

# 包絡分析法を用いた都市交通インフラシステムの効率評価に関する研究\*

Comprehensive Evaluation of Transportation Infrastructure Systems Efficiency using Data Envelopment Analysis \*

劉 志綱<sup>\*\*</sup>・チュムチョク<sup>\*\*\*</sup>・岸 邦宏<sup>\*\*\*\*</sup>・佐藤 馨一<sup>\*\*\*\*\*</sup>

By Zhigang LIU・Chuchoke NANTHAWICHIT・Kunihiro KISHI・Keiichi SATOH

## 1. はじめに

交通インフラは、経済活動を支え、人々の生活を豊かにするための基盤であり、従来から着実にその充実が図られてきた。しかしながら、国及び地方公共団体の長期債務は膨大な額に達しており、交通需要の伸び悩みや減少、過度の車依存交通による深刻化する大気汚染や温暖化などの地球環境問題が顕在化してきた。このような中で、環境をはじめ、安全性、交通整備など総合的な評価基準を考慮した効率的な都市交通インフラシステムが求められている<sup>1)</sup>。

本研究では企業の経営活動の評価に用いられる包絡分析法(DEA)を適用し、企業様々な要因から都市交通インフラシステムを効率性という観点で評価することを目的とした。すなわち環境負荷、交通事故、交通整備度、そしてモビリティの項目から都市交通インフラシステムの効率性を評価するものである。

## 2. 包絡分析法 (DEA) の基本概念<sup>2)</sup>

### (1) DEA の概要

包絡分析法 (Data Envelopment Analysis: DEA) は、事業体において入力 (投入) から出力 (産出) を得る変換過程を見て、その変換過程の効率性を測定するための手法である。評価対象の事業体は DEA では意思決定者 (Decision Making Unit: DMU) とされ、DMU の効率性を測定するために (産出 / 投入) という比率尺度を用いる。そして同様の投入と産出

を持つ事業体が複数個ある場合、その比率尺度の大小によってそれらの相対比較を行うことが可能である。

### (2) CCR モデル

包絡分析法の最も基本的なモデルとして、CCR (Charnes Cooper Rhodes) モデルがある。概要は以下の通りである。

n 個の DMU があり、m 個の入力と s 個の出力があるとき、仮想的入力、仮想的出力をそれぞれ

$$\text{仮想的入力} = 1 \times \text{入力} 1 + 2 \times \text{入力} 2 + \dots + m \times \text{入力} m$$

$$\text{仮想的出力} = u_1 \times \text{出力} 1 + u_2 \times \text{出力} 2 + \dots + u_s \times \text{出力} s$$

とし、各 DMU に有利になるように入力、出力にウェイトを付ける。ただし、効率は仮想的出力 / 仮想的入力で表し、最大で 1 になるように、またウェイトは負の値を取らないようにする。分数計画問題に定式化すると次の式となる。

目的関数

$$\max \theta = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} \quad (1)$$

制約式

$$\frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} \leq 1 (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \quad (3)$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \quad (4)$$

ここから求まる最適解を ( $\theta^*$ ,  $u^*$ ) とし、目的関数を  $\theta^*$  とするとき

$\theta^* = 1$  ならば DMU<sub>o</sub> は D 効率的

$\theta^* < 1$  ならば DMU<sub>o</sub> は D 非効率的であるという。

また、の個々の値により投入全体の中の各入力項

\*キーワード: 交通インフラシステム、包絡分析法、効率評価

\*\*正 会 員、博(工)、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目、TEL 011-706-6822、FAX 011-706-6216)

\*\*正 会 員、博(工)、TransConsult Co., Ltd (Silom, Bangkok, Thailand、TEL +66-2-266-6353)

\*\*\*正 会 員、博(工)、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目、TEL 011-706-6864、FAX 011-706-6216)

\*\*\*\*フェロー、工博、北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目、TEL 011-706-6209、FAX 011-706-6216)

目の比重がわかり、これを加重入力値という。同様に の値を加重出力値という。加重入出力値により、DMU が得意としている項目を把握できる。

(3) Inverse DEA モデル

CCR モデルが分析対象に有利なウェイトを付けるのに対し、Inverse DEA はもっとも不利なウェイト付けを行って効率を評価するモデルである。分数計画問題に定式化すると次式の通りである。

目的関数

$$\min Z_o = \frac{u_1 y_{1o} + u_2 y_{2o} + \dots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + v_2 x_{2o} + \dots + v_m x_{mo}} \quad (5)$$

