

## Malmquist 生産性指数による環境変化の評価

本 間 聡

本稿では、ノンパラメトリックな生産性評価手法である DEA/MI (Data Envelopment Analysis/Malmquist Index) 分析を適用して、多期間にわたって地域環境が改善されているかどうかを時系列的に評価することが試みられる。具体的には、1992年度から2007年度について、47都道府県の環境が家計に関する6つの変数を用いて評価される。環境の改善は本稿で評価された指標では年率で4.9%ずつ改善されたと解釈することができる。さらに、この改善は、環境への取り組みが相対的に劣った地域が優れた地域に追いつくことで環境が改善されるキャッチアップ効果よりも、制度や社会の変化によって以前にはなされなかった環境への取り組みが実現することによって環境が改善されるフロンティア・シフトによる効果の方が大きいことがわかった。

### 1. はじめに

多くの自治体において、環境への取り組みを点検・評価するために、環境指標として数値目標が掲げられている。こうした自治体による環境指標は、目標値と現状値を比較することで、環境行政の中で計画 (Plan)、実施 (Do)、評価 (Check)、見直し (Action) という PDCA サイクルを実現するための役割を担っている。田中・坂本 (2009) は全都道府県の環境基本計画で設定されている数値目標延べ2,936項目を分析している。それによれば、水・下水、自然環境、ごみ再資源の分野では特に重点的に指標が設定されている傾向がある。また、100項目以上の指標を設定している地域が9府県ある反面で20項目以下の地域が6道県あり、数値目標の設定に対する姿勢は地域によってかなり異なることが示されている。こうした環境指標は地域間の比較を目的としているわけではないので、リサイクル率や温室効果ガス排出量のように地域間で比較が可能な指標と、当該地域のみが発表している指標のように地域間で比較が困難な指標が混在している。

地域間で比較可能なタイプの指標にしても、ある指標についてはA県がB県よりも優れているが、別の指標ではB県がA県よりも優れているという場合には総合的にどちらが優れているのかを判断することは困難である。考えられる方法の一つは何らかの固定的なウエ

ートを決定して比較することだが、どのようなウェイトを用いるべきかを定めることは容易ではない<sup>1)</sup>。そこで、筆者は本間 (2011) において一般に公表されている統計に基づいて、多次元の地域環境に関するデータを単一の指標で評価する総合環境指標を提案した。そこでは、包絡分析法 (Data Envelopment Analysis, 以下 DEA) によるアプローチが適用された。

DEA は Charnes et al. (1978) によって提案された効率性評価手法で、より少ないインプット (例えば、労働、資本、エネルギーなど) で大きなアウトプット (例えば、生産高、GDP など) を産出しているほど効率的と評価される。DEA は、ノンパラメトリックな手法なので特定の関数形を仮定する必要がないことや複数のインプットとアウトプットがあるシステムの分析が可能であることから幅広い分野で応用されてきた<sup>2)</sup>。

一般の DEA の分析では、生産過程における投入と産出のように物理的に関連した変数が用いられる。それに対して、Hashimoto and Ishikawa (1993) は小さい方が望ましい変数をインプット、大きい方が望ましい変数をアウトプットとして DEA を適用することで、多次元のデータを単一の指標で評価することを提唱し、47都道府県を単位人口当たりの犯罪発生率、交通事故死傷者率、自殺率、企業倒産率、1人当たり病床数、平均所得、水質基準達成率、1人当たり部屋面積を用いて総合評価している。このように、DEA を一種のランキング・ツールとして適用した研究は、Murias et al. (2006), Somarriba and Pena (2009), Zhu (2001) などがある。また、DEA とオペレーティング・リサーチの手法を組み合わせで持続可能性を評価した研究に Hafezi and Torabi (2010), Reig-Martínez (2012) などがある。上掲の本間 (2011) では、Hashimoto and Ishikawa (1993) の考え方を援用して、小さい方が望ましい5変数 (10万人当たり典型七公害苦情件数、1人1日当たりごみ排出量、1人当たり産業廃棄物排出量、1,000平方キロ当たり産業廃棄物不法投棄量、1人当たり電灯使用量) をインプット、大きい方が望ましい5変数 (下水道普及率、河川水質環境基準達成率、1人当たり都市公園面積、森林率、10万人当たり環境 NGO 団体数) をアウトプットにして、47都道府県の総合的な環境評価を試みた。さらに、評価の際の効率的フロンティアに基づいて非効率な地域を効率化したときの目標値を示した。

