

交通資本による CO2 排出と 生産に関する効率性分析

三浦 大貴¹・玉置 哲也²・紀伊 雅敦³・梶谷 義雄⁴

¹ 学生会員 香川大学大学院工学研究科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: s19g406@stu.kagawa-u.ac.jp

² 正会員 香川大学講師 創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: tamaki.tetsuya@kagawa-u.ac.jp

³ 正会員 香川大学教授 創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: kii.masanobu@kagawa-u.ac.jp

⁴ 正会員 香川大学教授 創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: kajitani.yoshio@kagawa-u.ac.jp

日本の多くの地方都市では少子高齢化や人口減少が進んでおり、経済水準の維持などが課題となっている一方、世界では温室効果ガスの問題が顕著になっており、2015年のパリ協定では各国に削減目標が課せられている。これらの背景を踏まえ、日本において持続可能な社会を実現していくために、効率的な生産活動及び低炭素排出を目指した都市計画を行う必要がある。本研究では、NDEAを用いて47都道府県を対象とした生産効率性を明らかにする。そこでは、各DMUにおいて第1次産業～第3次産業および運輸産業のセクターを考慮することで、CO2排出量に大きく寄与する運輸部門を独自に評価し、交通資本による生産効率性分析をより詳細なものとした。分析の結果、効率性の低い地域がとるべき方策の違いを示した。また、従来のDEAとNDEAの推計結果を比較することで各セクターがもたらすDMUの効率値の変動への影響に言及し、加えて、従来のDEA分析では判断できなかったセクター毎の参照集合についても明らかにした。

Key Words: *Transportation capital, Network DEA, Input-output, CO2 emissions*

1. はじめに

コンパクトシティ化は、人口減少によって生じる問題や地球温暖化の緩和策として期待されている。日本では高度経済成長期以降の人口増加と自家用車の普及に伴い、地方都市を中心に郊外化が進んだが、近年の少子高齢化と2008年からの人口減少によって、街づくりの方向性を見直す段階に入っている。加えて、コンパクトシティ化により無秩序な郊外開発を抑制し、道路整備などに対する一人当たり負担額は抑える効果も含んでいる¹⁾。少子高齢化による経済活動の低迷と社会保障負担の増大も懸念されており、公共事業予算についても1990年代のピーク時に比べおよそ半減していることから、コンパクトシティに代表される効率的な交通資本の整備が必要であると考えられる。また、高齢化によって自動車を運転できない交通弱者の増加も懸念事項の一つであり、徒歩や公共交通で生活のできる都市空間の重要性も指摘され

ている²⁾。

一方、環境面に目を向けると、世界では温室効果ガスによる地球温暖化の問題が顕著になっている。2015年に採択されたパリ協定では、日本は中期目標として2030年までに2013年度比で26%の温室効果ガス削減が掲げられている。日本において、総CO2排出量に占める運輸部門の割合はおおよそ2割を占めている。その対策として車両本体の性能向上や交通流の改善が打ち出されており、コンパクトシティ構想やトランジットモール等、都市計画の側面からも環境負荷を低減するような街づくりが期待されている。例えば、コンパクトシティ化による環境負荷低減に関する研究も盛んに行われており、都市のコンパクト化によるCO2排出量の削減効果が推計されているほか³⁾⁴⁾、市街化区域人口密度の高さが自動車CO2排出量の低下に寄与すると指摘されている⁵⁾。また、森本⁶⁾はコンパクトシティが環境に加え、財政に有利な効果をもたらすことを明らかにした。以上の研究成果か

らも、コンパクトシティに代表される効率的な資本整備は、財政・環境負荷を低減させるうえで重要だと考えられる。

これらの背景を踏まえ、本研究では、環境負荷を考慮した都市の効率性について、交通的な側面からの定量的な把握を目的とする。効率性という観点から、データ包絡分析法 (Data Envelopment Analysis; DEA) を用いた都市間比較を行い、各都市の生産効率値を推計する。それにより、効率性の低い都市とその改善目標となる都市を明らかにする。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

SDGs の目標 11 に定められているように、持続可能な都市や居住空間を実現することは世界共通の課題であり、様々な指標を用いて都市評価が行われている。例えば、Global Power City Index では、世界の主要都市の総合力について、経済、研究・開発、文化・交流、居住、環境、交通・アクセスの 6 指標を用いた評価を行っている。また、World Council on City Data は、都市評価指標である ISO37120 に基づいたデータの収集・公開を行っている。さらに、The Economist Intelligence Unit が作成する Safe Cities Index では、サイバーセキュリティ、医療・健康環境の安全性、インフラの安全性、個人の安全性の 4 指標を軸に世界各都市の分析を行っている。これらの報告書では、指標に基づく都市のランキング化により、各都市の持つ課題を把握している点に特徴がある。

一方で、複数の活動主体 (Decision Making Unit; DMU) の中で相対的な効率性を評価する手法としてデータ包絡分析法 (以下、DEA)、確率フロンティア分析(SFA)なども広く用いられてきた。共にデータをもとにフロンティアを推定し効率性を評価する手法であるが、DEA はノンパラメトリックな手法であるのに対し SFA はパラメトリックな統計手法である。DEA は Charnes et al.⁷⁾により事業所評価のために用いられたのをはじめとして、企業、金融機関、自治体など多様な分野の事業体評価に利用されている。特に Chung et al.⁸⁾により、望まれないアウトプットを含めた効率性評価分析が提案されて以降、環境分野においても広く用いられている。例えば、Lozano and Gutierrez⁹⁾、Wei et al.¹⁰⁾、Zhou and Ang¹¹⁾に見られるように、多くの環境分野における効率性評価の研究では労働や資本をインプットとして、望ましいアウトプットに GDP、望ましくないアウトプットに CO₂ 排出量を設定することで効率性を求めている。

本研究で対象としている都市交通に対しても DEA や SFA は利用されている¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。例えば、世界各都市を対象とした分析として、Tamaki et al.¹⁵⁾は、交通資本をインプットとした GDP 産出と運輸部門 CO₂ 排出量に着目し、