制約式

$$\frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \dots + v_m x_{mj}} \geq 1 (j = 1, \dots, n) \quad (6)$$

$$v_1, v_2, \dots, v_m \geq 0 \quad (7)$$

$$u_1, u_2, \dots, u_s \geq 0 \quad (8)$$

Inverse DEA では L 効率値が評価指標となっている。この L 効率値が 0 のとき L 効率的といい、0 以外するとき L 効率的という。Inverse DEA を用いることにより、CCR モデルだけでは判らなかった新たな観点からの情報を知ることができる。

3. 交通インフラシステムの効率評価手法

(1) 入力と出力の設定

包絡分析法( DEA )の分析結果は入力項目と出力項目の選定に頼っており、慎重に考える必要がある。本研究では、表 1 に示すように、3 種類の入力～出力の組み合わせを設定し、それぞれの交通インフラシステムの評価を行った。評価にあたって、以下のように、5 つの評価項目について検討し、これらの要素を示すデータとしてそれぞれ定義し、集計を行った。

- 1) 道路の整備度: 都市内の市道以上レベルの道路延長である。
- 2) 鉄道の整備度: 都市内の全ての軌道系システム ( JR、地下鉄、モノレール、LRT、路面電車など ) の駅数である。
- 3) 安全性: 年間の交通事故の死傷者数である。
- 4) 環境負荷: 交通部門による二酸化炭素 ( CO2 ) の排出量である。

5) モビリティ

- ・ ((各交通モードの平均速度) × (各交通モードのトリップ数) )
- ・ (各交通モードのトリップ数)

表 1 入力と出力の組み合わせ

入力～出力項目	CASE1	CASE2	CASE3
入力			
道路の整備度			
鉄道の整備度			
安全性			
環境負荷			
出力			
1/安全性			
1/環境負荷			
モビリティ-			
モビリティ-			

(2) 研究対象

本研究は 19 の都市を対象として、都市交通インフラシステムを評価した。これらの都市は 2 つのグループに分けることができる ( 図 1 )。

- 1) 大都市: 札幌市、横浜市、川崎市、名古屋市、京都市、福岡市、北九州市、仙台市、千葉市、広島市。
- 2) 中小都市 ( 北海道 ): 小樽市、当別町、江別市、北広島市、恵庭市、千歳市、旭川市、函館市、釧路市。

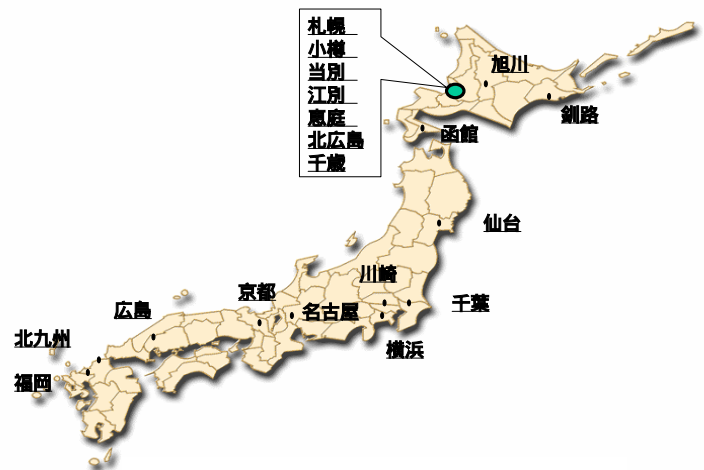


図 1 評価対象都市

(3) 入力と出力の加工データ

3. (1) の定義によって、表 2 の加工データを作成した。ただし、道路の延長、人口、交通事故死傷者数のデータは「大都市比較統計年表/平成 7 年」により、各交通モードのトリップ数のデータは「都市圏パーソントリップ調査データ集/平成 5 年」と「第 3 回道央都市圏パーソントリップ調査報告書/平成 6 年」により、自動車の平均速度のデータは平成 9 年「道路交通センサス」により作成した。

表2 DEA分析用入力と出力データ

都市	道路延長 (km)	軌道系駅数 (stations)	交通事故死傷者数 (persons)	CO2 排出量 (10 <sup>6</sup> units)	モビリティ-I (10 <sup>7</sup> trip*km/hr)	モビリティ-II (10 <sup>6</sup> person trips)
札幌	5,182.8	93	11,880	2,253.058	3,291.777	1,269.256
小樽	640.1	8	870	222.069	295.222	106.743
当別	565.0	6	130	42.500	60.440	19.444
江別	806.4	5	558	172.476	246.687	81.373
北広島	437.9	1	355	101.235	145.640	48.102
恵庭	567.8	4	355	104.296	145.298	47.147
千歳	821.5	5	584	152.274	201.131	67.488
旭川	2,313.8	17	2,320	454.597	564.157	199.830
函館	987.2	3	1,708	412.026	516.129	186.320
釧路	1,025.5	6	898	340.945	418.765	145.314
横浜	8,773.6	135	25,904	2,392.594	1,669.206	615.583
川崎	2,404.9	53	7,866	810.180	6,759.439	2,272.215
名古屋	6,144.9	129	17,382	2,432.782	2,449.621	795.142
京都	3,185.8	115	13,451	1,322.728	1,399.140	501.959
福岡	3,715.5	57	13,465	1,346.860	4,541.426	1,793.696
北九州	3,998.1	63	8,700	1,043.450	2,702.192	1,036.933
仙台	3,233.1	42	3,912	1,133.546	1,621.300	638.906
千葉	2,822.9	47	6,305	705.132	1,527.591	571.173
広島	3,761.9	129	8,778	1,149.317	2,011.609	859.458