DEA は基本的にはある一時点での相対評価であるので<sup>3)</sup>、時系列的な分析では

---

1) 環境指標「身近な環境「ちえつくどう」」(八王子市・田中廣滋研究室 (2003, 2007) では、各項目のエコ数を集計することで地域環境を総合的に診断することが可能となっている。

2) 我が国の環境面からの分析としては、Honma and Hu (2008, 2009ab), 宗像・本間 (2012) を参照。

3) DEA には多期間を分析する window analysis とよばれる手法もあるが、サンプル期間の期首・期末の扱いや計算の複雑さという問題があるためにあまり用いられていない。この点については

Malmquist 生産性指数に DEA の枠組みを適用した DEA/MI (Data Envelopment Analysis/Malmquist Index) 分析がなされることが多い。Malmquist 生産性指数は Malmquist (1953) で提唱された生産性評価指標で、Färe et al. (1989, 1994ab) によってフロンティアからの距離の計測に DEA を用いる DEA/MI 分析が確立された。DEA/MI 分析は国や地域の全要素生産性 (total factor productivity) を評価するために幅広い分野で適用されてきた。その理由の一つとして、DEA/MI 分析は生産性の変化を相対的な効率性の改善であるキャッチアップ効果 (catch-up effect) と技術革新による効果であるフロンティア・シフト (frontier shift) に分解して示せることがあげられる。

上で述べた DEA を評価手法として適用した応用研究の中で Malmquist 生産性指数を用いたものは、47都道府県の生活の質 (Quality of Life) を分析した Hashimoto et al. (2009)、世界各国の国家の安定度を分析した Tsuneyoshi et al. (2012) がある。環境経済学で DEA/MI 分析を適用した研究として、全要素生産性の枠組みでエネルギー生産性を分析した Honma and Hu (2009b) と Chang and Hu (2010)、GDP と環境負荷との比として定義された eco-efficiency を計測した Kortelainen (2008) などがある。

本稿の目的は、DEA/MI 分析を我が国の47都道府県の環境データに適用して、動学的な環境の総合評価を行うことである。筆者は本問 (2011) で多次元の環境データを DEA によって単一の環境指標に集約することを試みたが、そこでの分析は2007年度のデータに基づいた一時点での評価という点では限界があった。ある一時点において環境がよいかどうかを地域間で比較することは重要ではあるが、多期間にわたって環境が改善されているかどうかを時系列的に評価することも重要であろう。本稿の特徴は、第1にインプットの変数とアウトプットの変数の間に直接的な物理的関係が存在しないことである<sup>4)</sup>。通常の生産性分析でのインプットとアウトプットの間には労働、資本と産出物のような物理的関係が存在するが、本稿では、本問 (2011) と同様に、インプットには小さい方が望ましい変数、アウトプットには大きい方が望ましい変数がとられる。第2に、DEA/MI 分析によって、環境の変化がキャッチアップ効果とフロンティア・シフトに分解して示されることである<sup>5)</sup>。

本稿の構成は以下の通りである。第2節では、はじめに DEA と Malmquist 生産性指数の概念を説明して DEA/MI 分析によって環境とその変化を評価する方法を述べて、具体的

---

Cooper et al. (2006, pp. 324-328) を参照。

4) Kortelainen (2008), Honma and Hu (2009b), Chang and Hu (2010) はいずれも Malmquist 指数を適用した環境経済学の研究だが、アウトプットに GDP をとっている点で本稿とは異なる。

