

戦後の日本における農業部門の余剰物質と環境効率性の推計

The estimation of surplus materials and the eco efficiency in the agricultural sector after the World War II in Japan

森 脇 祥 太
拓殖大学国際学部准教授

I. はじめに

本研究の目的は日本の農業部門（＝農業＋畜産）を対象として、余剰物質の長期的系列（1961年～2005年）を推計することである。また推計された余剰物質を考慮した DEA（＝Data Envelopment Analysis：包絡分析法）によって環境効率性の値を計測する。

発展途上国の経済発展にとって、円滑な工業化を推進するために農業部門の発展は極めて重要である。特に戦後、工業化に成功した東アジア諸国においてはその背景に農業部門の発展があった。しかし、それら諸国では耕地面積が狭小な場合が多く、1人当たりの農業生産（＝労働生産性）を高めるためには、耕地面積当たりの農業生産（＝土地生産性）を高める必要があった。土地生産性を高めるためには、機械的技術（＝M 技術）よりも生物的・化学的技術（＝BC 技術）により多くを依存する必要がある。その結果、東アジア諸国の農業部門においてはその他諸国と比較して相対的に多くの肥料及び飼料を使用する状況が生じたと考えられる。

図1は2002年の東アジア諸国及び欧米諸国の耕地面積当たりの肥料投入量である。韓国、中国、日本、マレーシア、ベトナムはヨーロッパ諸国や米国を大きく上回る値となっている。肥料や飼料が限られた面積の農地において大量に使用された時、余剰物質の問題が生じることになる。

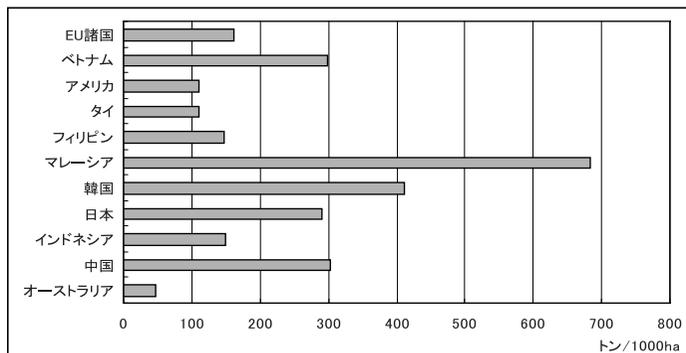


図1 耕地面積当たりの肥料投入量

(注)『FAOSTAT』のデータを使用して筆者作成。

肥料や飼料には様々な栄養素が含まれている。そして、それらの成分は農産物の生育のために使用され、蓄積される部分と使用されなかったり、排泄されたりする余剰部分に分かれることになる。その結果、余剰部分がリサイクルされずに土壌に蓄積されると土壌汚染はもちろんのこと、水質汚染や酸性雨等、様々な農業由来の環境汚染の原因物質となる可能性がある¹。そして、農業部門における余剰物質の問題は、東アジア諸国の中でも、持続的な農業部門の発展を必要とする発展途上地域において特に深刻化すると考えられる。図1の中でも現時点で耕地面積当たりの肥料投入量が小さいタイ、フィリピン、インドネシア等の国々では経済発展が進行するにつれて、韓国や日本と同じく耕地面積当たりの肥料投入量が増加する可能性がある。また現時点でも耕地面積当たりの肥料投入量が多いベトナムや中国では将来的により一層多くの余剰物質が生じる可能性がある。

本研究の推計期間(1961年～2005年)において日本は発展途上国から先進国の局面へと移行を遂げるようになった。このような期間を対象に日本の農業発展を環境面から実証的に把握することによって、同じく土地生産性の上昇に取り組んでいる発展途上国における農業発展のための教訓を実証的に引き出すことが可能となろう。

日本農業を対象として余剰物質の推計を行った先行研究としては三島他(2004)、Shindo et al.(2009)が挙げられる。三島他(2004)は農業部門における余剰物質の中でも特に窒素に注目して1997年の市町村を対象とした余剰量の推計を行っている。またShindo et al.(2009)は1961年～2005年の日本全体及び都道府県を対象とした窒素余剰量の推計を行っている。Shindo et al.(2009)の推計結果は、1961年～2005年にかけて農地における窒素余剰量は日本全体で553,000トンから838,000トンに増大しており、都道府県レベルで窒素余剰量に格差が生じていることを確認している²。さらにOECD(2008)は日本を含んだOECD諸国を対象に1990年～2004年の期間の窒素及びリンの余剰量の推計を行っている。その結果、推計期間を通じて日本の余剰量は減少していることが確認された。

以上の先行研究は余剰物質の推計を行う際に基本的には「Soil Surface Method(=SSM)」を使用している³。SSMは様々な物質の土壌への投入と産出の差によって余剰物質の量を計測する手法である。窒素を例にとった場合、投入要素として考えられるのが化学肥料、家畜の排泄物、生物学的窒素固定、大気中に含まれる部分等となる。そして、産出は土壌を使用して生産される農産物となり、投入要素に含まれる窒素成分から産出を差し引いた値が余剰物質の量となる。

一方、農業部門を取り巻く全ての環境を含んで余剰物質の計測を行うSSMとは異なり、ある特定の部門のみを推計の範囲と考え余剰物質の量を計測するための方法として「Farm Gate Method(=FGM)」が存在する。投入と産出の差として余剰物質の量を計測する概念はFGMと