DEA を用いて生産効率値および CO₂ のシャドープライスを推計している。また、Yoshino et al.¹⁶⁾は、世界各都市を私的交通依存型、公共交通依存型、私的・公共交通調和型に分類し、DEA による効率性評価に実効性を持たせた。他にも中国¹⁷⁾、ブラジル¹⁸⁾など各国の都市交通を対象とした分析も行われており、Chang et al.¹⁷⁾による中国の分析では運輸産業 GDP を使用した評価を行っているほか、Carvalho et al.¹⁸⁾はブラジルの各都市を対象として公共交通機関のパフォーマンスを評価している。

このように、DEA は広く分析に用いられているが、多くの場合、各 DMU 内での生産はブラックボックスとして扱われている。そこで、Fare¹⁹⁾や Fare and Grosskopf²⁰⁾は中間投入を考慮できるネットワーク DEA (NDEA) を提案している。NDEA は DMU の効率性を評価するだけでなく、DMU における各部門の効率性も測定することができ、都市や自治体の他に航空会社や銀行など様々な分野の経営分析に用いられている²¹⁾²²⁾。また、Tone and Tsutsui²³⁾は NDEA にスラック変数ベースの評価を加えた Network Slacks-based Measure (NSBM) を提案することで、ネットワークを持つ DMU 集合に対して radial 尺度ではない効率性分析を可能としている。こうした NDEA が用いられた例として、Liu et al.²⁴⁾は、都市内部に鉄道輸送のセクションと道路輸送のセクションを設定し、ネットワーク DEA によりそれぞれの環境効率を分析した。また、このようなネットワークを考慮したアプローチは産業構造にも応用されている。例えば、Xiong et al.²⁵⁾は、中国の都市を対象に産業別での効率性を推計している。日本においても天達と上田²⁶⁾は、マトリックス形式に対応した NDEA モデルを提案し、産業連関表を使った各都道府県の産業別効率値を推計しているが、NDEA モデルを都市評価への応用研究はあまり多くない。特に、NDEA を用いた都市交通部門に応用した分析や、さらに、それに伴う CO₂ 排出量を考慮した分析はほとんど行われていない。しかしながら、環境負荷を考慮した上で都市評価を行うことは今後の政策を実行する上で重要な指標となり、また、部門別の効率性の推計はより詳細で的確な対策に落とし込むことが可能となる。環境保全や都市の持続可能性が大きく取りざたされる今日において、環境負荷をもたらす生産物を考慮した経済成長は必須課題であり、これらの分析は有用な評価手法であると言えるだろう。

本研究では、国内 47 都道府県を対象に都市の生産効率性評価を行う。以下、3 章において、その分析手法および使用データについて解説を行い、4 章にて分析結果を示す。5 章では総括と今後の課題について言及する。

3. 分析手法と使用データ

(1) 分析手法

DEA は、企業等の経営改善を目的として 1978 年に提唱された、数理計画法による効率性分析のための手法である。DEA において効率性とは、インプットとアウトプットの関係によって定義されるが、Radial 尺度を用いるものとそうでないもの (Non-radial 尺度) に大別される。また、生産可能集合の形状によっても、規模に関して収穫一定型 (Constant Return to Scale : 以下, CRS) だけでなく収穫可変型 (Variable Return to Scale : 以下, VRS) などいくつかの種類があり、仮定する生産関数型や分析データの特徴に応じ使い分けられている。

本研究では、分析モデルの違いによる結果を比較するため、図 1 と図 2 に示す(a)NDEA モデル、図 3 に示す(b)Black Box モデル (以下, BB) を用いる。特に、ここでは収穫一定型かつ Non-radial 尺度を仮定する。

a) NDEA モデル

従来型の DEA モデルでは分析対象とする DMU 単位で効率値が求められるが、NDEA ではその DMU 内のセクターの効率性についても推計することが可能となる。

ある DMU_oの全体的な効率値、および DMU_o内部のセクター k の効率値は、インプット削減型、CRS 型を仮定した場合、次の式(1)~式(6)で表す線形計画問題を解くことによって得ることができる。

$$Efficiency_o = \min \sum_{k=1}^K w^k \left[1 - \frac{1}{m_k} \left(\sum_{i=1}^{m_k} \frac{s_i^{k-}}{x_{io}^k} \right) \right] \quad (1)$$

$$s.t. \quad X^k \lambda^k + s^{k-} = x_o^k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (2)$$

$$Y^k \lambda^k - s^{k+} = y_o^k \quad (k = 1, \dots, K) \quad (3)$$

$$Z^{(k,h)} \lambda^k - Z^{(k,h)} \lambda^h = 0 \quad (\forall (k, h)) \quad (4)$$

$$\lambda^k \geq 0, s^{k-} \geq 0, s^{k+} \geq 0, (\forall k) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K w^k = 1, w^k \geq 0 \quad (6)$$

ここに

$$X^k = (x_1^k, \dots, x_n^k) \in R^{m_k \times n} \quad (7)$$

$$Y^k = (y_1^k, \dots, y_n^k) \in R^{r_k \times n} \quad (8)$$

x_{io}^k : DMU_oのセクター k における i 番目のインプット

y_{ro}^k : DMU_oのセクター k における r 番目のアウトプット

$z^{(k,h)}$: セクター k からセクター h への中間財の移動

s^{k-} : セクター k における入力スラック

s^{k+} : セクター k における出力スラック

λ^k : セクター k における未知数のウェイト

w^k : セクター k のウェイト (任意の値)