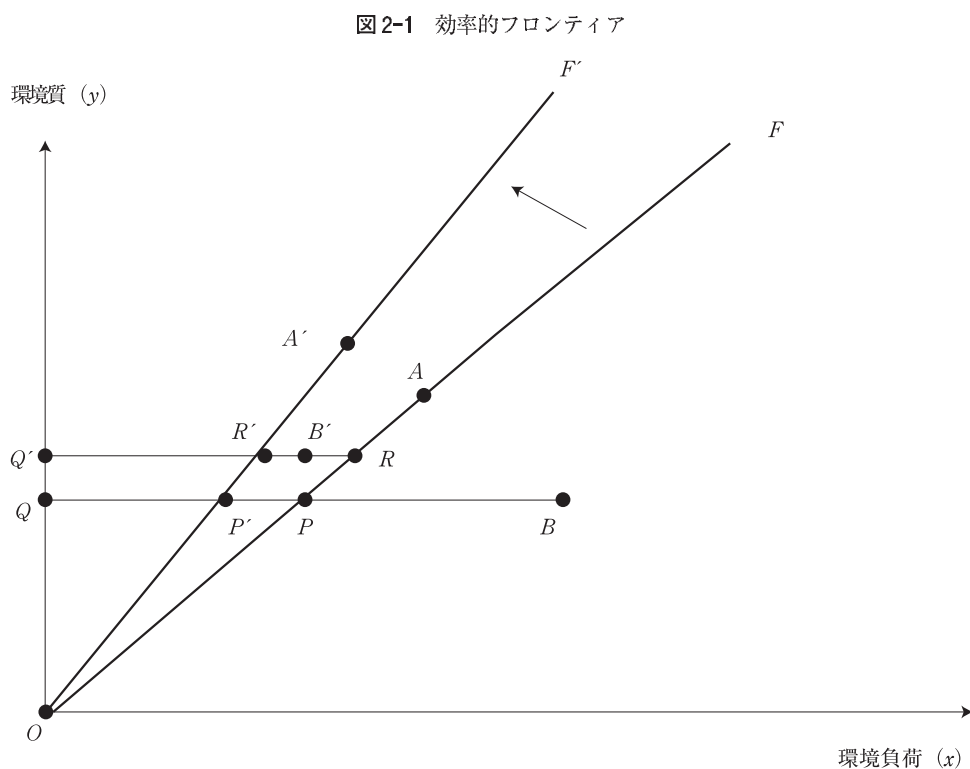
5) 通常の生産に関する DEA/MI 分析では、キャッチアップ効果は非効率な経済主体が生産フロンティアに近づく効果、フロンティア・シフトは生産フロンティアが技術革新でシフトする効果を意味する。

な計算方法を説明する。第3節では、データの概要と推移について説明する。第4節では、DEA/MI分析による計測結果を示す。はじめに全国平均で環境改善の変化と累積のそれぞれをキャッチアップ効果とフロンティア・シフトに分解した結果を示す。次に、各都道府県の結果を、本間(2011)で用いたのと同じDEAによる評価値とともに示す。さらに、DEA/MI分析で最上位の新潟県と最下位の宮城県をとりあげて、環境改善の累積変化を図示して考察する。第5節はまとめである。

## 2. DEA/MI分析による環境変化の評価

### 2-1 Malmquist生産性指数の概念

本稿で適用されるMalmquist指数を用いた環境変化の評価手法を図2-1を用いて説明しよう<sup>6)</sup>。ただし、 $y$ は大きいほど望ましい環境質(例えば、水質)、 $x$ は環境負荷(例えば、排水量)としよう。



