

化石燃料・金属鉱物資源の効率的利用可能性： 資源生産性推計の提案

馬奈木俊介¹・田中 健太²・鶴見哲也³

¹ 非会員 財団法人地球環境戦略研究機関 (IGES) (〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口2108-11)

E-mail: managi.s@gmail.com

² 非会員 東北大学大学院 環境科学研究科 (〒240-8501 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

E-mail: tanaka59_tin@yahoo.co.jp

³ 非会員 東京大学 新領域創成科学研究科 (千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: tsurumi@k.u-tokyo.ac.jp

近年、途上国の急速な経済成長により、資源利用が急速に伸びている。とくに化石燃料及び、金属鉱物資源は経済成長に重要な資源であり、今後の世界的な資源の効率的利用が重要となってくる。それに伴い、資源の効率的な利用を測る指標として「資源生産性」の概念が重要となってきた。日本においても、政府主導で資源生産性の向上を目指している。しかし現実の経済活動において、いくつかの投入生産要素の変化が産出であるGDPの変化に大きく影響するものの、現時点ではそうしたいくつかの生産要素を考慮した資源生産性は測られていない。そこで本研究では世界の各国データをもとに資源生産性を複数の生産要素を考慮できる非放射型距離推計 (Non-Radial Directional Performance Measurement) 手法を用い、各国レベルでの資源生産性の推計方法を提案するとともに、実際に提案した手法により各国の資源生産性の測定を試みる。

Key Words: Mineral resource, Fossil fuel, Resource productivity, Non-Radial Directional Performance Measurement

1 はじめに

化石燃料や金属鉱物資源は経済活動、経済成長には欠かせない枯渇性資源である。とくに近年ではレアメタルを代表として、工業製品に必要なレアメタルやその他の金属資源の消費量は急激に増加しており、金属鉱物資源の安定的な確保を先進国や発展著しい中国などの途上国も重要視している。安定的な確保の一方で先進国では資源の効率的利用にも着目している。つまり、金属資源を消費するだけではなく、再利用やリサイクルを通じ、国内の

潜在的な資源を有効活用したり、製品自体の製造段階で使用する資源の節約を通じ、国内での資源の効率的活用をすすめることである。例えば廃棄される家電製品などには再利用できる金属資源が多量に残っており、「都市鉱山」とも呼ばれるほど、潜在的な利用可能性が高いとされており、その有効活用が注視されている。

実際に日本においても循環型社会形成推進基本計画が策定され、資源の効率的利用を促進することを政府主導でめざしている。こうした状況において、資源の効率的利用がどの程度促されているか示す指標が重要となる。そ

の代表的なものが「資源生産性」である。

資源生産性はGDPなど経済の規模を表す指標を生産のために投入した資源の量で割った値を使われている。循環型社会形成推進基本計画でもこの資源生産性の向上をひとつの目標としている。

しかし現実の生産活動において他の投入生産要素（資本ストック、労働力など）の変化により、産出であるGDPなどの経済指標は大きく影響を受けるため、こうした複数の生産要素を考慮した資源生産性を測る必要がある。これまで環境効率性、エネルギー効率性の議論はひろく行われてきた（例えばWBCSD¹⁾）。一方、金属鉱物資源などの資源効率性・生産性は十分に議論されてこなかった。

そこで本研究ではこれまで環境効率性や生産性の測定手法として用いられてきた非放射型距離推計（Non-Radial Directional Performance Measurement）の手法を用いる資源生産性の測定手法の提案と、提案した手法による資源生産性の推計を行う。

2 分析手法

本研究では前述の通り、複数のインプットを考慮した資源生産性を測るために非放射型距離推計の手法を用い、資源の効率的利用がどの程度促されているか指標化する。

非放射型距離推計はDEA手法を拡張したものである。DEAは企業の経営効率の測定に用いられる手法であるが複数のインプット、アウトプットを考慮し、各経済主体の効率性の評価を行えるために、エネルギー効率や環境効率の分野でも広く用いられてきた（例えばZhang et al.²⁾, 2008; 馬奈木・田中, 2008³⁾）。とくにDEAは最も効率的な経済主体のパフォーマンスから効率的生産フロンティアを推計し、そのフロンティアからどの程度離れているかで各経済主体の非効率性を測定する。