¹ 余剰物質による環境汚染の詳細については西尾(2005)の第4章が詳しい。

² 窒素余剰量は北海道が最も大きい。詳しくはShindo et al.(2009)のpp.540に掲載されているTable5を参照のこと。

³ Shindo et al.(2009)が使用した推計方法は、農業から供給される食料が家庭で消費されることまでを勘案したより包括的なものとなっている。

SSM で類似している。しかし、FGM はある特定の産業部門のみを対象とすることが可能であり、例えば、畜産であれば、投入は飼料、産出は畜産物ということになる。飼料を与えられた動物による排泄物は考慮せず、投入と産出の間にある過程は一種の「ブラック・ボックス」とみなす。

FGM における投入産出関係は経済学で定義される投入産出関係と類似しており、農業由来の環境問題を経済的に評価するためにふさわしい推計方法と考えられている⁴。また Oenema et al. (2003) は FGM は推計方法が SSM より単純であり、計測に使用されるデータの精度も高いことから推計上の誤差も SSM より低いとしている⁵。

長期的な日本の農業発展の過程を対象に FGM を使用して余剰物質の量を推計した先行研究は少ないと考えられる。また SSM を応用した先行研究である Shindo et al. (2009) は余剰物質として窒素に焦点をあてた分析を行っているが、本研究では窒素とあわせてリンの余剰量の推計を行う。リンは窒素と同じく農業由来の環境問題の原因物質とされている。

さらに本研究では、推計された窒素及びリンの余剰量を考慮した DEA により、長期的な日本農業の環境効率性の計測を行う。農業の場合、ある生産主体は労働、資本、土地といった生産要素を使用して生産活動を行い、付加価値で示される生産物が生み出されることになる。経済学では投入された生産要素と生産物の関係から様々な効率性の指標が実証研究に使用されてきた。しかし一方、生産活動においては、desirable goods (=望ましい財) が生み出されると同時に、副次的に undesirable goods (=望ましくない財) が生み出される場合がある。

生産活動において望ましい財と望ましくない財が同時に生み出されることを考慮した効率性を「環境効率性」とすれば、その推計方法の一つとして DEA による方法が存在しており、様々な意味を持つ「環境効率性」が過去に推計されてきた。それらの先行研究の中で代表的なものとして Färe et al. (1989)、Chung et al. (1997)、Färe and Grosskopf (2003)、Färe et al. (2004) 等を挙げることが出来る。これらの研究では望ましい財には strong disposability、望ましくない財には weak disposability の仮定が課された推定が行われており、望ましくない財を削減する場合には同時に望ましい財を削減せざるをえないという意味でのコストが生じることが仮定されている。また余剰物質を考慮した DEA によって 1990 年～2003 年における OECD 諸国の農業部門の環境効率性の推計を行った先行研究としては Hoang and Coelli (2009) を挙げることができる。Hoang and Coelli (2009) は環境効率性の推計に通常の CCR モデルによる DEA の効率性の概念を使用しているが、同時に余剰物質を最小化するモデルの推計を行っており 2 つの推計結果を合わせて環境効率性を推計する方法を採用している。

通常、DEA によって環境効率性の値を推計する場合、多くの先行研究ではクロスセクション・データが使用されている。しかし、Färe et al. (2004) が使用したモデルは時系列データを使用した推計に応用可能であり、実際、Färe and Grosskopf (2003) でも使用されている。

Färe et al. (2004) は 1990 年の OECD 諸国を対象に望ましくない財を考慮して、投入・産出距

⁴ FGM と SSM の相違及び特徴に関する詳細については Hoang and Alauddin (2009) を参照のこと。

⁵ Oenema et al. (2003) の pp.11 の説明を参照のこと。

離関数を DEA によって推定した。Färe et al. (2004) は、産出距離関数によって、ある基準となる国と同量の生産要素を使用して、同量の望ましくない財を排出した場合、望ましい財の産出をどれだけ増加することができるかを示す指数（＝望ましい財の生産指数）を推計した。また投入距離関数を使用して、ある基準となる国と同量の生産要素を使用して同量の望ましい財を生産した場合、望ましくない財の排出量をどれだけ削減することができるかを示す指数（＝望ましくない財の生産指数）を推計した。そして、それらの指数の比から Hicks-Moorsteen 生産性指数を推計して、OECD 諸国内の相対的な環境効率性を推計した。

本研究では日本の時系列データを使用した余剰物質の推計を行うことから Färe et al. (2004) が使用したモデルによる環境効率性の推計を行う。Hoang and Coelli (2009) のモデルは後述の①式を満足する環境効率性の値を推計可能であるが、時系列データを使用した推定にふさわしいとは言えない。本研究では、推計された余剰物質は農業部門が生産活動を行う際に副次的に生み出される望ましくない財と考える。Färe et al. (2004) のモデルは、Hicks-Moorsteen 生産性指数として計測される環境効率性を望ましい財と望ましくない財の生産指数の双方に分解した分析を行うことができるという長所も存在する。Färe et al. (2004) のモデルを使用して日本の農業を対象に余剰物質を考慮した DEA によって環境効率性の値を推計した先行研究は少ないと考えられ、長期的な農業発展を「持続可能性」の観点から評価することを可能とする点では環境経済学や経済発展論における貢献が大きいと考えられる。