6) 本節でのDEA/MI分析の説明はFäre et al. (1994b), Hashimoto et al. (2009)に基づく。

$t$ 期の地域  $A$  と地域  $B$  の状態はそれぞれ図の点  $A$  と点  $B$  で表わされるとしよう。 $t+1$ 期の状態はそれぞれ点  $A'$  と点  $B'$  で表わされるとする。ところで、家計、企業、政府といった経済主体が環境保全に向ける費用、労力、時間には限りがあるであろう<sup>7)</sup>。そのため、環境質と環境負荷には物理的な直接的関係はないとしても、実現可能な環境質と環境負荷の組み合わせは、ちょうど生産プロセスにおける投入と産出の関係のように、ある領域に限定されると考えられる。環境質の各水準とそれに対して実現可能な環境負荷との組み合わせを効率的フロンティアとよぶことにすれば、 $t$ 期と $t+1$ 期の効率的フロンティアはそれぞれ  $OF$ 、 $OF'$  で与えられる。なお、本稿では規模に関して収穫一定が仮定される。

本問(2011)で提案されたように、通常の生産分析によるDEAのアナロジーで、 $x$ と $y$ を用いて地域の環境の状態を評価することができる。地域  $B$  の評価値は  $QP/QB$  で与えられる。なぜならば、地域  $B$  は環境負荷を  $QB$  から  $QP$  に削減しても環境質  $OQ$  を実現できるからである<sup>8)</sup>。点  $P$  は環境質  $OQ$  を実現する最小の環境負荷に対応する点で、地域  $B$  の環境を改善する案の一つといえる。点  $P$  は地域  $B$  の参照点 (reference point) とよばれる。これがDEAによる評価である。

次に、Malmquist 生産性指数による異時点間の評価について説明しよう。 $t$ 期から $t+1$ 期への評価値の変化

$$CU = \frac{QR'/QB'}{QP/QB} \quad (1)$$

は、相対的な環境パフォーマンスの改善あるいは悪化の程度を示しているといえる。 $CU$  は通常の生産性分析ではキャッチアップ効果とよばれ、非効率な経済主体が改善して効率的フロンティアに近づいた効果を表わしている。本稿では、キャッチアップ効果は環境への取り組みが相対的に劣った地域が優れた地域に追いつくことで環境が改善される効果を指すものと定義する。 $CU > 1$  ならば相対的に環境が改善していることを意味し、 $CU < 1$  ならば相対的に環境が悪化していることを意味する。 $CU = 1$  ならば変化なしである。

ところで、環境保全に関して、新しい制度の導入や社会的意識の向上によって、所与の環境質がより少ない環境負荷で実現可能となるであろう。こうした変化は図では効率的フロンティアの  $OF$  から  $OF'$  へのシフトによって示される。それによって、点  $B$  の参照点は  $t$ 期の点  $P$  から  $t+1$ 期には点  $P'$  となる。こうした効果は一般の生産性分析ではフロンティア・シフト (frontier shift, 以下 FS) とよばれ、技術進歩によって効率的フロンティアが

7) 例えば、Choe and Fraiser (1999) は廃棄物の理論分析で家計のごみ削減努力を仮定している。

8) これは、収穫一定を仮定した入力志向のDEAによる効率性評価の定義である。

上方にシフトした効果を表わす。本稿では、フロンティア・シフトは制度や社会の変化によって以前にはなされなかった環境への取り組みが実現することによって環境が改善される効果を指すものと定義する。具体的には、国が各都道府県に対してフォーマルあるいはインフォーマルに働きかけることでリサイクルが行われたり、住民の環境意識が向上することで節電・節水や資源ごみの分別が行われたりする場合を想定する。すなわち、FSは制度、技術、社会的意識の変化によって環境への取り組みが底上げされた変化と解釈する。

点*B*のフロンティア・シフトは

$$FS_t = \frac{QP}{QP'} = \frac{QP/QB}{QP'/QB} \quad (2)$$

で、点*B'*のフロンティア・シフトは

$$FS_{t+1} = \frac{QR}{QR'} = \frac{QR/QB'}{QR'/QB'} \quad (3)$$

でそれぞれ表わすことができる。基準となる時点をどちらかにとる恣意性を避けるために、Färe et al. (1994ab) に従って両者の幾何平均をとれば、2期間のフロンティア・シフトを

$$FS = \sqrt{FS_t \cdot FS_{t+1}} \quad (4)$$

と定義することができる。 $FS > 0$ ならば社会全体が環境を改善する方向に変化したと解釈することができるし、逆に $FS < 0$ ならば社会全体が環境を悪化する方向に変化したと解釈することができる。