K : セクター数

n : DMU 数

m_k : セクター k におけるインプット個数

r_k : セクター k におけるアウトプット個数

目的関数となる式(1)は、DMU_o全体の効率値を表し

ており、求められる s^{k-} に応じて値が変化する。そして、DMU_o内部のセクター k の効率値は、以下の式(9)によって求められる。これは式(1)中、角括弧内の式を表している。式(2)(3)(4)はそれぞれインプット、アウトプット、中間財に関する制約式であり、求められる λ^k の値によって、効率改善の目標となる参照集合が決定する。参照集合とは、ある DMU の効率改善を図る場合に目標となる DMU の集合体である。

$$1 - \frac{1}{m_k} \left(\sum_{i=1}^{m_k} \frac{s_i^{k-}}{x_{io}^k} \right) \quad (9)$$

本研究では図 1 のようにセクター数を 2、図 2 のようにセクター数を 4 とした 2 パターンを考え、それぞれ NDEA2S モデル、NDEA4S モデルとする。DEA は入出力数が多くなると、多くの DMU で効率値が最大になるという弱点があり、図 2 のような場合では入出力過多となる恐れがある。そのため図 1 では、第 1 次~3 次産業を 1 つに取りまとめ、入出力数の削減を狙っている。

b) Black Box(BB)モデル

BB モデルはセクター間の隔たりを無くし、各都道府県を一つの箱 (ブラックボックス) として効率を求める

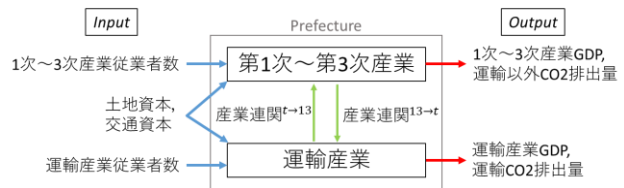


図-1 NDEA モデル (2セクター)

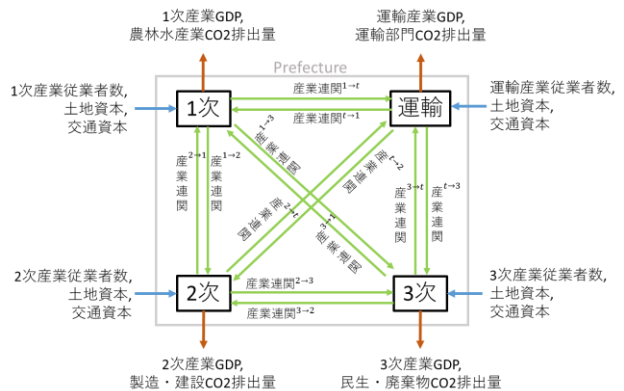


図-2 NDEA モデル (4セクター)

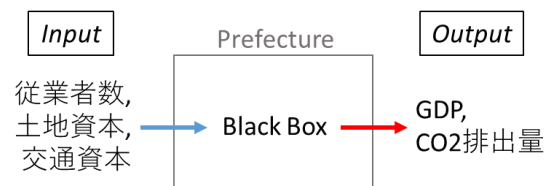


図-3 Black Box モデル

表-1 データの概要

| データ | | 最小値 | 平均値 | 最大値 | 標準偏差 | 出所 | 期間 |
|-----------------------|-------------------------|------|-------|-------|-------|-----------------|----------------------|
| 第1次～第3次産業従業者数【千人】 | | 249 | 1245 | 9173 | 1519 | 総務省, 経済センサス基礎調査 | 2014年 |
| 運輸産業従業者数【千人】 | | 12 | 70 | 484 | 87 | | |
| 土地資本 | 都市計画区域面積【1,000ha】 | 62 | 216 | 644 | 125 | 国土交通省 | 2011年,2013年 |
| | 道路延長【km】 | 8008 | 25678 | 89450 | 15123 | 内閣府 | 2012年 |
| 交通資本 | バス停・駅数 | 1869 | 5559 | 14208 | 2670 | 国土交通省 | 2010年(バス停), 2014年(駅) |
| | CO2排出量(運輸以外)【1,000tCO2】 | 3708 | 21530 | 66217 | 18400 | 環境省 | 2011年,2013年 |
| 運輸部門CO2排出量【1,000tCO2】 | | 1021 | 3855 | 10810 | 2582 | | |
| 第1次～第3次産業GDP【十億円】 | | 1667 | 10490 | 97415 | 15250 | 内閣府, 県民経済計算 | 2011年,2013年 |
| 運輸産業GDP【十億円】 | | 60 | 487 | 2603 | 560 | | |
| 中間財 | 産業連関(他産業→運輸)【十億円】 | 65 | 372 | 2453 | 440 | 各都道府県 | 2011年,2013年 |
| | 産業連関(運輸→他産業)【十億円】 | 100 | 502 | 3047 | 535 | | |

手法で, 計算に産業連関は考慮しない. そのため本研究に用いる BB モデルの式は, 式(1)を目的関数, 式(4)を除いた式(2)～式(8)を制約条件, $K = 1$ として求めることができる. 本研究では, この3つのモデルを用いて都市の効率性を比較検討する.

(2) 使用データ

本研究で定義した生産関数を図 1～図 3 に示し, データの取得元と概要を表 1 に示す. インプットとアウトプットに関しては Tamaki et al.¹⁵⁾ が用いたものを参考に設定した. 初めに, インプットについて説明する. まず, 労働として産業別の従業者数を設定した. 人的資本をインプットとする既往研究では, 人口を設定するものが見られたが, 今回は産業別のセクションを考慮するため, 従業者数としている. 次に, 資本(土地)として都市計画区域指定面積を設定した. 土地の指標としては他に都道府県面積や DID 面積などを候補としたが, 都道府県面積では経済活動に影響の少ない森林部などが多く含まれてしまうことや, DID 地区を持たない市町村も多くあることから, これらは使用しないこととした. 都市計画区域とは「健康で文化的な都市生活及び機能的な都市活動を確保する」という理念のもと, 都道府県によって指定される区域であり, 都市活動が広く影響する区域として設定している. さらに交通要素は, 私的交通が主流のものとして道路延長, 公共交通の指標としてバス停と駅数を足したものを設定した. 以上のうち, 資本(土地)と資本(交通)は共通のインプットとして各セクションに同じ値が投入されることとする.