本分析ではとくにDEAの手法のなかでも我々の共同研究の成果であるChen et al.(2010)⁴⁾のWeighted Russell Directional Distance Model（WRDDM：重み付け非放射型指向性距離関数）を用いる。通常のDEAによる生産効率性の分析で

は主にインプットを一定としたときのアウトプットの増加可能性、もしくは逆にアウトプットを一定としたときのインプットの節約可能性から生産効率性を推計する場合（Output・Input Oriented model）が多い。また近年では指向性距離関数と呼ばれる関数を用いることにより、アウトプットの増加可能性とインプットの節約可能性を同時に考慮できる生産性の測定手法（Both Oriented model）が用いられることもある。

しかしOutput・Input Oriented modelではアウトプットの増加可能性とインプットの節約可能性の両方を考慮できず、単純なBoth Oriented modelでは指向性距離関数を用いるためにアウトプットがどれほどの比率で増加可能であるか、またインプットがどれほどの比率で節約可能か分析することができない。

一方でWRDDMは単純な指向性距離関数ではなく、各インプット、アウトプットの非効率性をはかる際に、それぞれの変数に重みづけを行うことにより、前述の2つの問題を解決することができる。

そのため本研究では各国のアウトプットとインプットの変化を適切にとらえるため、WRDDMを資源の効率的な利用を測るために利用する

3 データ

本分析では1995年から2003年の世界レベルの各国データを用いる。アウトプット変数としては各国のGDPを用いる。インプット変数としては各国の資本ストック、労働人口、資源の消費量を用いる。本分析ではとくに現在、入手可能であり、かつひろくつかわれている金属鉱物資源（鉄、銅、鉛）及び化石燃料（各化石燃料を熱量に変換し、合計した熱量合計）をそれぞれインプット変数として、利用する。化石燃料に関しては25カ国、銅は13カ国、鉄は14カ国のデータを用いる。鉛は15カ国を対象とした。

各国のGDP、資本ストック、労働者数はPenn

World table 6.1⁵⁾ のデータを利用した。資源の消費量はWorld Bureau of Metal Statistics⁶⁾のデータより計算を行い使用した。

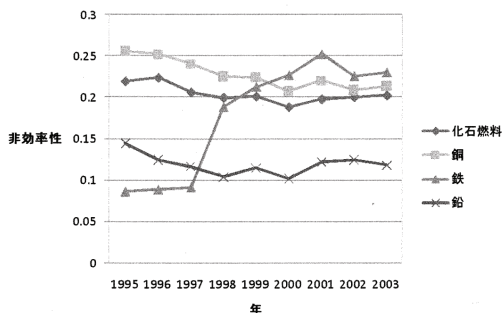
4 推計結果

(1) 世界平均での非効率性の年推移

各資源の非効率性の推計結果は表1,及び図1である。表1は地域ごとの1995年から2003年の間の非効率性の平均であり,図1は経年での非効率性の推移の世界平均を示している。本分析では地域平均をヨーロッパ(銅:6カ国,鉄:7カ国,鉛:9カ国),アジア(銅:2カ国,鉄:4カ国,鉛:2カ国)を示し,資源の産出消費の最大国である中国,経済規模の大きいアメリカ,日本を結果に示す。

まず図1の世界全体の非効率性の経年変化をみると,化石燃料と銅に関しては非効率性が減少傾向である一方,鉄は1998年以降,急激に非効率性が上昇していることがわかる。とくに東南アジア地域(インドネシア,マレーシアなど)での非効率性の上昇が世界全体の非効率性の平均上昇に影響を与えている。一方で鉛に関しては経年変化が少なく,かつ非効率性自体が他の資源に対して低い傾向がみられる。

図1 世界平均での非効率性の推移



(2) 主要地域・国における非効率性

表1は各地域の平均非効率性を示したものであ

る。とくに日本,アメリカの非効率性は分析対象の資源の全てにおいて低いことが示され,資源が効率的に利用されていることがわかる。ヨーロッパの化石燃料に対する非効率性も高いが,この原因はとくに東欧諸国の非効率性の高さが影響している。アジアにおいては鉛以外の資源,とくに銅について非効率性が高いことが示された。アジアの銅の資源利用の非効率性を上昇させている国はとくにインドネシア,フィリピンなどであった。ただしアジアのなかでも韓国の非効率性は全般的に低い。中国においては全ての資源において非効率性が他の地域・国と比べて高い。