*t*期のフロンティアに基づく効率値の変化と*t*+1期のフロンティアに基づく効率値の変化の幾何平均をとれば、Malmquist生産性指数

$$MI = \left( \frac{QR'/QB'}{QP'/QB} \cdot \frac{QR'/QB'}{QP'/QB} \right)^{1/2} \quad (5)$$

を得る。ここで、幾何平均をとっているのは、基準となる時点を選択する恣意性を避けるためである。(5)は

$$MI = \frac{QR'/QB'}{QP'/QB} \left( \frac{QP}{QP'} \cdot \frac{QR}{QR'} \right)^{1/2} = CU \cdot FS \quad (6)$$

と書き換えられることから、Malmquist指数はキャッチアップ効果とフロンティア・シフトの積としても表わすことができる。Malmquist指数もキャッチアップ効果やフロンティ

ア・シフトと同様に,  $MI > 1$  ならば環境が改善し,  $MI < 1$  ならば環境が悪化したといえる。

## 2-2 Malmquist 生産性指数の計算方法

2-1の説明では環境負荷と環境質が1つずつだったが, 実際にはそれぞれ複数の要素がある。次に複数の環境負荷と環境質がある場合の効率値の導出を説明しよう。いま  $n$  種類の環境負荷と  $m$  種類の環境質があるとしよう。 $t$  期の地域  $j(j=1, \dots, J)$  の環境負荷のベクトルを  $\mathbf{x}^j=(x_{1j}^t, \dots, x_{nj}^t)$ , 環境質のベクトルを  $\mathbf{y}^j=(y_{1j}^t, \dots, y_{mj}^t)$  と記すことにする。 $t$  期のフロンティアに基づく  $t$  期の地域  $j$  の評価値  $\theta_j^{t,t}$  は

$$\begin{aligned} \min \theta_j^{t,t} \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^J \lambda_k \mathbf{y}^k &\geq \mathbf{y}^j, \\ \sum_{k=1}^J \lambda_k \mathbf{x}^k &\leq \theta_j^{t,t} \mathbf{x}^j, \\ \lambda_k &\geq 0, k=1, \dots, J, \end{aligned} \quad (7)$$

で与えられる<sup>9)</sup>。ここで,  $\theta_j^{t,t}$  と  $\lambda_k$  は線形計画問題の決定変数である。(7)で求められる  $\theta_j^{t,t}$  は古典的な DEA による効率値である。 $\theta_j^{t,t}$  は 0 と 1 の間をとり, 1 に近いほど望ましい。図 2-1 で  $QP^*/QB$  は  $t+1$  期の効率的フロンティアに基づいて  $t$  期の地域  $B$  の効率値を評価していることを意味する。このように異なる期の効率的フロンティアで評価する場合,  $s$  期の効率的フロンティアに基づく  $t$  期の地域  $j$  の効率値  $\theta_j^{t,s}$  は

$$\begin{aligned} \min \theta_j^{t,s} \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^J \lambda_k \mathbf{y}^k &\geq \mathbf{y}^j, \\ \sum_{k=1}^J \lambda_k \mathbf{x}^k &\leq \theta_j^{t,s} \mathbf{x}^j, \\ \lambda_k &\geq 0, k=1, \dots, J, \end{aligned} \quad (8)$$

で解くことができる。このとき, 注意すべきことは, (8)の1つ目と2つ目の制約式の左辺に  $t$  期の地域  $j$  に関する値が含まれないことである。これは Andersen and Pateresen (1993) が提唱した DEA exclusion model として効率値を計算していることを意味しており,  $\theta_j^{t,s}$  は

9) 本問 (2011) ではウェイトがゼロとなって効率性の計算で無視される変数が生じることを回避するために領域限定法 (assurance region method) を用いたが, 本稿では Malmquist 指数を導出する関係上, 領域限定法は用いなかった。