II. モデル

1. 余剰物質の推計

余剰物質の値は投入物に含まれる物質から産出に含まれる物質を差し引いて推計する。ある生産要素を x_n ($n=1, 2, 3, \dots$)、ある生産物を y_m ($m=1, 2, 3, \dots$) としよう。生産要素に含まれる何らかの栄養素の成分比率を a_i ($i=1, 2, 3, \dots$)、生産物に含まれる何らかの栄養素の成分比率を c_i とすれば、余剰物質 s_i の量は以下の式で求めることができる。

$$s_i = a_i x_n - c_i y_m \quad \dots \dots \textcircled{1}$$

①式は「物質収支」を示しており、 s_i の量が正の値であれば、農業部門では余剰物質が発生して環境に様々な悪影響を与えることになる。また負の値が続けば、持続的な農業生産が困難な状態になると考えられる。余剰物質の推計方法としては前節で説明したように SSM と FGM があるが、本研究では農業部門を対象を限定し、経済学的な分析を行うために FGM を採用する。また本研究では、特に農業と畜産が地上での農業由来の環境問題を引き起こす主要産業と捉えられることから、それらを合計した部門を農業部門として推計を行う。その場合、代表的な余剰物質として窒素とリンが深刻な環境問題を引き起こす事例が多く観察されることから、それぞれの数量を推計する。

2. Hicks-Moorsteen 生産性指数

本研究においては、1961 年以降の日本を対象に Färe et al. (2004) のモデルを使用して Hicks-Moorsteen 生産性指数によって環境効率性を推計する。以下では Färe et al. (2004) を参考に使用されるモデルについての説明を行う。

ある生産要素を x_n 、望ましい財を y_m 、望ましくない財を b_j ($j=1, 2, 3, \dots$) としよう。特定の生産主体の技術 T は以下のように表すことが可能である。

$$T = (x_n, y_m, b_j) \quad \dots \dots \textcircled{2}$$

この技術 T は生産要素 x を使用して望ましい財 y と望ましくない財 b を生産するような関係を表している。望ましい財と望ましくない財の生産を同時に行うことから、この技術は weak disposability と null-joint の性質を有するとしよう。weak disposability は、

$$(x_n, y_m, b_j) \in T \text{ であり、} 0 \leq \theta \leq 1 \text{ とすれば、} (x_n, \theta y_m, \theta b_j) \in T$$

と表される。weak disposability の性質を有する場合、望ましくない財が削減されれば同時に望ましい財も削減されることになる。null-joint は、

$$(x_n, y_m, b_j) \in T \text{ であり、} b=0 \text{ であれば、} y=0$$

と表される。この場合、望ましい財が生産されれば、必ず望ましくない財も生産されることになる。また、この技術 T は閉じており、かつ convexity となる性質を有しているとしよう。ここで以下のような産出距離関数 D_y を定義する。

$$D_y(x_n, y_m, b_j) = \inf\{\theta : (x_n, y_m/\theta, b_j) \in T\} \quad \dots \dots \textcircled{3}$$

③式においては、生産要素の投入量と望ましくない財の産出量が一定である場合、望ましい財の生産量は $1/\theta$ ($0 \leq \theta \leq 1$) だけ拡大可能となる⁶。ここである基準となる主体を o として、 l と k を比較するとしよう⁷。③式を使用すれば以下のような望ましい財の生産指数 Q_y を定義することが可能である。

$$Q_y(x_n^o, b_j^o, y_m^k, y_m^l) = \frac{D_y(x_n^o, y_m^k, b_j^o)}{D_y(x_n^o, y_m^l, b_j^o)} \quad \dots \dots \textcircled{4}$$

④式は、ある主体 l と k の間で基準となる主体 o と同量の生産要素を使用して望ましくない財を排出した場合、望ましい財をどれだけ増加することができるかを比較するための指標である。例えば、 $Q_y > 1$ である場合、 l よりも k の方が同量の生産要素を使用して望ましくない財を排出し

⁶ ③式においては望ましい財に関して規模に関して収穫一定の仮定が成立しているとする。

⁷ この方法ではクロスセクションデータを使用した企業間、もしくは国家間の比較が可能であり、時系列データを使用したある時点間の比較も可能である。

た場合の望ましい財の増加が大きく相対的に効率的であると言えよう。

一方、望ましくない財の場合、投入距離関数 D_b は以下のように定義される。

$$D_b(x_n, y_m, b_j) = \sup\{\lambda : (x_n, y_m, b_j/\lambda) \in T\} \quad \dots \dots \textcircled{5}$$

⑤式においては、生産要素の投入量と望ましい財の産出量が一定である場合、望ましくない財の排出量は $1/\lambda$ ($1 \leq \lambda$) だけ縮小可能となる⁸。望ましい財の場合と同様に、⑤式を使用すれば以下のような望ましくない財の生産指数 Q_b を定義することが可能である。

$$Q_b(x_n^o, y_m^o, b_j^k, b_j^l) = \frac{D_y(x_n^o, y_m^o, b_j^k)}{D_y(x_n^o, y_m^o, b_j^l)} \quad \dots \dots \textcircled{6}$$

⑥式においては、例えば、 $Q_b < 1$ である場合、 l よりも k の方が同量の生産要素を使用して望ましい財を生産した場合、望ましくない財の排出量が小さくなるため、相対的に効率的であると言えよう。望ましい財と望ましくない財の生産指数から以下のような Hicks-Moorsteen 生産性指数で示される環境効率性 $E^{k,l}$ を導出することが可能となる。

$$E^{k,l} = \frac{Q_y}{Q_b} \quad \dots \dots \textcircled{7}$$

$Q_y > 1$ 、 $Q_b < 1$ の場合、 l よりも k の方が効率的であるため、⑦式から、 $E^{k,l} > 1$ の場合、 l よりも k の方が効率的となる。望ましい財と望ましくない財が一種類の場合、環境効率性は単にそれらの値の比率となる。各主体の D_y と D_b の値は以下のような線形計画問題によって推計される。

$$\begin{aligned} (D_y(x_n^o, y_m^{k'}, b_j^o))^{-1} &= \max \theta \\ \text{s.t.} \\ \sum_{k=1}^K z_k y_m^k &\geq \theta y_m^{k'} && \dots \dots \textcircled{8} \\ \sum_{k=1}^K z_k b_j^k &= b_j^o \\ \sum_{k=1}^K z_k x_n^k &\leq x_n^o \\ z_k &\geq 0 \end{aligned}$$