次にアウトプットについて説明する. 望ましいアウトプットには産業別 GDP を設定した. 望ましくないアウトプットには, 運輸産業セクションからは運輸部門 CO2 排出量, そのほかのセクションからは産業別 CO2 排出量を設定した.

セクションを繋ぐ中間財には, 天達と上田²⁰⁾が行った分析を参考とし, 産業連関表のデータを用いた. 産業連関表は各都道府県がおおよそ 5 年に一度作成しており, 2020 年 8 月現在, 全国一律にデータがそろった最新年は

2010 年分であった.

一方で, 自治体は交通形態によって, 自家用車等による私的交通依存型都市と公共交通依存型都市に分類¹⁶⁾される. 日本においては, 都市部と地方部で交通形態の違いが予想されることから, 一律に同じ土俵で効率性を比較すべきではない可能性もある. クラスタ分析を適用し, 似た構造の事業者同士で効率性評価を行うという手法²⁰⁾もあるが, 本研究では扱う都道府県数が 47 と少ないため, 一律に DEA 分析を行うこととする. その上で, 非効率な都道府県の参照集合の違いから, 都道府県の分類についても比較検討を行うこととする.

(3) データの前処理

a) 交通要素の取りまとめ

DEA の特徴として, 分析する DMU 数に対してインプットやアウトプットの数が多すぎると, 多くの DMU で効率値が 1 と判定されてしまい, 正しい評価が行えないという弱点がある²⁰⁾. 今回の分析では, 対象の都道府県数が 47 と少ないいうえに, ネットワーク構造によって出力過多としまう恐れがある. そこで, 項目数を少しでも減らすべく, 道路延長とバス停駅数を一つの項目に取りまとめ, 交通資本として定義することにした.

道路延長とバス停・駅数は単位が異なることから, 直接足し合わせるができない. そのため, 両変数を標準化するなど, 何かしらデータの処理が必要になる. そこで今回は, Li et al.²⁰⁾ が用いたエントロピー法を適用し, 各変数の重みを決定したうえで足し合わせを行う. エントロピーとはデータの乱雑さを意味し, 乱雑さが大きいほど重みは大きく設定される. それにより, 全国的にばらつきのある変数は地域差があるものとして捉えられ, インパクトの大きさが反映される. エントロピー法は次の式(10)～式(13)で表される.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (10)$$

$$f_j = -\frac{\sum_{i=1}^n y_{ij} \cdot \ln y_{ij}}{\ln n} \quad (11)$$

$$\omega_j = \frac{1 - f_j}{\sum_{j=1}^m (1 - f_j)} \quad (12)$$

$$p_i = \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot \omega_j \quad (13)$$

x_{ij} : 変換を行う DMU i のデータ j

y_{ij} : x_{ij} の標準化変数

f_j : データ j のエントロピー

ω_j : データ j のウェイト

p_i : DMU i の交通資本

n : DMU 数

m : 結合するデータ数

式(10)ではまず、元データの標準化を行う。次に、式(11)で各変数全体のエントロピーを求め、式(12)にてウェイトを決定する。そして、ウェイトを基に式(13)にてデータを結合する。

b) 望ましくないアウトプット

本研究ではアウトプットに CO2 排出量を設定している。これは地球環境などにとって望ましくない出力であり、本来であれば削減されるべき変数である。ここで、DEA の基本的な考え方は、出力を増加させ入力を削減

することで効率的な生産活動を目指すというものである。一般的な DEA モデルに沿って分析を行った場合、CO2 排出量が多いほど効率が良いという評価になってしまうため、削減方向へ導くためのデータの変換が必要である。

望ましくないアウトプットの取り扱い²⁹⁾³⁰⁾は、既往研究によりいくつか提唱されている。その一つは、CO2 排出量を入力変数に捉え、コストとして削減方向へ導くものである。橋本ら³⁰⁾はこの方法によって分析を行っているが、本研究の生産関数では CO2 排出量はアウトプット側としているため、この手法は使わない。そこで、違う方法として、CO2 排出量の値を逆数にとり、それをアウトプットに入れるというものがある。これにより、CO2 排出量を出力変数に位置付けたまま、削減方向へ導くことができる。