1より大きい値を取り得る。

結局、地域とフロンティアの時点が同じ場合には(7)で効率値を計算し、各々の時点が異なる場合には(8)で効率値を計算すれば、(1)、(4)はそれぞれ

$$CU = \frac{\theta_j^{t+1,t+1}}{\theta_j^{t,t}} \quad (9)$$

$$FS = \left( \frac{\theta_j^{t,t}}{\theta_j^{t+1,t+1}} \frac{\theta_j^{t+1,t}}{\theta_j^{t+1,t+1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

と求めることができる。以上の考察から(6)は

$$MI = \frac{\theta_j^{t+1,t+1}}{\theta_j^{t,t}} \left( \frac{\theta_j^{t,t}}{\theta_j^{t+1,t+1}} \frac{\theta_j^{t+1,t}}{\theta_j^{t+1,t+1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

と定式化できることが明らかである。

### 3. データ

本稿では、1992年度から2007年度までの16年間に関して47都道府県の環境が分析される。DEA/MI分析では、変数の選択は結果に大きな影響を及ぼすことから慎重に選択しなければならない。とはいえ、利用可能な長期的に整備された統計は多くはなく、実際には変数についてはあまり選択の余地はなかった。

表3-1 変数の一覧

性質	変数名 (単位)
プラス	リサイクル率 (%)
	1人当たり都市公園面積 (㎡/人)
	公共下水道普及率 (%)
マイナス	1人1日当たりごみ排出量 (g/人・日)
	世帯当たり年間電力使用量 (kWh/世帯)
	世帯当たり上水道使用量 (㎡/世帯)

本稿では、家計に直接関係の深い変数として、表3-1で掲げられた6つを採用した。大きければ大きいほど望ましい変数としてリサイクル率、1人当たり都市公園面積<sup>10)</sup>、公共下水道普及率がとられる。小さければ小さいほど望ましい変数として、1人1日当たりごみ排出

10) 民力に収録されている都市公園面積データは、データ源を総務省「公共施設状況調」から国土交通省「都道府県別1人当たり都市公園等整備現況」に変更した関係で2007年度末の都市公園面積が得られないので、やむを得ず都市公園面積は2008年度末の数値を用いた。



量、世帯当たり年間電力使用量、世帯当たり上水道使用量がとられる。通常の DEA では、前者はアウトプット、後者はインプットに相当する。データの出所は、世帯当たり年間電力使用量、世帯当たり上水道使用量、1人当たり都市公園面積、公共下水道普及率は WEB 民力（朝日新聞社）から得た。ただし、世帯当たりの数値はやはり民力の世帯数（年度末）を用いて算出した。1人1日当たりごみ排出量とリサイクル率は、1998年度以降は環境省「一般廃棄物処理実態調査結果」として公開されているデータを用いた。1997年度以前の公開されていないデータは別途環境省から入手した。

分析に先立って、図3-1で各変数の推移を確認しておこう。各変数について1992年度の値を100として標準化すると、2007年度にはリサイクル率が254、下水道普及率が153、1人当たり都市公園面積が141、世帯当たり年間電力使用量が124と増加しているのに対して、1人1日当たりごみ排出量は99とほぼ横ばい、世帯当たり上水道使用量は79と減少している。デ