表3 DEA解析結果

4. DEAによる交通インフラシステムの効率性評価

(1) DEAによる解析

3. (1) による3種類の入力～出力の組み合わせから、CCRモデル解析によるD効率値とInverse DEAによるL効率値の2指標の組み合わせによる解析結果を表3に示す。D効率値をみると、3つの入力～出力の組み合わせとともに、北広島市、函館市、名古屋市がすべてD効率であると判断された。一方で、L効率値の場合、旭川市、仙台市はすべてのケースで非効率と判断された。

また、表3に示すようにDEAとInverse DEAを組み合わせることにより、各都市は次のように分類できる。L効率値とD効率値の組み合わせで都市の分類を行うことにより、各都市の性格を概括的に捉えることができる。

- A: 全ての項目に対し欠点がなく優れた交通要素をもつ都市(D効率、L効率)
- B: いくつかの項目に対しては、かなり優れた交通要素を持つ都市(D効率、L非効率)
- C: 全ての項目に対し欠点の少ない都市(D非効率、L効率)
- D: いくつかの項目に対し、欠点のある都市(D非効率、L非効率)

都市	CASE-I			CASE-II			CASE-III		
	D効率値	L効率値	分類	D効率値	L効率値	分類	D効率値	L効率値	分類
札幌	0.814	0.143	C	0.927	0.207	C	0.816	0.020	C
小樽	0.843	0.067	C	0.852	0.095	C	0.727	0.411	C
当別	1.000	0.000	B	0.939	0.000	D	1.000	0.000	B
江別	1.000	0.134	A	0.935	0.083	C	0.589	0.204	C
北広島	1.000	0.141	A	1.000	0.089	A	1.000	0.354	A
恵庭	0.945	0.104	C	0.843	0.036	C	0.691	0.148	C
千歳	0.837	0.055	C	0.799	0.015	C	0.508	0.035	C
旭川	0.659	0.000	D	0.687	0.000	D	0.394	0.000	D
函館	1.000	0.013	A	1.000	0.039	A	1.000	0.544	A
釧路	1.000	0.000	B	1.000	0.000	B	0.719	0.397	C
横浜	1.000	0.157	A	1.000	0.201	A	0.724	0.190	C
川崎	1.000	0.405	A	1.000	0.265	A	0.922	0.000	D
名古屋	1.000	0.493	A	1.000	0.354	A	1.000	0.499	A
京都	0.700	0.249	C	0.767	0.173	C	0.612	0.213	C
福岡	0.811	0.275	C	0.971	0.311	C	0.904	0.000	D
北九州	0.833	0.184	C	0.984	0.132	C	0.984	0.000	D
仙台	0.562	0.000	D	0.665	0.000	D	0.514	0.000	D
千葉	0.545	0.022	C	0.618	0.000	D	0.504	0.000	D
広島	0.643	0.000	D	0.826	0.000	D	0.824	0.143	C

(2) 加重入力値からの分析

CCRによる各都市の加重入力値の割合(ケース)は図2示す。これにより各都市がどの項目において優れているかを把握することができ、各都市の特徴を視覚的に捉えることが可能である。

ここでは、札幌、当別、恵庭、江別、北九州市、仙台、名古屋、千葉市、広島のように安全性において優れている都市、また福岡、横浜のように鉄道整備度に優れている都市、京都市のように道路の整備

度において優れている都市、函館、千歳のように環境において優れている都市、小樽、川崎のように特に優れている要素がない都市などに分けられる。各都市は、それぞれのグループの中で最もD効率値の高い都市を目標として、改善策を立案するという方針を得ることができる。