⁸ 通常の投入距離関数は生産量を一定として生産要素を可能な限り縮小する倍率を推計する機会が多いが、ここでは望ましくない財が発生しているために、望ましくない財の排出量を縮小する倍率を推計する意味で投入距離関数という用語を使用している。

$$\begin{aligned}
 (D_b(x_n^o, y_m^o, b_j^{k'}))^{-1} &= \min \lambda \\
 \text{s.t.} & \\
 \sum_{k=1}^K z_k y_m^k &\geq y_m^o && \dots \dots \textcircled{8} \\
 \sum_{k=1}^K z_k b_j^k &= \lambda b_j^{k'} \\
 \sum_{k=1}^K z_k x_n^k &\leq x_n^o \\
 z_k &\geq 0
 \end{aligned}$$

本研究では時系列データを使用して推定を行う。その際、⑧式と⑨式の線形計画問題に解が存在するように仮想的な基準年を設定する。その基準年は農業部門の GDP が最も小さく、窒素とリンの余剰量及び各生産要素の使用量が最も大きい年のデータによって定義される⁹。言わば、基準年は使用されるデータの中で最も非効率な値を選んで作成されている。そのため、推定される環境効率性の値は仮想的な基準年と比較した値という意味を持つ。

III. データ

生産要素 x には労働力 L 、資本ストック K 、耕地面積 A 、望ましい財の生産量 y には農業部門の GDP を、望ましくない財の排出量 b には窒素とリンの余剰量をそれぞれ使用する。労働力は『長期経済統計 農林業』にある農業就業者の年末値を総務省による『労働力調査』の値に接続して使用した¹⁰。

資本ストックは以下のように推計した。まず『長期経済統計 農林業』にある動物、植物、農機具、建物の粗資本ストックと純資本ストックの値を使ってそれらの比率を推計し、『長期経済統計 農林業』の修正推計である Hayami et al. (1979) にある粗資本ストックに乗じてベンチマークとなる純資本ストック (1960 年度末値) を推計する¹¹。そして、それぞれの純資本ストックに JIP データベースで使用されている減価償却率 δ を考慮しながら農林水産省による『農業・食料関連産業の経済計算』に掲載されている設備投資 I を加えて推計した¹²。この場合、第 t 期の資本ストック K_t は以下の式で表される。

$$K_t = K_{t-1} (1 - \delta) + I_t \quad \dots \dots \textcircled{10}$$

耕地面積は農林水産省による『耕地及び作付面積統計』にある田と畑を合計した値を使用した。農業部門の GDP については『農業・食料関連産業の経済計算』に掲載されている年度値を暦年

⁹ このような基準の設定は Färe et al. (2004) でも行われている。

¹⁰ 『長期経済統計 農林業』の 219 頁を参照。

¹¹ 長期経済統計の資本ストックの系列は基本的に暦年値である。投資の系列は年度値であるため、ベンチマークとなる資本ストックの系列を暦年値から年度値に変換して推計を行った。

¹² 深尾・宮川 (2008) の 78 頁と 79 頁にある表 2-6 の値を使用した。

値に変換して使用した¹³。

窒素とリンの投入量は農業については肥料と種子、畜産業については飼料の消費量にそれぞれの成分比率を乗じて推計した。肥料と種子、飼料の消費量については『FAOSTAT』に掲載されている化学肥料と種子、食料需給表から得られる飼料の消費量を使用した。また窒素とリンの成分比率に関しては『食品成分表』に掲載されている品目の値を使用した。窒素とリンの産出量は『FAOSTAT』から得られる農産物と畜産物の生産量に投入量と同じ方法で得られる成分比率を乗じて推計した。余剰物質の推計方法に際して本研究では、投入と産出に FAO (=Food and Agriculture Organization) のデータを使用した推計を行っているため将来的に国際比較を行う上で有効と考えられる。投入と産出には FAO によって共通の基準で集められたデータを使用し、成分比率についてのみ各国の『食品成分表』を入手出来れば、国際比較可能な余剰量を推計することができる。

VI. 実証研究の結果

1. 余剰物質の推計結果

余剰物資の推計結果は表 1 のように示され、その結果は以下のようにまとめることができる。

- (1) 農産物に含まれる窒素及びリンの量は 1961 年～2005 年にかけて約 350,000 トンと約 75,000 トンから約 220,000 トンと約 48,000 トンへと減少している。
- (2) 畜産物に含まれる窒素及びリンの量は 1961 年～2005 年にかけて約 56,000 トンと約 5,000 トンから約 180,000 トンと約 17,000 トンへと大きく増加している。
- (3) 化学肥料に含まれる窒素の量は 1973 年に約 820,000 トン、リンの量は 1979 年に約 830,000 トンと最高値になる。その後、1970 年代～1980 年代にかけて上下に変動するが、2005 年には窒素の量は 1961 年の約 630,000 トンから約 480,000 トンへと減少しているが、リンの量は約 460,000 トンとなっており、1961 年の約 450,000 トンとあまり変わらない値となっている。
- (4) 飼料に含まれる窒素の量は 1988 年に約 460,000 トン、リンの量は 1986 年に約 72,000 トンと最高値になる。その後、1990 年代～2000 年代にかけて減少するが、2005 年には窒素の量は 1961 年の約 110,000 トンから約 320,000 トン、リンの量は 1961 年の約 15,000 トンから約 53,000 トンへと増加している。
- (5) 農業の総産出に含まれる窒素とリンの量は 1961 年から 2005 年にかけて約 410,000 トンと約 80,000 トンから約 400,000 トンと約 65,000 トンへと減少している。