図3-1 各変数の変化（全国、1992年度=100）

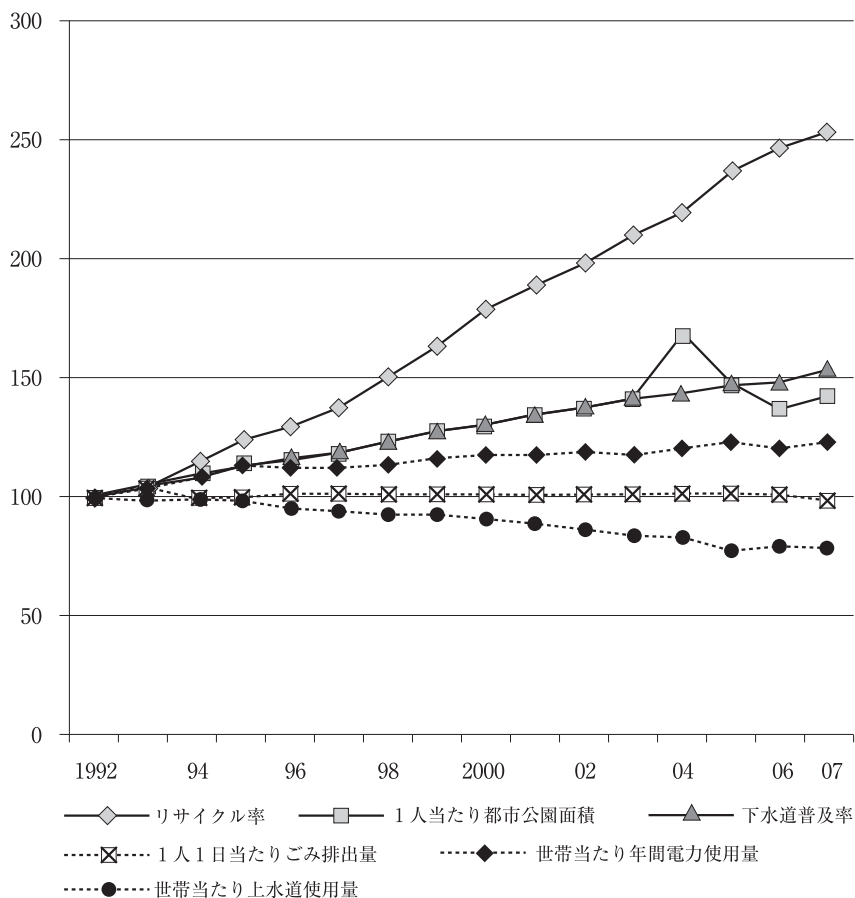


表 3-2 データの記述統計量

変数	期間	平均値	標準偏差	最大値	最小値
リサイクル率 (%)	1992年度	8.048	4.075	22.581	2.546
	2000年度	14.538	3.468	20.700	5.400
	2007年度	19.860	4.274	31.171	10.886
	1992年度～2007年度	14.015	5.458	31.821	1.800
1人当たり都市公園面積 (㎡/人)	1992年度	6.760	2.285	15.865	3.467
	2000年度	9.062	3.233	23.914	4.862
	2007年度	10.315	3.441	23.332	4.323
	1992年度～2007年度	8.925	3.425	27.362	3.467
公共下水道普及率 (%)	1992年度	33.872	18.682	90.000	4.000
	2000年度	48.830	19.668	97.000	10.000
	2007年度	60.340	19.276	98.800	12.100
	1992年度～2007年度	47.615	20.920	98.800	4.000
1人1日当たりごみ排出量 (g/人・日)	1992年度	1,035	171	1,524	742
	2000年度	1,081	118	1,379	850
	2007年度	1,061	140	1,711	895
	1992年度～2007年度	1,057	133	1,711	733
世帯当たり年間電力使用量 (kWh/世帯)	1992年度	4,571	480	5,773	3,453
	2000年度	5,535	586	7,271	4,354
	2007年度	5,887	694	8,254	4,505
	1992年度～2007年度	5,367	679	8,254	3,453
世帯当たり上水道使用量 (㎡/世帯)	1992年度	367.364	70.838	517.897	242.304
	2000年度	342.645	60.553	466.192	234.390
	2007年度	301.963	47.851	395.009	216.980
	1992年度～2007年度	337.829	64.192	517.897	129.418

一タの記述統計量は表 3-2 の通りである。

## 4. 結 果

### 4-1 環境改善の計測と分解

はじめに、全国平均で1992-2007年度における環境の変化をみることにしよう。図 4-1 は、キャッチアップ効果、フロンティア・シフト、Malmquist 指数の推移を描いたものである。Malmquist 指数はつねに1を上回っていることから、全国平均では全期間を通じて環境が改善されたといえる。1992/1993年度を除いて、一貫してフロンティア・シフトがキャッチ