4. 提案モデルによる分析結果と考察

(1) NDEA2S モデルによる分析結果

a) 第 1 次～3 次産業に関するセクション

第 1 次～3 次産業に関するセクションの分析結果を図

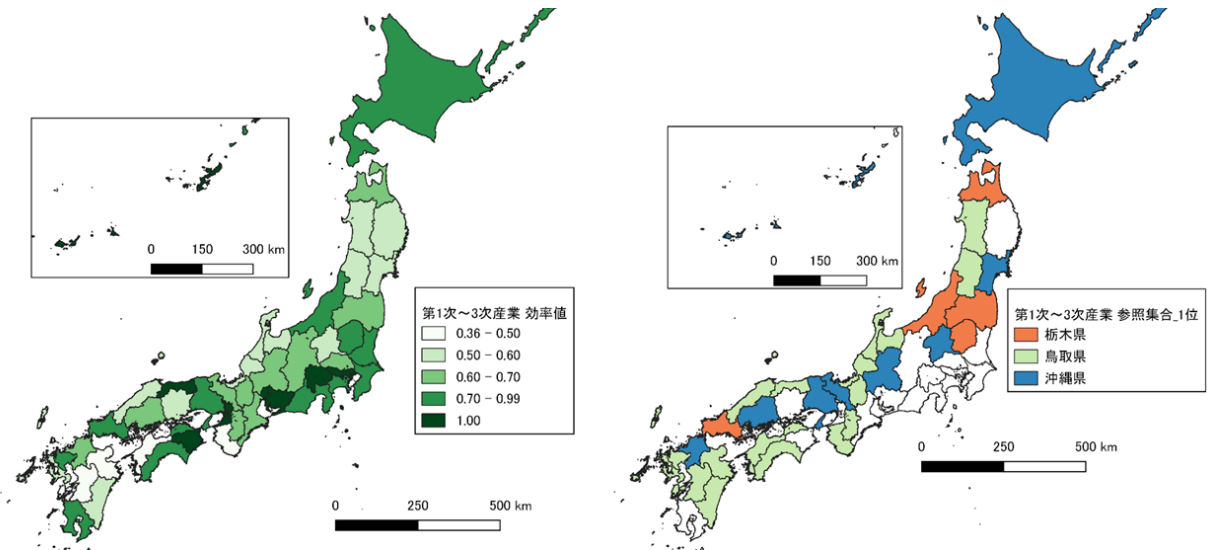


図4 NDEA2S モデルによる第 1 次～3 次産業効率値と代表的な参照集合

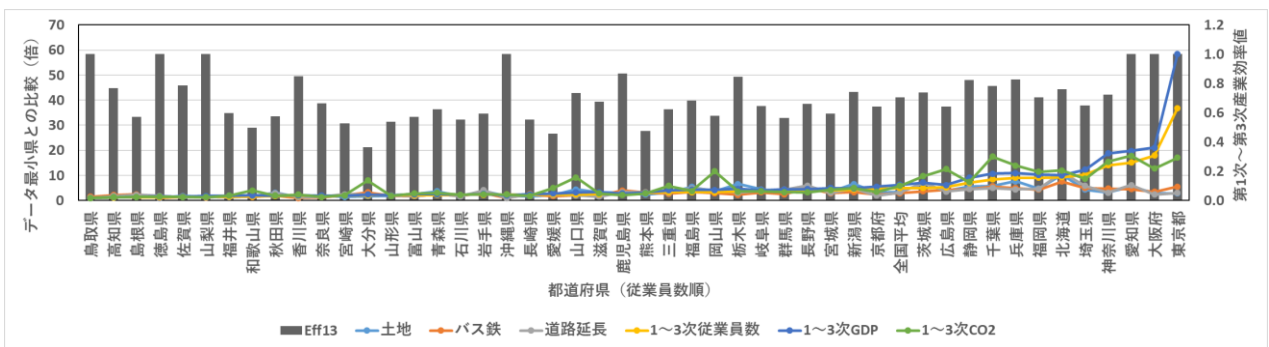


図5 NDEA2S モデルによる第 1 次～3 次産業効率値とデータの比較

4 および図 5 に示す。効率値が最大になったのは、東京、大阪、愛知などの大都市を抱える都府県の他、地方部では鳥取、徳島、沖縄などとなった。一方で大都市ではあるものの、福岡や神奈川では 0.7 程度の効率性と低い値が推計されている。広域的に効率値を見ると、東京から大阪にかけての三大都市圏周辺地域では比較的効率性が高い都府県が多く、逆に、東北地方や北陸地方、九州地方では低い効率値となる県が多いという結果になった。

効率値の高い都府県のうち、多くの道府県に参照されたのは鳥取、沖縄、栃木等となった。鳥取を参照とする県の特徴として、人口規模が似通っている点が挙げられ、どの県も 100 万人前後の人口を有している。また、沖縄を参照とする道府県には、北海道や福岡、広島など、比較的大都市を有する場所が抽出された。一方で、地方部で効率値が最大の山梨や徳島を参照とする他県は無かった。

b) 運輸産業に関するセクション

運輸産業に関するセクションの分析結果を図 6 に示す。効率値の高い都道府県には、第 1 次～3 次産業のセクションと同様に大都市部の東京、大阪、愛知が含まれた。

また、地方部では山梨、静岡、鳥取、徳島、高知、鹿児島、沖縄で効率値が最大となった。一方、大都市を有する福岡は 0.6 程度の効率性と低く推計され、東京近郊の神奈川、千葉、埼玉でも低い効率性となった。

また図 7 からわかるように、静岡、鹿児島、沖縄などは同規模の従業員数の他県に比べて運輸産業 GDP が高いことで効率値が高くなったと考えられる。一方で、大都市部に位置する神奈川、埼玉、福岡などは、同規模の他道府県に比べ運輸 GDP が低いことから効率性が下がった。

参照された効率値が高い県としては、沖縄が最も多くの道府県に参照されたほか、山口県や山梨県も多くの県に参照された。一方で、地方部で効率値が最大の高知や鹿児島を参照とする他県は無かった。

(2) NDEA4S モデルによる分析結果

4 セクターでの分析結果を図 8 に示す。全セクターで効率値が最大になったのは 18 都道府県で、セクターを多く設定することによる効率値の上昇が確認された。効率値が最大になった都道府県の特徴として、大都市を有していることのほか、100 万人前後の人口を有する小規