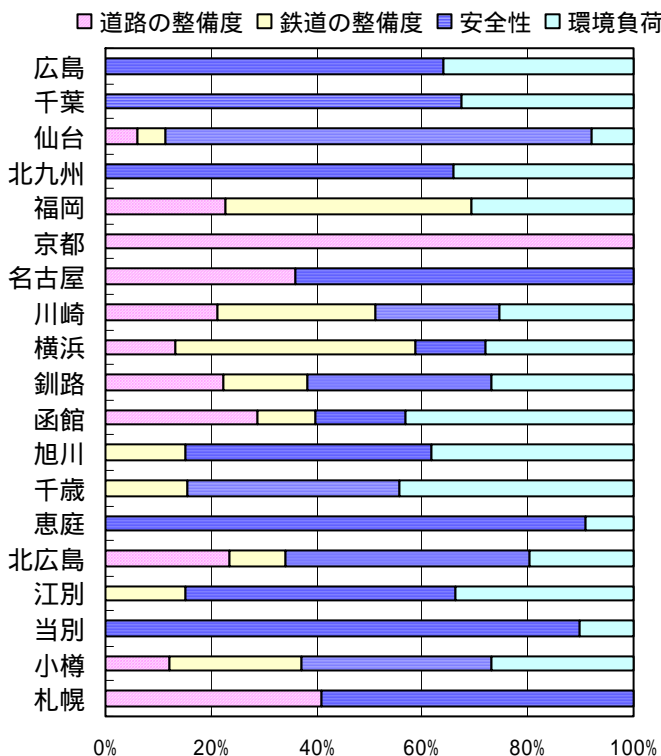


図2 加重入力値の割合(ケース)

### 5 D非効率都市への改善案

DEAのD効率値で非効率と判断された都市については、さまざまな改善案が考えられる。ここでは、モビリティは一定であるという条件で他の指標の改善量を表6(ケース)に示す。

非効率とされる都市では、表4のとおり道路整備度、鉄道整備度、環境への負荷、安全性において減少させることが必要である。しかし、表4のように示した改善量は理論値であり、実現可能案であるとは限らない。例えば道路整備度、鉄道整備度の減少は現実的ではない。そこで環境負荷と安全性の改善が1つの改善案であるとする。加重入力値からの分析の結果により、安全性において優れている都市は多数があるから、環境面への対策の実施はもっとも都市交通インフラシステム水準の改善につながると考えられる。

表4 CCRモデルに基づく改善案(ケース)

都市	道路の整備度	鉄道の整備度	安全性	環境負荷
札幌	-375.77 -7.25%	-7.71 -8.29%	-861.35 -7.25%	-602.31 -26.73%
小樽	-94.58 -14.78%	-1.18 -14.78%	-128.55 -14.78%	-32.81 -14.78%
当別	-448.18 -79.32%	-4.89 -81.56%	-7.87 -6.05%	-2.57 -6.05%
江別	-315.08 -39.07%	-0.32 -6.47%	-36.08 -6.47%	-11.15 -6.47%
恵庭	-316.26 -55.70%	-0.84 -21.04%	-55.76 -15.71%	-16.38 -15.71%
千歳	-434.48 -52.89%	-1.00 -20.05%	-117.11 -20.05%	-30.53 -20.05%
旭川	-1294.05 -55.93%	-5.33 -31.33%	-726.79 -31.33%	-142.41 -31.33%
千葉	-1224.46 -43.38%	-13.49 -28.69%	-1466.80 -23.26%	-164.04 -23.26%
名古屋	-176.82 -2.88%	-9.06 -7.02%	-500.17 -2.88%	-404.65 -16.63%
京都	-49.61 -1.56%	-45.88 -39.90%	-3193.07 -23.74%	-266.18 -20.12%
広島	-1523.64 -40.50%	-86.20 -66.82%	-2943.37 -33.53%	-385.38 -33.53%
北九州	-2099.59 -52.51%	-24.81 -39.38%	-3321.20 -38.17%	-398.33 -38.17%
福岡	-645.57 -17.37%	-9.90 -17.37%	-5070.70 -37.66%	-234.02 -17.37%

### 7. おわりに

本研究では企業の経営活動の評価に用いられる包絡分析法(DEA)を適用し、交通インフラシステムを効率性という観点で、モビリティ、環境、社会、など複数の評価基準を考慮した都市交通インフラシステムの効率性を評価した。

このような方法で、各都市の交通インフラシステムの性格を概括的に捉えることができ、その改善すべき方向をとらえることを示した。

#### 参考文献

- 1) Kunihiro KISHI, Shin-ei TAKANO, Seiichi KAGAYA and Keiichi SATOH: An Evaluation Method of the Efficiency of Urban Transportation Involving Mobility and Environmental Affects, Proceedings of International Symposium on City Planning 1997, pp501-506, 1997
- 2) 刀根薫: 包絡分析法 DEA による経営効率の測定と改善, 日科技連, 1993