¹³ 本研究で使用するデータは資本ストックのみが年度末値になっている。生産にかかるタイムラグを考慮するため資本ストックのベンチマーク・イヤーの値は 1960 年度末値を、他の変数は 1961 年末値をそれぞれ使用している。この場合、資本ストックが生産力を生じるのに 9 ヶ月間必要であることを仮定している。

(6) 農業の総投入に含まれる窒素とリンの量は 1979 年に約 1,150,000 トン、約 890,000 トンと最高値になる。その後、1980 年代～2000 年代にかけて減少するが、2005 年には窒素の量は 1961 年の約 740,000 トンから約 790,000 トンへとリンの量は 1961 年の約 470,000 トンから約 520,000 トンへと増加している。

(7) 農業の総余剰に含まれる窒素とリンの量は 1979 年に約 710,000 トン、約 820,000 トンと最高値になる。その後は低下傾向を示しているが、2005 年には窒素の量は 1961 年の約 330,000 トンから約 390,000 トンへと増加しており、リンの量は 1961 年の 390,000 トンから 450,000 トンへと増加している。

1961 年～2005 年にかけて日本の農業部門では総余剰が増加している。しかし、総余剰は単線的に増加するような傾向を示さない。年数を横軸に総余剰を縦軸にとった場合、総余剰は、逆 U 字曲線を描くように変化している。このような総余剰の変化に強い影響を与えているのは総投入に含まれる窒素とリンの動向である。量的な面での農業の縮小と畜産の増加の影響はあると思われるが、農業部門の総産出に含まれる窒素とリンの値は、推計期間にあまり大きく変化しない。一方、農業部門の総投入に含まれる窒素とリンの値は総余剰と同じく逆 U 字曲線を描くように変化している。また化学肥料と飼料に含まれる窒素とリンの値も総余剰の値と類似した動きを示しているが、化学肥料に含まれるリンの量は飼料に含まれるその値を大きく上回っている。その結果、飼料よりも化学肥料に含まれる余剰物質が総余剰の大きさに相対的に強く影響を与えらる。

表1 余剰物質の推計値（その1）

単位(トン)

	農産物		畜産物		化学肥料		飼料	
	窒素	リン	窒素	リン	窒素	リン	窒素	リン
1961年	352836	74741	55837	4999	633400	453990	108429	15250
1962年	352097	75780	61327	5562	659600	453410	116094	17579
1963年	330514	71099	64157	5965	687300	507520	125325	19484
1964年	324593	70567	71993	6712	668000	511000	144076	22474
1965年	326570	70248	78804	7307	690500	548000	147884	23397
1966年	320196	69824	81524	7527	745600	613600	160516	27357
1967年	345426	75995	86205	7951	775900	670000	178947	29804
1968年	345250	76096	92977	8697	775200	705000	211132	33005
1969年	324202	71976	103090	9703	739800	702100	227788	36749
1970年	298496	65528	112765	10505	688200	655900	237129	40074
1971年	264886	57752	117196	10823	676000	661400	234890	41421
1972年	281582	61435	122407	11200	733000	729700	262571	45094
1973年	277898	61212	125358	11362	821200	793000	279911	46692
1974年	274763	61258	128640	11510	690800	692400	276168	46780
1975年	285568	64433	129105	11601	653000	623300	261350	44726
1976年	265225	59135	134809	12163	702000	737000	282114	48123
1977年	289420	64863	144788	13060	716000	747000	353372	58201
1978年	283803	62233	155225	13943	723000	775000	345956	59526
1979年	279249	60716	163388	14640	777000	831000	371672	63382
1980年	246011	52489	165655	14800	614000	690000	377003	62312
1981年	255534	54679	164256	14778	643000	701000	366127	58930
1982年	265045	55981	169667	15209	683000	721000	363935	59402
1983年	260630	55688	173574	15629	701000	765000	387384	60783
1984年	287222	61756	176717	15898	697200	770000	415699	66677
1985年	284042	61140	183908	16479	680000	731000	405791	67191
1986年	284928	61406	186147	16713	693000	753000	450779	72316
1987年	273430	57887	190742	16999	669000	766000	448355	71407
1988年	261720	55194	192805	17301	640000	726000	460277	71221
1989年	267198	56570	194844	17721	641000	728000	424594	69494
1990年	263255	56441	192812	17681	612000	690000	427833	68604
1991年	242370	51825	192336	17749	576000	696000	417606	67511
1992年	253239	55159	194115	18101	572000	699000	409916	66344
1993年	202583	43364	192825	18088	600000	728000	400762	65641
1994年	260045	58416	187013	17592	580400	703600	371913	61577
1995年	242487	53600	183614	17374	527500	631400	390129	61787
1996年	235734	51991	183311	17547	511700	610100	361215	58845
1997年	232701	50992	184075	17595	495200	592500	373666	60761
1998年	216020	46677	181967	17406	476000	561300	336850	57322
1999年	220934	47704	181091	17286	479500	570400	338702	56573
2000年	228349	49320	179952	17243	487400	583000	322579	54512
2001年	225021	47960	177345	16958	484000	511000	321773	53647
2002年	223872	47679	180629	17202	463000	482000	337941	55683
2003年	205398	43156	180553	17213	474096	459288	323210	54280
2004年	216066	46372	178803	17032	489391	479756	327917	53827
2005年	223000	47916	179757	17054	477298	463428	315610	52579