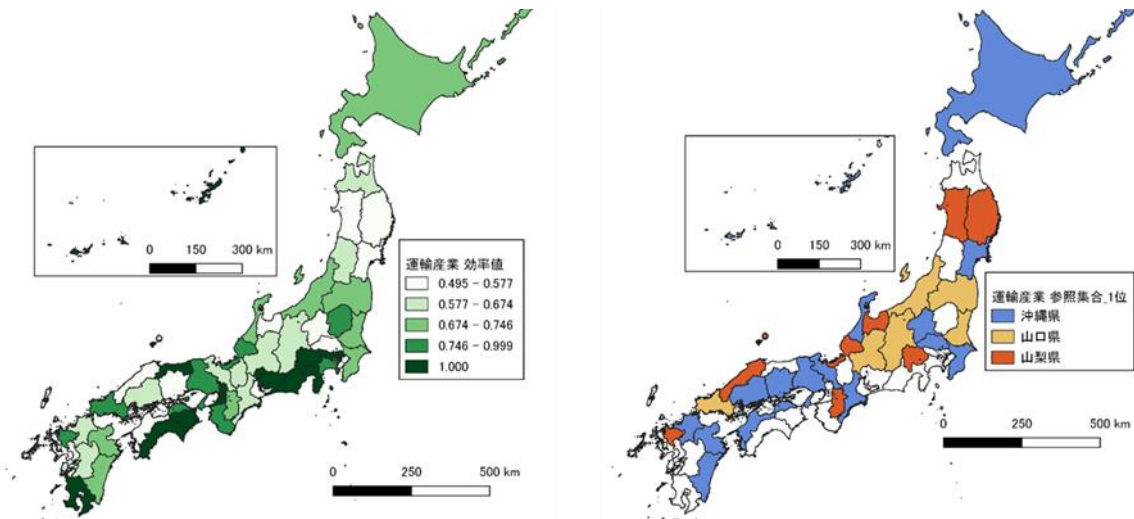


図-6 NDEA2S モデルによる運輸産業効率値と代表的な参照集合

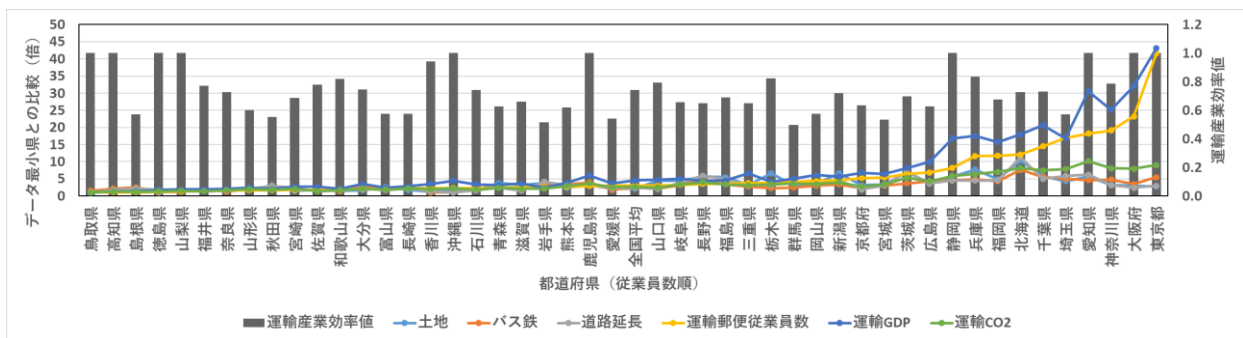


図-7 NDEA2S モデルによる運輸産業効率値とデータの比較

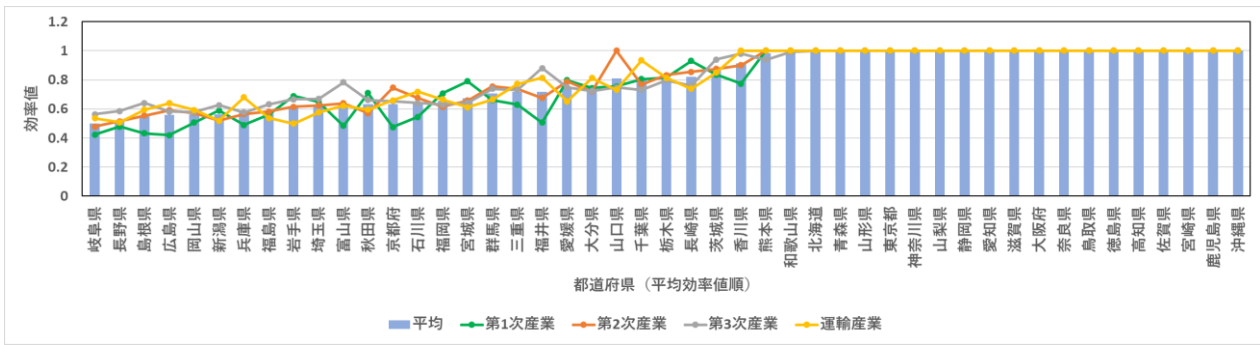


図-8 NDEA4Sモデルによる効率値

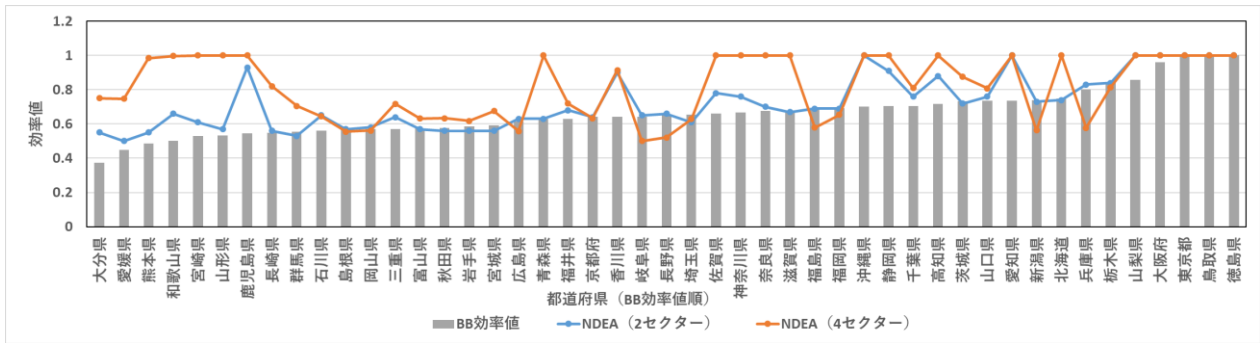


図-9 BBモデルとNDEA各モデルの効率値比較

模な県も多いことが挙げられる。大都市の内、2セクターの分析では効率値が低かった神奈川は効率性が1になったものの福岡は依然低いままである。一方で効率値が低い県には、広島や岡山など、人口200万人～300万人前後で全国的に中規模な県が多い結果となっている。

