

エネルギー効率性におけるトレードオフと効率的フロンティア

—GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量の関係とその意味するところ—

計量分析ユニット 需給分析・予測グループ リーダー

柳澤 明

要旨

省エネルギーや気候変動、エネルギー安全保障に関連して、各国のエネルギー効率がいれば取り上げられる。マクロなエネルギー効率の代表的指標として、GDPあたりのエネルギー消費量(GDP原単位)と一人あたりのエネルギー消費量がある。先進国はGDP原単位が小さいことをもってエネルギー効率的であるとする一方、発展途上国は一人あたりエネルギー消費量が少ないことをしてエネルギー節約的であると主張する傾向がある。どの指標を尺度としてエネルギー効率性の比較・検討を行うかは、気候変動対策の衡平性・公平性にも絡むことから、議論を巻き起こす問題である。

本稿では、世界のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の約4分の3を占めるG20諸国を対象に、GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量とのトレードオフ関係を簡潔に定量化し、そこから導出されるいくつかの知見を示した。

これまでに実現された最高効率の軌跡の集合からなる経験曲線「効率的フロンティア」上においては、GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量とのトレードオフ関係は、反比例として表現可能である。この効率的フロンティア上では、エネルギー消費の中長期的な所得弾性値が0.5であることを示した。また、欧米、及びロシアは効率的フロンティアに向けエネルギー効率の改善が進んでいる一方、中国の効率改善の歩みは効率的フロンティアに近づくほどのものではないことが明らかになった。さらに、一人あたりエネルギー消費量を環境負荷とする環境クズネッツ曲線は成立しないことを示した。

国際交渉の常として、各国は自国に有利となるように自らの「効率性」を主張しがちである。GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量とのトレードオフ関係を定量的に把握することは、各国のこれまでの省エネルギー努力、及び今後の目標などがどの程度の強度であるのかを理解し、評価する一助になろう。

1. はじめに

省エネルギーや気候変動、エネルギー安全保障に関連して、各国のエネルギー効率がいれば取り上げられる。しかしながら、一口にマクロなエネルギー効率といっても、いくつかの指標が存在する。なかでも、代表的なものとしては、国内総生産(GDP)あたりのエネルギー消費量(GDP原単位)と一人あたりのエネルギー消費量が挙げられる。これらは産業構造、気候、地勢などエネルギー消費量を規定する諸要因を捨象した上で算出されているとはいえ、理解のしやすさ、利用範囲の広範さ、データの入手可能性といった利点を有

している。

エネルギー効率を論じるにあたり、先進国はGDP原単位が小さいことをもってエネルギー効率的であるとする一方で、発展途上国は一人あたりエネルギー消費量が少ないことをしてエネルギー節約的であると主張する傾向がある。どの指標を尺度としてエネルギー効率性の比較・検討を行うかは、気候変動対策の衡平性・公平性にも絡むことから、議論を巻き起こす問題である。

エネルギーは、財・サービスを生み出すための中間投入財(広い意味では生産要素)であると同時に、家庭での空調・給湯や移動などのために用いられる最終消費財でもあるという二面性を有する。そのため、一人あたりエネルギー消費量が少ないことは、真にエネルギー効率的であることの反映なのか、あるいは、単に低い所得水準と未発展な経済に影響されてのことなのかは、背後にある状況を熟慮した上で判断する必要がある。しかしながら、一人あたりエネルギー消費量は、その明快さや、二酸化炭素排出量の抑制が要請されていることなどから、効率指標として用いられることも多い。

他方、エネルギーは各国の経済活動や人々の生活を支えるべく消費されるという見地に基つき、代表的な経済規模指標であるGDPあたりのエネルギー消費量であるGDP原単位も、エネルギー効率を表すものとして極めて頻繁に用いられる。例えば、中国のGDP原単位が日本の4倍も悪い¹ことは、中国におけるエネルギー効率の改善余地が依然として大きいことを簡潔に示している。

本稿では、これら2つのエネルギー効率—GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量—の関係性を簡潔に定量化し、そこから導出されるいくつかの知見について示すことを目的としている。

2. エネルギー効率性におけるトレードオフと効率的フロンティア

2.1 経済発展とエネルギー消費

通常、経済発展により一人あたりの所得が増加すると、それにつれて一人あたりエネルギー消費量も増加してゆく傾向がある。これは、工業化・生産活動の活発化による需要増、生活水準の向上による自動車や家電などのエネルギー利用機器の普及、電化の進展による発電用燃料の増大などが要因となっている。

図1はG20の国々²について、1980～2008年の一人あたり実質GDP³と一人あたり一次エネルギー供給⁴をプロットしたものである。国により水準は異なるものの、おおむね所得の増加はエネルギー消費量の増大をもたらしている。

