る可能性がある。

この解決策として、Yoshinoらのモデルでは、フロンティアの形成の際に、異なる都市特性を有するサンプル間に凸の生産可能性を成立させないという制約条件をモデル内に導入しており、本研究でもこの手法を導入する。この手法は、どのようなタイプの自治体であっても、その自治体の特性に適した自治体群を参照集合に設定することが可能であるが、フロンティアを形成する際の参照集合の組み合わせは、同じタイプの自治体を設定する手法であり、本手法の導入により、得られる改善案の実効性が改善することが確認されている³⁾。なお、自治体のグループ分けに関しては、効率性評価を行う前に、分析者がアприオリに与える必要がある。

以上で説明した制約条件を踏まえた環境効率性評価モデルの概念図（簡略化のため2入力1出力の場合）を図-1に示している。自治体Aが以下のようにプロットされる場合、従来のDEA-CCRモデルでは OA'/OA によって環境効率性を算出し、自治体 A_2 と B_2 がAにとっての参照集合（Aが今後効率化を進める上でのベンチマーク）となる。しかし、 A_2 と B_2 はクラスター分析によって設定される所属グループが異なるため、都市構造が大きく異なる。そのため、両者の折衷案は現実的なものにならない可能性がある。

本研究のように、両グループ間に凸の生産可能性を仮定しない場合は、 OA'/OA によって環境効率性を算出することになり、Aにとっての参照集合は B_1 と B_2 になる。ここで、 B_1 と B_2 は同じグループに属しているため、両者の折衷案によって得られるAの改善案は、従来のDEAによって得られる改善案よりも実効性が高いものと考えられる。

環境効率性計測に先立って自治体のクラスタリングにあたっては、恣意性を出来る限り排除するため、ユークリッド平方距離を用いたクラスタリングを採用した。変数にはDID人口比率(%)と道路密度(m/km^2)を使用することで、都市・交通のコンパクト性の観点からクラスタリングを行い、表-4の通り市町村を4つに分類した。

表-4に示すクラスターの統計量より、クラスター1はDID地区が存在しないコンパクト性が低い自治体、クラスター2はDID人口比率・道路密度ともに低いコンパクト性が比較的低い自治体、クラスター4はDID人口比率、道路密度共に高く、コンパクト性が高い自治体であり、広島県内の4自治体のみが所属している。クラ

スター3はクラスター2と4の中間程度の自治体群であると判断した。

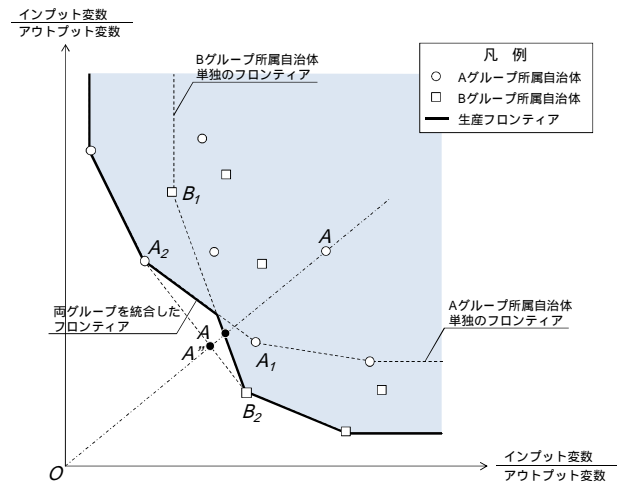


図-1 環境効率性評価モデルの概念図

表-4 クラスタ分析結果

変数	クラスター1	クラスター2	クラスター3	クラスター4
DID人口比率(%)	0.0	25.2	54.6	92.5
道路密度(m/km^2)	646.5	669.3	817.2	946.8
所属都市数	62 都市	20 都市	21 都市	4 都市
所属都市 (例)	岩美町(鳥取) 大田市(鳥根) 備前市(岡山) 安芸高田市(広島) 長門市(山口)	倉吉市(鳥取) 浜田市(鳥根) 津山市(岡山) 三次市(広島) 萩市(山口)	鳥取市(鳥取) 松江市(鳥根) 岡山市(岡山) 呉市(広島) 下関市(山口)	広島市(広島) 大竹市(広島) 府中町(広島) 海田町(広島)

d) 環境効率性評価モデルの定式化

自治体 k における環境効率性を求めるモデルは、以下の混合整数型問題として定式化できる。

目的関数

$$\text{Min } \theta \tag{2}$$

制約式

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n x_{ij} \lambda_{Bj} \leq \theta x_{ik}, \tag{3}$$