(3) BBモデルによる分析結果と比較

NDEA各モデルのDMU全体効率値とBBモデルによる効率値の計算結果を比較したものを次の図9に示す。BBモデルによる計算で効率値が最大になったのは、東京、鳥取、徳島の3都県のみであった。既往文献でも示される通り、ブラックボックス化することで他モデルに比べ入出力要素が少ないことがその要因として挙げられる。ただし、大阪や愛知の効率値は比較的高く、NDEA2Sモデルとは比較的近い傾向があると考えられる。一方で、鹿児島、沖縄、愛知、香川、静岡などではNDEAのモデルよりも効率値が低くなったのに対し、岐阜、長野、福島、新潟、兵庫などではNDEAよりも高い値が推計されている県もある。また、NDEA2SモデルやBBモデルでは低い効率値となった県においても、NDEA4Sモデルでは効率性が1と推計される県が多々ある。一致している県もあるが、必ずしも他2つのモデルと似た傾向があるとは言えない。

(4) 考察

ここで分析した3つのモデルにおいて、インプット・

アウトプット数によって分析結果に違いが生じている。2セクション程度の分割は許容できる範囲であるが、4セクションに分割すると効率性が1となる都道府県がかなり多くなることがわかる。ただし、大幅に効率値が変わる県もあるものの、3つのモデルにおいて似通った値となる県もある。3つのモデルに共通することとして、三大都市圏で効率性が高くなることが挙げられる。この要因として考えられるのは、多くの企業が事業所を置いている都道府県であるということである。それが各GDPに反映されることによって、相対的に高い評価になると考えられる。また、山梨、鳥取、徳島等で効率が高くなることも共通点の一つである。その要因としては、県規模の小ささが挙げられる。これらの県は人口が少ないのに加えて面積が小さく、それに伴うインフラの整備量も少なくなっているため全体として効率的と判断されている可能性があり、以上の事から、経済条件や地理的条件の違いは、インプット・アウトプットの要素を通じて、分析モデルの違いに関係なく推計結果に影響を及ぼすと考えられる。

一方で、熊本、和歌山、宮崎、山形、青森、佐賀、神奈川、奈良、滋賀あたりでは、NDEA4Sモデルのみ効率性が1となり、その他2つのモデルでは低い効率値が推計されている。これは、インプット・アウトプット数の増加が一因であるが、その他2つのモデルにさらに加えられたインプット・アウトプットの中に際立ったものが存在している可能性を示唆している。例えば宮崎は、土

地資本や交通資本が少ない割に、1次産業GDPが高いことから、高効率と判定された可能性がある。1次産業は全GDPに占める割合が全国どの県でも低く、BBモデルやNDEA2Sでは評価がされにくい、NDEA4Sではこれを解決しているといえる。一般に、インプット・アウトプット数の増加によって高効率値を示すDMUが増加することは懸念事項の一つであるものの、他モデルとの比較に用いることで有益な情報を得られる可能性もある。

また、NDEA2SモデルとBBモデルに着目した際、効率性の傾向は似ているものの、鹿児島、沖縄、静岡、高知、愛知において推計値に差が大きく、NDEA2Sモデルの方が高い推計値となっていることがわかる。インプット・アウトプット数の増加だけでなく、セクターを分けたことにより、それぞれのセクターの効率性が詳細化されたことで生じた影響も含んでいる。例えば、図7からも分かるように、上で挙げたすべての県で交通セクターの効率性が高く推計されている。鹿児島、沖縄、静岡、愛知については先述の通り、従業者当たりの運輸GDPの大きさが影響したと考えられる。

さらに、図4、図6で示される参照集合に着目することで、NDEA2Sモデルの2つのセクターで比較してみよう。同一の県を参照集合とする都道府県でグループ分けしたとき、似通ったグループ分けになっているものの、必ずしも一致しているわけではない。また、似通ったグループ同士であっても、参照集合がセクターによって異なる場合があることがわかる。全体から見た時には似通ったグループであっても、セクター別でみた場合にはより望ましい目標を提示できる可能性があり、NDEAを用いることで詳細化した利点と言える。例えば、第1次～3次産業の効率性について、新潟や福島にとっては栃木が参照集合となるが、交通の効率性としては山口が参照集合となることがわかる。第1次～3次産業に関して栃木が参照された理由は、新潟や福島と比較し、GDPとCO2排出量は同程度であるが、交通資本の量が少ないためである。一方で、山口は製造業CO2排出量が多く、栃木程の参照はされなかったが、その影響が分離されたことにより運輸セクターにおいては参照がされた。

また、沖縄を参照集合とするグループでは、福岡や兵庫など大都市を有する県、またはその近くに位置するものが多い傾向にあった。沖縄（本島）は地方部に位置するものの、人口密度が高いこと、そして、道路や公共交通機関が未発達で、一人当たりの資本数としては小さくなることから、これらの道府県に参照された可能性が高い。特に交通セクターに関しては宮崎、大分、愛媛も沖縄を参照集合としており、道路や公共交通機関の整備状況の影響だと考えられる。

以上のように、NDEAを用いることでより詳細な分析が可能となるものの、必ずしもここで紹介した参照集合

が各グループの目標となるとは限らない。例えば、北海道の参照集合は沖縄となっているが、ここでは考慮されていない気候条件の違いは看過できないものであり、それぞれの県によって取られる交通政策はそれによって大きく異なるだろう。その場合、現実において参照集合とすることができるとは限らない。気象条件のようにインプット・アウトプットを介して十分に考慮できていない条件があると、その条件は完全に排除されてしまうことがDEAの欠点と言えるが、マクロ的な視点から方向性を見出すという点では有益な方法であり、見過ごされる条件を減らしていくためにも本研究で紹介したネットワークを考慮したアプローチには意義があると言える。

5. おわりに

本研究では、47都道府県を対象としてNDEAモデルとBBモデルによる生産効率性分析を行った。それにより、交通資本をインプットとした産業別の経済・環境効率性を明らかにした。分析の結果と得られた知見は次の通りである。

- インプット・アウトプット数が増えることで、セクター分けの多いNDEAモデルでは高い効率値が推計されやすくなるが、一方で、どのモデルにおいても共通の推計結果が得られる場合もある。
- また、複数のモデルを比較することで、各セクターがもたらすDMUの効率値の変動への影響も確認できる。
- セクターを分けて分析した際、同一の参照集合を持つグループの傾向は似ているものの、必ずしも一致はしていない。また、似通ったグループ同士であっても、セクターによって参照集合が変わることもある。