(注)『FAOSTAT』と『食品成分表』より筆者推計。その2も同じ。

表 2 余剰物質の推計値（その 2）

	単位(トン)					
	農業総産出		農業総投入		総余剰(投入一産出)	
	窒素	リン	窒素	リン	窒素	リン
1961年	408673	79740	741829	469240	333156	389500
1962年	413425	81342	775694	470989	362269	389647
1963年	394671	77064	812625	527004	417953	449941
1964年	396587	77279	812076	533474	415490	456196
1965年	405373	77554	838384	571397	433011	493842
1966年	401720	77351	906116	640957	504395	563606
1967年	431631	83947	954847	699804	523216	615858
1968年	438227	84793	986332	738005	548106	653212
1969年	427292	81679	967588	738849	540296	657170
1970年	411261	76033	925329	695974	514068	619941
1971年	382083	68575	910890	702821	528807	634246
1972年	403989	72635	995571	774794	591582	702158
1973年	403256	72574	1101111	839692	697854	767118
1974年	403404	72768	966968	739180	563564	666412
1975年	414673	76034	914350	668026	499677	591992
1976年	400034	71298	984114	785123	584079	713825
1977年	434208	77923	1069372	805201	635164	727278
1978年	439027	76176	1068956	834526	629929	758350
1979年	442637	75356	1148672	894382	706035	819025
1980年	411666	67289	991003	752312	579336	685024
1981年	419790	69457	1009127	759930	589337	690473
1982年	434713	71190	1046935	780402	612222	709212
1983年	434205	71317	1088384	825783	654179	754466
1984年	463939	77654	1112899	836677	648961	759023
1985年	467950	77619	1085791	798191	617841	720572
1986年	471075	78119	1143779	825316	672704	747197
1987年	464172	74886	1117355	837407	653183	762522
1988年	454525	72495	1100277	797221	645752	724725
1989年	462042	74290	1065594	797494	603552	723203
1990年	456066	74122	1039833	758604	583767	684482
1991年	434705	69574	993606	763511	558900	693937
1992年	447353	73260	981916	765344	534563	692084
1993年	395408	61451	1000762	793641	605354	732190
1994年	447058	76008	952313	765177	505254	689169
1995年	426101	70974	917629	693187	491527	622213
1996年	419045	69538	872915	668945	453870	599407
1997年	416775	68586	868866	653261	452091	584675
1998年	397987	64083	812850	618622	414863	554539
1999年	402025	64989	818202	626973	416177	561983
2000年	408301	66563	809979	637512	401679	570949
2001年	402365	64918	805773	564647	403407	499729
2002年	404501	64881	800941	537683	396440	472802
2003年	385951	60369	797306	513569	411355	453200
2004年	394869	63404	817308	533583	422439	470178
2005年	402757	64971	792908	516007	390151	451036

(注) 農業総産出は農産物と畜産物、農業総投入は化学肥料と飼料の合計値である。

2. 環境効率性の推計結果

表3は環境効率性の推計結果であり、以下のようによまとめられる。

- (1) 望ましい財の生産指数の値は 1961 年の 1.066 から 2005 年の 1.525 へと上昇している。
- (2) 望ましくない財の生産指数の値は 1961 年の 0.686 から 2005 年の 0.592 へと低下している。
- (3) 環境効率性の値は 1961 年の 1.554 から 2005 年の 2.576 へと上昇している。

推計結果によれば、仮想的に設定した最も非効率なケースと比較して農業部門の GDP は 1961 年には 1.066 倍に増加可能であったが、2005 年には 1.525 倍に増加可能となったことを示している。また最も非効率なケースと比較して農業部門の望ましくない財は 1961 年には 0.686 倍に縮小可能であったが、2005 年には 0.592 倍に縮小可能となったことを示している。推計期間を通じて望ましい財の生産指数は上昇、望ましくない財の生産指数は低下していることから、1961 年と比較して 2005 年の環境効率性の値は上昇することになった。望ましい財と望ましくない財の両面からの改善効果によって環境効率性は上昇していることになろう。

また望ましい財の生産指数が最も高い値を示したのは 2004 年の 1.554 であり、望ましくない財の生産指数が最も低い値を示したのは 1979 年の 0.326 である。環境効率性の値は 1979 年の 3.469 が最も高い値となっており、環境効率性の動向は、単線的に上昇する傾向が強い望ましい財よりも望ましくない財の生産指数の影響を相対的に強く受けていると言えそうである。

表3 環境効率性の推計結果

	望ましい財の 生産指数	望ましくない 財の生産指数	環境効率性
1961年	1.066	0.686	1.554
1962年	1.058	0.681	1.554
1963年	1.064	0.590	1.803
1964年	1.054	0.583	1.808
1965年	1.074	0.540	1.989
1966年	1.076	0.472	2.280
1967年	1.017	0.443	2.296
1968年	0.989	0.432	2.289
1969年	1.045	0.456	2.292
1970年	1.100	0.471	2.335
1971年	1.177	0.453	2.598
1972年	1.143	0.397	2.879
1973年	1.128	0.347	3.251
1974年	1.119	0.414	2.703
1975年	1.097	0.469	2.339
1976年	1.139	0.426	2.674
1977年	1.122	0.367	3.057
1978年	1.146	0.383	2.992
1979年	1.131	0.326	3.469
1980年	1.205	0.403	2.990
1981年	1.220	0.390	3.128
1982年	1.188	0.377	3.151
1983年	1.197	0.354	3.381
1984年	1.189	0.353	3.368
1985年	1.182	0.371	3.186
1986年	1.213	0.356	3.407
1987年	1.199	0.351	3.416
1988年	1.236	0.368	3.359
1989年	1.238	0.396	3.126
1990年	1.257	0.394	3.190
1991年	1.373	0.459	2.991
1992年	1.307	0.527	2.480
1993年	1.390	0.402	3.458
1994年	1.321	0.640	2.064
1995年	1.320	0.545	2.422
1996年	1.380	0.653	2.113
1997年	1.362	0.622	2.190
1998年	1.428	0.737	1.938
1999年	1.424	0.755	1.886
2000年	1.424	0.917	1.553
2001年	1.426	0.633	2.253
2002年	1.469	0.598	2.457
2003年	1.533	0.587	2.612
2004年	1.554	0.566	2.746
2005年	1.525	0.592	2.576