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

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n y_{rj} \lambda_{Bj} \geq y_{rk}, \tag{4}$$

($r = 1, 2, \dots, s$),

$$\sum_{j=1}^{n'} \lambda_{Aj} = z_A, \tag{5}$$

$$\sum_{j=n'+1}^n \lambda_{Bj} = z_B, \tag{6}$$

$$z_A + z_B = 1, \tag{7}$$

$$\lambda_{Aj} \geq 0, \tag{8}$$

($j = 1, 2, \dots, n'$),

$$\lambda_{Bj} \geq 0, \tag{9}$$

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

$$z_A, z_B = 0 \text{ or } 1. \quad (10)$$

ここで、 i は入力変数の種類($i=1,2,\dots,m$)、 r は出力変数の種類($r=1,2,\dots,s$)、 A 、 B はクラスター分析によって設定する所属グループ、 j は自治体($j=1,2,\dots,n'$ まではグループA、 $j=n'+1,\dots,n$ まではグループBに所属)、 x_{ij} は自治体 j の i 番目の観測された入力変数の値、 y_{rj} は観測された出力変数の値である。 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。なお、ここではモデル式の簡略化のために自治体をA・Bの2グループに分類した場合のモデル式を記載したが、3グループ以上の場合も、バイナリ変数を増やすことで同様に定式化できる。

式(2)~(10)において、最適解 λ^* のもとでの目的関数値を θ^* とすると、 $\theta^*=1$ のとき、自治体 k は効率的であり、 $\theta^*<1$ のとき、自治体 k は非効率的である。ただし、 $\theta^*=1$ の場合でも、スラックと呼ばれる余剰分が発生する可能性がある。本研究では効率値とスラックを活用して今後の環境施策の方向性を検討するため、スラックについても算出する必要がある。

入力 i に対する余剰(d_i^x)と出力 r に対する不足(d_r^y)はそれぞれ、式(11)~(12)の通り定式化できる。

$$d_i^x = \theta x_{ik} - \sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n x_{ij} \lambda_{Bj}, \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (11)$$

$$d_r^y = \sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n y_{rj} \lambda_{Bj} - y_{rk}, \quad (r=1,2,\dots,s), \quad (12)$$

d_i^x と d_r^y は、下式を解くことによって求められる。

目的関数

$$\text{Max} \quad \sum_{i=1}^m d_i^x + \sum_{r=1}^s d_r^y \quad (13)$$

制約式

$$\sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n x_{ij} \lambda_{Bj} + d_i^x = \theta^* x_{ik}, \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^n y_{rj} \lambda_{Bj} - d_r^y = y_{rk}, \quad (r=1,2,\dots,s), \quad (15)$$

$$\lambda_{Aj} \geq 0, \quad (j=1,2,\dots,n'), \quad (16)$$

$$\lambda_{Bj} \geq 0, \quad (j=n'+1,\dots,n), \quad (17)$$

$$d_i^x \geq 0, \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (18)$$

$$d_r^y \geq 0, \quad (r=1,2,\dots,s), \quad (19)$$

なお、 θ^* は式(2)の最小化問題により得られる目的関数の最適解を示す。

4. 分析結果

(1) CO₂削減可能量の算出

次頁図-2に環境効率性モデルの分析結果を示す。図-2において、円の大きさは各自治体における現況の運輸部門からの1人当たりCO₂排出量(kg-CO₂/人)を示しており、そのうち塗りつぶし部分は余剰排出されているCO₂の量(効率化によって削減可能な量)、斜線ハッチング部分は目標排出量(これ以上は削減不可能な量)をそれぞれ意味しており、現状のCO₂排出量に対する目標排出量の比率が環境効率性 θ^* である。

結果より、山陽側と比較して山陰側の地区で環境効率性が高い傾向にある。また、庄原市・三次市などの中山間部に立地する自治体では、全体的に環境効率性が低く、CO₂削減の余地が大きくなる傾向が確認できる。

また、表-5にフロンティア(環境効率性=1)になった自治体リストを掲載している。表中の参照先都市数は、その自治体をベンチマーク(参照集合)に設定している都市数を示している。府中町(広島市)はクラスター4に所属する以外にも60もの自治体から参照されており、環境効率性の面では先駆的な自治体であると評価される結果となった。