以上の知見は、今後の都市計画の方針を決める上で有益な情報をもたらすと言える。今後分析の精度を高めるためには、よりミクロな地域での分析を行うことも必要であろう。今回は産業連関表の制約から、都道府県単位での分析を行ったが、都道府県内部の各市町村が抱える課題は様々であり、取るべき対応策も市区町村毎に異なるはずである。市町村単位の分析が可能となればDMUの数が増え、より多くのインプット・アウトプットを考慮できるというメリットもある。また、DEAモデルについても日々進化しており、より精緻な分析が期待される。

参考文献

- 1) 森本章倫.(2011). 都市のコンパクト化が財政及び環境に与える影響に関する研究. 都市計画論文集, 46(3), 739-744.

- 2) Michael, Y. L., Green, M. K., & Farquhar, S. A. (2006). Neighborhood design and active aging. *Health & place*, 12(4), 734-740.
- 3) Breheny, M. (1995). The compact city and transport energy consumption. *Transactions of the institute of British Geographers*, 81-101.
- 4) Liu, X., & Sweeney, J. (2012). Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO2 emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 46, 359-369.
- 5) 森田紘圭, 森本貴志, 加藤博和, & 林良嗣. (2006). 技術革新と都市空間構造改変を考慮した運輸部門での CO2 削減シナリオに関する検討. *土木計画学研究講演集*, 34.
- 6) 谷口守, 松中亮治, & 平野全宏. (2008). 都市構造からみた自動車 CO2 排出量の時系列分析. *都市計画論文集*, 43, 121-126.
- 7) Chames, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European journal of operational research*, 2(6), 429-444.
- 8) Chung, Y. H., Färe, R., & Grosskopf, S. (1997). Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51(3), 229-240.
- 9) Lozano, S., & Gutierrez, E. (2008). Non-parametric frontier approach to modelling the relationships among population, GDP, energy consumption and CO2 emissions. *Ecological Economics*, 66(4), 687-699.
- 10) Wei, Y. M., Liao, H., & Fan, Y. (2007). An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector. *Energy*, 32(12), 2262-2270.
- 11) Zhou, P., & Ang, B. W. (2008). Linear programming models for measuring economy-wide energy efficiency performance. *Energy Policy*, 36(8), 2911-2916.
- 12) Graham, D. J. (2008). Productivity and efficiency in urban railways: Parametric and non-parametric estimates. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 84-99.
- 13) Graham, D. J., Couto, A., Adeney, W. E., & Glaister, S. (2003). Economies of scale and density in urban rail transport: effects on productivity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 39(6), 443-458.
- 14) Boame, A. K. (2004). The technical efficiency of Canadian urban transit systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(5), 401-416.
- 15) Tamaki, T., Nakamura, H., Fujii, H., & Managi, S. (2019). Efficiency and emissions from urban transport: Application to world city-level public transportation. *Economic Analysis and Policy*, 61, 55-63.
- 16) Yoshino, D., Fujiwara, A., & Zhang, J. (2010). Environmental efficiency model based on data envelopment analysis and its application to environmentally sustainable transport policies. *Transportation research record*, 2163(1), 112-123.
- 17) Chang, Y. T., Zhang, N., Danao, D., & Zhang, N. (2013). Environmental efficiency analysis of transportation system in China: A non-radial DEA approach. *Energy policy*, 58, 277-283.
- 18) Carvalho, M., & Syguy, T. (2015). Efficiency and effectiveness analysis of public transport of Brazilian cities. *Journal of Transport Literature*, 9(3), 40-44.
- 19) Färe, R. (1991). Measuring Farrell efficiency for a firm with intermediate inputs. *Academia Economic Papers*, 19(2), 329-340.
- 20) Färe, R., Grosskopf, S., & Network, D. E. A. (2000). *Socio-Econ. Plan. Sci.* 34(1), 35-49.
- 21) Zhu, J. (2011). Airlines performance via two-stage network DEA approach. *Journal of CENTRUM Cathedra: The Business and Economics Research Journal*, 4(2), 260-269.
- 22) Fukuyama, H., & Matousek, R. (2017). Modelling bank performance: A network DEA approach. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 721-732.
- 23) Tone, K., & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slacks-based measure approach. *European journal of operational research*, 197(1), 243-252.
- 24) Liu, H., Zhang, Y., Zhu, Q., & Chu, J. (2017). Environmental efficiency of land transportation in China: A parallel slack-based measure for regional and temporal analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 867-876.
- 25) Xiong, B., Wu, J., An, Q., Chu, J., & Liang, L. (2018). Resource allocation of a parallel system with interaction consideration using a DEA approach: An application to Chinese input-output table. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56(3), 298-316.
- 26) 天達洋文, & 上田徹. (2010). 産業連関表とネットワーク DEA による都道府県の効率分析. *オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学*=[O] perations research as a management science [r] esearch, 55(1), 48-55.
- 27) 奥田英信, & 竹康至. (2006). 東南アジア 5 カ国における主要銀行の経営構造: DEA とクラスター分析による国際比較. *開発金融研究所報*, (30), 31-53.
- 28) Li, G., Huang, D., & Li, Y. (2016). China's input-output efficiency of water-energy-food nexus based on the data envelopment analysis (DEA) model. *Sustainability*, 8(9), 927.
- 29) Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., & Pasurka, C. (1989). Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach. *The review of economics and statistics*, 90-98.
- 30) Cook, W. D., & Seiford, L. M. (2009). Data envelopment analysis (DEA)—Thirty years on. *European journal of operational research*, 192(1), 1-17.
- 31) 橋本敦夫, & 福山博文. (2017). 温室効果ガス排出量の抑制を考慮した都道府県の生産性評価. *日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌*, 60, 1-19.

?

?