表1 主要地域・国の平均非効率性

	化石燃料	銅	鉄	鉛
ヨーロッパ	0.237	0.190	0.185	0.108
アジア	0.263	0.413	0.218	0.051
日本	0.000	0.000	0.016	0.000
アメリカ	0.000	0.000	0.036	0.000
中国	0.223	0.256	0.273	0.268

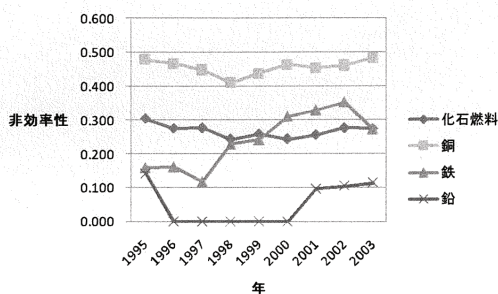
(3) アジア及び中国における非効率性の年推移

アジア地域はとくに90年代,経済成長が著しい地域であり,本分析でもインドネシアなどの東南アジア諸国,韓国などを対象としており,現在の世界経済のなかで主要な役割を果たす国が対象となっている。そうした国々の非効率性の推移を分析することは重要である。そこで本節では第一にアジアにおける非効率性の推移を分析する。図2はアジア地域における各資源利用の非効率性の推移である。

傾向としては化石燃料,銅の非効率性の推移はあまり変化がみられない。また鉛に関しては非常に非効率性が低いことがわかる。一方で鉄に関しては年を経るごとに非効率性が大きくなっていることがわかる。

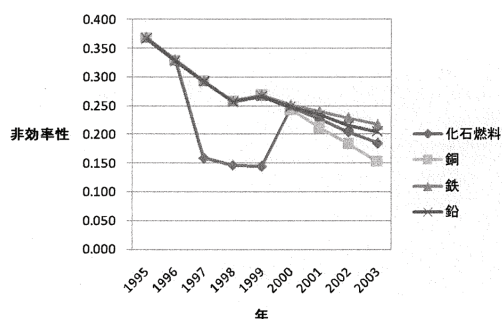
5 考察

図2 アジア地域の非効率性の推移



アジア地域につき、中国の非効率性の推移を分析する。図3が中国の非効率性の推移を示している。

図3 中国の非効率性の推移



中国は前述の通り、世界最規模の資源産出国のひとつであり、消費量も世界で最大である。そのため、世界の資源循環に大きな影響を与えることは必須であり、中国の資源利用の推移を分析する必要がある。

非効率性の推移を見ると、今回の分析対象となった全ての資源の非効率性が年を追うごとに減少している。とくに2003年の非効率性をみまると銅や化石燃料は0.2以下のまで非効率性が減少している。しかしながら、鉄、鉛はまだ非効率性が若干高い状況にある。

今回のWRDDMによる資源の効率的利用の計測により、大きく3つの特徴がみられる。第一に先進国と途上国では資源の有効利用に大きな差があることである。とくに日本やアメリカと比べ、アジア地域、中国の資源利用の非効率性は高い。

この違いの大きな要因は法制度、資源の利用技術など多岐にわたるが、例えば、資源のリサイクル利用が大きな理由としてあげられると考えられる。

とくに鉄において、日本企業の再利用化率は極めて高い。今回の分析対象期間の初年度である1995年には日本の鉄鋼産業における産業廃棄物の再資源化は96%にも達している。

一方で途上国では再資源化の取り組みが不十分である。同様に鉄に関してアジアの途上国では急速な経済発展により、鉄の消費量が急激に増えた。その結果、その消費量に対して、再資源化がおいつかず、結果として資源の利用効率が減少したと考えられる。このような技術的要因がひとつとして、非効率性の大きさに影響していると考えられる。