表-5 フロンティア自治体リスト

クラスター1		クラスター2	
フロンティア	参照先都市数	フロンティア	参照先都市数
三朝町 (鳥取県)	4	該当なし	
北栄町 (鳥取県)	1		
南部町 (鳥取県)	2		
伯耆町 (鳥取県)	2		
日南町 (鳥取県)	2		
川本町 (島根県)	9		
江田島市 (広島県)	33		
上関町 (山口県)	16		
美東町 (山口県)	1		
阿武町 (山口県)	15		
阿東町 (山口県)	9		
クラスター3		クラスター4	
フロンティア	参照先都市数	フロンティア	参照先都市数
境港市 (鳥取県)	1	大竹市 (広島県)	7
坂町 (広島県)	1	府中町 (広島県)	60

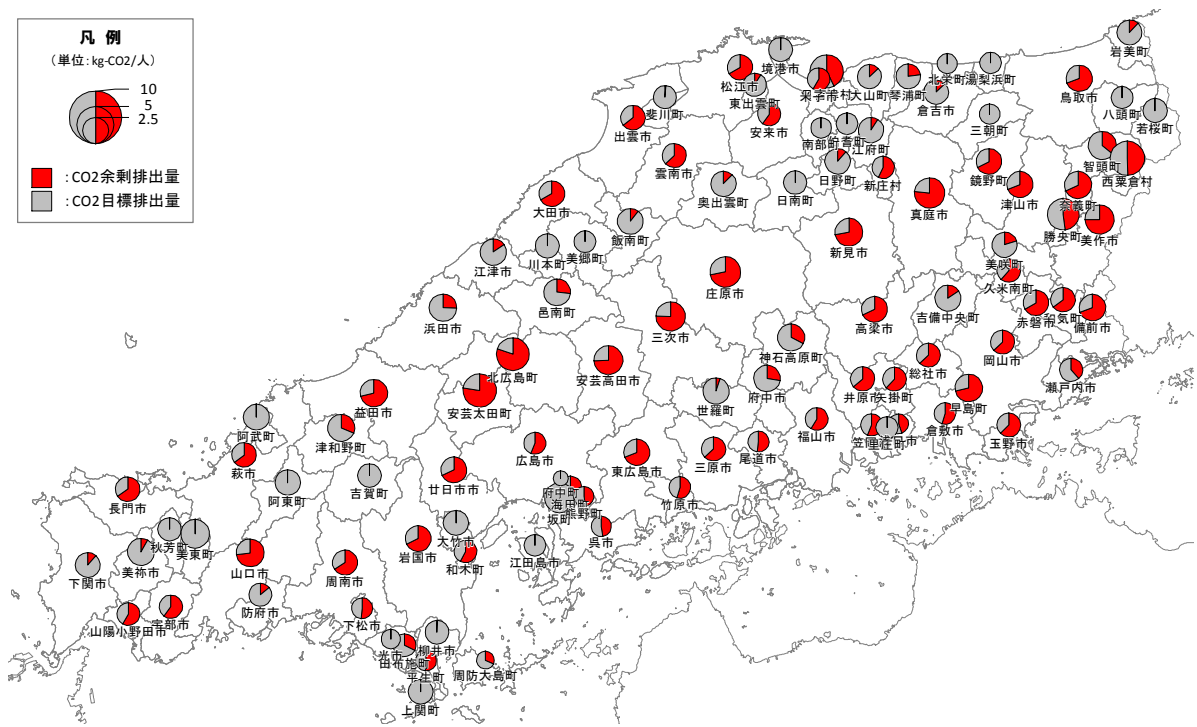
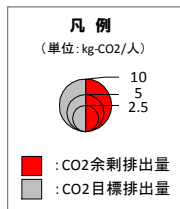


図-2 CO₂削減可能量

(2) スラック変数を活用した改善案の検討

次に、(1)の結果を踏まえ、各自治体において今後どのような環境施策を推進していくことが効果的であるか検証する。構築した環境効率性評価モデルは、効率値とスラックを活用することで、モデル内で使用した入力変数のうち、どの部分に改善の余地があるかを定量化することが可能である。例として、図-3に広島市における改善案をそれぞれ示す。グラフ内の数値は、現況の各入力変数値と最適化(効率化)した場合の値の比を示している。