(注) 望ましい財の生産指数は⑧式、望ましくない財の生産指数は⑨式、環境効率性の値は⑦式を使用して推計した。

V. 研究のまとめ

代表的な余剰物質であるリンと環境効率性の値を図示したのが以下の図2である¹⁴。

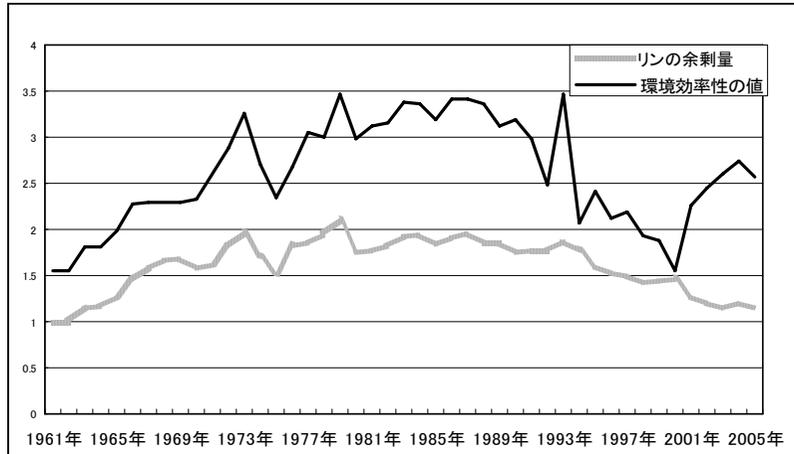


図2 余剰量（リン）と環境効率性の推移（1961～2005年）

(注) 図中のリンの余剰量は1961年を基準とする指数で示されている。

図2によれば、1961年～2005年にかけての日本においては、時間が経過するにつれて余剰量の値は逆U字曲線の形状を描くように動くことが確認される。この間、日本の農業部門における労働生産性の値は持続的に上昇している（図3）。

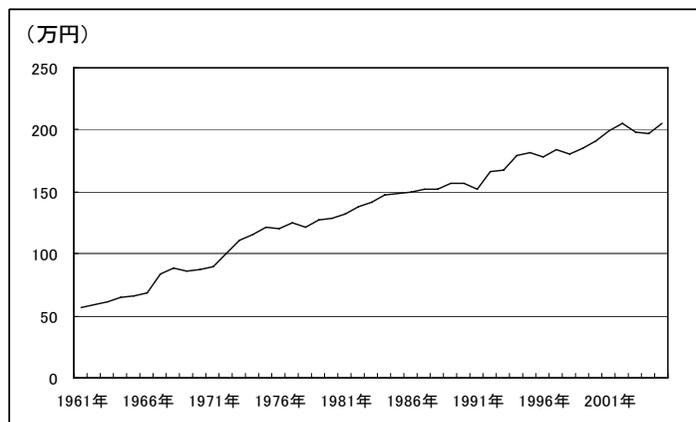


図3 労働生産性の推移（1961年～2005年）

(注) 農業部門の就業者数と実質GDPの比率によって推計。

¹⁴ 窒素の余剰量はリンと補完的な動きをしており、余剰量の値がリンを下回るためリンを代表値とした。

図2と図3の結果を総合させれば、余剰量と労働生産性の間には、経済発展が進行するにつれて当初、環境状態は悪化するが、技術水準の向上とともに環境状態は改善するという「環境クズネッツ曲線 (= Environmental Kuznetz Curve : EKC)」を描くような関係が生じている可能性があることを確認できる¹⁵。そこで、リンの排出量 P を被説明変数、労働生産性 y 及びその2乗値 y^2 を説明変数として時系列データを使用したパラメータ推定を行い、EKCを描くような関係 (y の推定パラメータ $a_y > 0$ 、 y^2 の推定パラメータ $a_{yy} < 0$) が成立しているか否かを確認してみよう。最小2乗法 (= Ordinary Least Square method : OLS) による推定結果は以下のように示される¹⁶。

$$P = -269007 + 15193.2y - 56.03y^2 - 974.96t \quad \dots \textcircled{11}$$

$$(-3.99) \quad (13.44) \quad (-13.26) \quad (-0.21)$$

$$n=45 \quad \bar{R}^2=0.86 \quad DW=1.37$$

⑪式の推定パラメータの値は t 値も高く、極めて良好な結果となっており、農業部門の労働生産性を高め、技術水準を高めることは、一時的に余剰量の増大という環境問題を伴うが、一層の労働生産性の上昇によってそのような環境問題を克服して余剰量を減少することが出来ることを示唆する結果となっている¹⁷。