第二の特徴として、鉛の利用に関しては途上国においても非効率性が低い傾向であったという点である。鉛は工業製品や蓄電池の材料としてひろく用いられてきた。しかし近年のEUでの規制のみならず、鉛の有害性はすでに分析期間内でも周知されている。実際に途上国においても（例えばインドネシア）、90年代に鉛蓄電池の輸入が規制されている国が多数ある。無鉛化の世界的な流れが反映された結果といえる。

第3に途上国のなかでも資源効率のかなり違いがあることがみうけられる。アジア地域の非効率性は鉛以外に関しては非効率性が大きく、とくに鉄に関しては非効率性が増加傾向にある。一方で同様に急速な経済発展をしている中国は分析期間初期の非効率性は全般的に高い一方で、年経過とともに減少傾向にあることが分かる。

このような非効率性の差にはその国の産業構造や環境・資源関連への政府対応の違いなど多種多様な要因が考えられる。本研究の課題としてこのような要因を考慮したモデルの作成、また各種要因の影響力などの分析が必要であると考えられる。

6 まとめ

本研究ではDEAの手法を用いることにより、生産関数に基づいた複数の生産投入を考慮し、資源の効率的な利用がどの程度促されているのか、化石燃料および、銅、鉄、鉛の3つの金属資源に関して計測を行い、分析を試みた。

測定された非効率性をもとに行った分析では先進国の資源利用の優位性、世界的な鉛の効率的利用の流れ、途上国間での資源利用効率の違いなど多くの有用な分析結果を得ることができた。

こうした分析により今後の世界レベルでの資源の有効性を目指す施策を考えることができる。例えば、鉄の非効率な利用が進んでいるアジア地域に対して日本やアメリカの再利用技術の提供の重要性が考えられる。化石燃料の効率的利用に関しては現状のCDM(クリーン開発メカニズム)などの施策があるが、資源の利用効率向上の技術に関しては世界での技術共有、普及の体制がほとんどできていない。

本分析で提案したDEAを用いることにより、各地域の資源効率の違いが明確に分析することができ、その結果に基づき、各地域、世界レベルでみた資源効率的利用の施策を考えることができると考えられる。

現在、世界ではレアメタル、化石燃料など多くの資源を自国で確保しようと競争が激化している。しかし資源の効率的利用は未だに十分ではないことは本分析や過去の資源循環に関する研究でも明白である。世界レベルで資源の有効的な利用

を行うための施策を行うためには資源生産性のような同一指標で各国を比較することが重要となり、本分析で提案するような測定は今後、さらに重要性を増すと考える。

謝辞: また本研究は、環境省「環境経済の政策研究」から支援を頂いたことを僭越ながら示させていただきます。

参考文献

- 1) WBCSD (1989), "Eco-efficient Leadership for improved Economic and Environmental Performance", Geneva.
- 2) Zhang, B., Bi, J., Fan, Z., Yuan, Z., Ge, J. (2009) "Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach", *Ecological economics*, 68, 1-2, pp306-316.
- 3) 馬奈木俊介, 田中健太「環境効率性」, 竹中康治編著 都市ガス産業の総合分析, pp213-228, NIT出版.
- 4) Chen, P., Yu, M., Managi, S., Chang, C. (2010) "Non-Radial Directional Performance Measurement with Undesirable Output", Working Paper, Tohoku University.
- 5) Pen World table 6.1.
(http://pwt.econ.upenn.edu/php_site/pwt_index.php)
- 6) World Bureau of Metal Statistics
(<http://www.world-bureau.com/>)

Possibility of efficient use of fossil fuel and metal resources:
Proposal of resource productivity measurement

Kenta Tanaka, Shunsuke Managi, Tetsuya Tsurumi

Developing countries has been increasing consumption of fossil fuel and metal resources rapidly. The stable use of resources is one of the most important problems for each country. Moreover, effective use of resources is one of the ways to mitigate resource depletion. The typical index to evaluate of effective use of resources is resource productivity. Recently, government of Japan focuses to improve the resource productivity. However when we try to evaluate the resource productivity, we need to consider the change of several production input factor. But there are few studies to propose the measurement of resource productivity which consider such a problem. In this study, we propose new measure of the resource productivity by applying non-radial directional performance method. In addition, we measure the inefficient using of resources by our proposal method.