広島市においては、自動車保有状況や自動車分担率について見ると評価が高い。ここで、もし自動車保有状況について評価が低い場合は、相乗り・カーシェアリングの推進など、各世帯の自動車保有数を削減する施策の推進が効果的である。また、自動車分担率の面で評価が低い場合は、公共交通機関へのモーダルシフトやそのための基盤整備、モビリティ・マネジメントによる自動車利用抑制策などが効果的であると考えられる。広島市においては、他の自治体と比較して公共交通が発達しており、自動車交通への依存が比較的低いことから、市民行動レベルでの環境負荷削減対策はある程度図られていることが確認できる。

一方、広島市においては、平均輸送トン数について評価が低い結果となっていることから、今後は貨物の共同輸配送の促進など、貨物車1台当たりの積載量を増やす施策が有効である。また、渋滞損失時間の面においても評価が低いことから、渋滞の深刻化が環境に対して悪影響を及ぼしている可能性が示唆される。そのため、交差

点改良・新規道路整備などの各種ハード整備の推進も併せて必要であると考えられる。

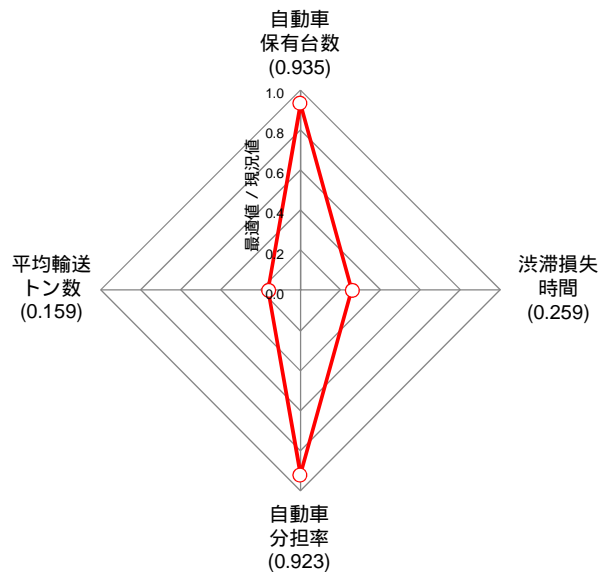


図-3 広島市の改善案

5. おわりに

本研究では、基礎自治体における運輸部門のCO₂排出削減目標設定及び今後の施策立案の方向性検討のために環境効率性評価モデルの定式化を行った。その結果、各自治体の都市・交通特性に応じた削減目標及び目標に向けての重点施策の把握が可能になった。今後は説明変数の精査やモデル構造の推敲を進める必要がある。

市町村別CO₂排出量の算定にあたっては、本研究では出発地集計による推計を行ったが、例えば、通勤・レジャー等の来客を対象とする政策評価の場合は目的地集計が望ましく、ロードプライシングや通行規制等の道路からの排出抑制を推進する政策評価の場合は通過地集計が望ましい。よって今後は、想定する施策に応じて集計方法を見直す必要がある。更に、船舶や鉄道なども含めた、総合的な政策を検討する際には、パーソントリップ調査や物流センサス、港湾統計等の使用も検討すべきであり、CO₂排出量の推計に使用するデータの選定・データの集計方法に関しては今後引き続き検討が必要である。

本手法は、運輸部門に留まらず、各自治体の総合的な環境負荷削減目標の設定および施策検討への展開に向けて有用なツールとしての可能性も秘めているものと考えており、今後も継続して研究を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 環境省地球環境局：地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る実行計画策定マニュアル及び温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン，2007.
- 2) 環境省：平成 21 年度版環境・循環型社会・生物多様性白書—地球環境の健全な一部となる経済への転換，2009.
- 3) Yoshino, D., Fujiwara, A. and Zhang, J.: Environmental efficiency model based on data envelopment analysis and its application to environmentally sustainable transport policies, Compendium of Papers CD-ROM, *the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., January 10-14, CD-ROM, 2010.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 刀根薫：経営効率性の測定と改善，日科技連，1993.
- 9) 松橋啓介，工藤祐輝，上岡直見：市町村における運輸部門温室効果ガス排出量推計手法の開発及び要因分析，環境省研究地球環境局研究調査室・環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書，2004.
- 10) 松橋啓介，工藤祐輝，上岡直見，森口祐一：市町村の運輸部門CO₂排出量の推計手法に関する比較研究，環境システム研究論文集，Vol.32, pp.235-242, 2004.