一方、環境効率性と労働生産性の間には1960年代～1980年代後半にかけて、上下に振幅があるものの、正の相関関係を観察することができる。その後は1990年代後半にかけて環境効率性は低下するような関係となっているが、2000年以降、環境効率性は上昇するような傾向を示している。当初、環境効率性と労働生産性は逆U字曲線を描くような関係が生じているが、1980年代中盤以降、U字曲線を描くような関係となったと考えられる(図2)。そのため、1985年と1986年の間に構造変化が生じたと仮定し、被説明変数を環境効率性 EF として2つのOLS推定を行った結果は以下のように示される。

$$(1961年 \sim 1985年)$$

$$EF = 0.38 + 0.03y - 0.0002y^2 + 0.1t \quad \dots \textcircled{12}$$

$$(0.57) \quad (2.06) \quad (-2.53) \quad (2.34)$$

$$n=25 \quad \bar{R}^2=0.88 \quad DW=1.75$$

$$(1986年 \sim 2005年)$$

$$EF = 36.39 - 0.37y + 0.001y^2 + 0.005t \quad \dots \textcircled{13}$$

$$(4.16) \quad (-3.65) \quad (3.48) \quad (0.08)$$

$$n=20 \quad \bar{R}^2=0.61 \quad DW=1.84$$

¹⁵ EKCに関する詳細なサーベイはStern(2004)を参照のこと。

¹⁶ ()内は t 値。 \bar{R}^2 は自由度修正済決定係数。 DW はダービン・ワトソン比。 t はタイムトレンドである。

¹⁷ 最尤法による推定を行った場合、ダービン・ワトソン比が改善し、⑪式と同様の推定結果を得ることができた。

⑫式と⑬式の推定パラメータの t 値は高く、⑩式と同様に良好な結果となっている。また構造変化の Chow 検定を行ったところ、 F 値は 62.6 となり、構造変化が存在しないという帰無仮説は棄却されることになる。⑫式と⑬式の推定結果によれば、農業部門の労働生産性を高めることは環境効率性を高めることになるが、やがて環境効率性の値は低下に転ずることになる。しかし、労働生産性が上昇し続けると、再び、環境効率性の値も上昇することになる¹⁸。

南 (2002) は、日本経済は 1960 年代に転換点をこえ、発展途上国型から先進国型へと経済構造を転換したとする。この間、日本農業においては労働生産性の上昇が観察され、同時に環境効率性も上昇したが、余剰物質の排出は増加していた。また 1980 年代後半以降、労働生産性は上昇したが、環境効率性は低下し、余剰物質は減少することになった。一方 2000 年代以降、労働生産性と環境効率性は上昇し、余剰物質は減少している。この場合、日本農業において、効率性が上昇しながらも同時に環境汚染物質が減少しているという「持続的発展」が実現している可能性がある。

本研究は発展途上国において、農業由来の環境問題が農業自体の技術水準の向上によって改善する可能性があることを日本の戦後の統計データに基づいて実証的に確認した。このような「日本の経験」仮説は、(1) 戦前期に延長した推計を行う、(2) 他のアジア諸国において推計を行う、等によって標本数及び説明変数を追加した上で再検証される必要があり、今後の重要な課題と言えよう。

参考文献

- Chung, Y. R. Färe and S. Grosskopf, “Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 51(3), 1997: pp.229-240.
- Färe, R and S. Grosskopf, *New Directions: Efficiency and Productivity*, London, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Färe, R, S. Grosskopf, C.A.K.Lovell and C.Pasurka., “Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs Are Undesirable: A Nonparametric Approach”, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 71(1), 1989: pp90-98.
- Färe, R, S. Grosskopf and Hernandez-Sancho, F., “Environmental performance: an index number approach”, *Resource and Energy Economics*, Vol. 26(4), 2004: pp 343-352.
- 深尾京司・宮川公男編『生産性と日本の経済成長：JIP データベースによる産業・企業レベルの実証分析』東京大学出版会、2008 年。
- Hayami, Y, V.W. Ruttan, H.M. Southworth(eds.), *Agricultural growth in Japan, Taiwan, Korea, and the Philippines*, Honolulu, University Press of Hawaii, 1979.
- Hoang, V. N. and M. Alauddin, “A New Framework of Measuring National Nutrients Balance for International and Global Comparison”, *Discussion Papers Series from University of Queensland, School of Economics*, No389, 2009.

¹⁸ OECD 諸国を対象として、本研究と同様のモデルを推計した Färe and Grosskopf (2003) は EKC があてはまるような推定結果となっている。また本研究とは異なるモデルで環境効率性を推計した Taskin and Zaim (2001) の推定結果は、低・中所得国で⑫式、高所得国では⑬式とパラメータの符号が同一となっている。

- Hoang, V. N. and T. J. Coelli, “Measurement of Agricultural Total Factor Productivity Growth Incorporating Environmental Factors: A Nutrients Balance Approach”, *CEPA Working Papers Series*, No.WP032009, 2009.
- 南亮進『日本の経済発展〔第3版〕』東洋経済新報社、2002年。
- 三島慎一郎・松森信・井上恒久「都道府県・市町村単位での窒素収支算出を行うデータベースの構築」『日本土壤肥科学雑誌』第75巻2号、2004年：pp.275-281。
- 西尾道徳『農業と環境汚染』農文協、2005年。
- Oenema, O., H. Kros, and W. de Vries., “Approaches and Uncertainties in Nutrient Budgets: Implications for Nutrient Management and Environmental Policies”, *European Journal of Agronomy*, Vol.20(1-2), 2003:pp. 3-16.
- OECD, *Environmental Performance of Agriculture in OECD Countries since 1990*, OECD,2008.
- Shindo,J, K.Okamoto, H.Kawashima and E.Konohira., “Nitrogen Flow Associated with Food Production and Consumption and Its Effect on Water Quality in Japan from 1961 to 2005”, *Soil Science and Plant Nutrition* , Vol.55(4), 2009:pp. 532-545 .
- Stern,D.I, “The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve”, *World Development*, Vol.32(8), 2004:pp.1419-1439.
- Taskin, F and O.Zaim, “The role of international trade on environmental efficiency: a DEA approach”, *Economic Modelling*, Vol. 18(1), 2001: pp 1-17.