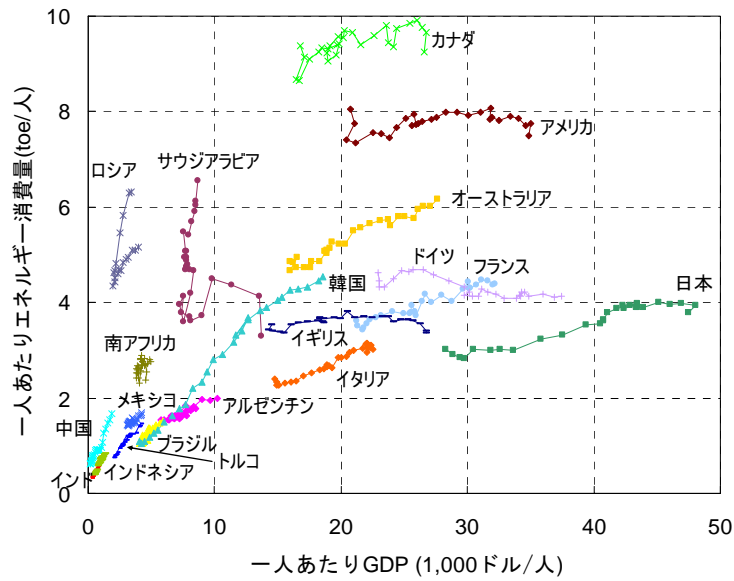
¹ 日本と中国のGDP規模はほぼ同じにもかかわらず、中国は日本の4倍以上のエネルギーを消費している。

² G20は、アルゼンチン、オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インド、インドネシア、イタリア、日本、韓国、メキシコ、ロシア、サウジアラビア、南アフリカ、トルコ、イギリス、アメリカ、EUである。このうち地域であるEUは分析対象から外した。2008年において、これら19か国は、世界のエネルギー消費量、二酸化炭素排出量の約4分の3を占めている。

³ GDPはG20諸国の貿易収支の不均衡が最小であった1995年基準とした。主に為替レートの影響で、基準年を何年とするかで以下の数値は変化するが、本稿の主旨は変わらない。

⁴ 一次電力の投入エネルギーは各国各年の火力発電平均熱効率を用いて再評価した。

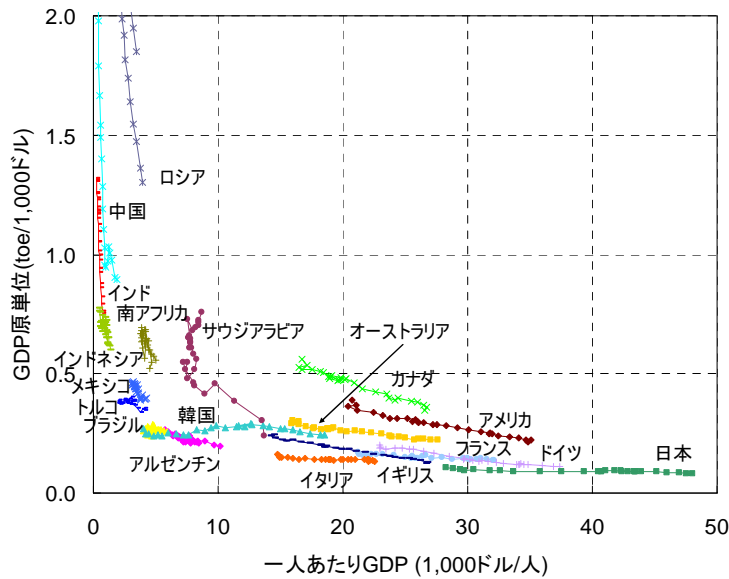
図1 一人あたりGDPと一人あたりエネルギー消費量, 1980~2008年



出所: IEA 「Energy Balances」、世界銀行 「World Development Indicators」 より算出

これに対し、一人あたり所得が増加すると、GDP原単位は減少してゆく傾向がある。これは、エネルギー需要に対する所得効果の飽和現象、サービス産業の伸張など産業構造のソフト化、先進的なエネルギー・環境技術の普及、規模の経済性などによるものである。図2は一人あたりGDPとGDP原単位をプロットしたものである。

図2 一人あたりGDPとGDP原単位, 1980~2008年

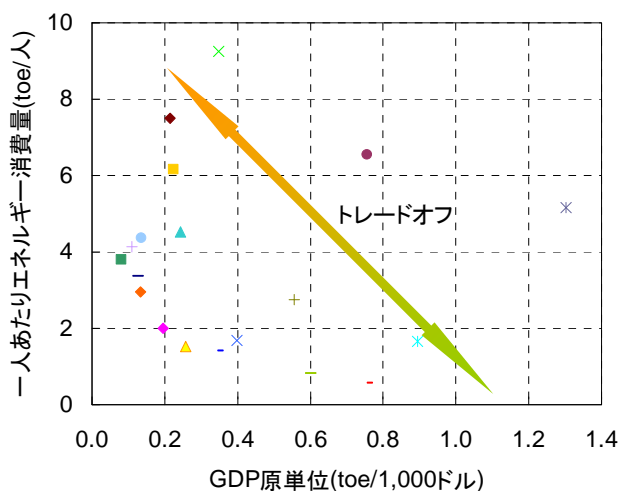


出所: IEA 「Energy Balances」、世界銀行 「World Development Indicators」 より算出

2.2 効率性のトレードオフ

上述のとおり、一人あたり所得の増加に伴い、GDPあたりエネルギー消費量は減少し、片や、一人あたりエネルギー消費量は増大する傾向がある。言い換えると、一人あたり所得を介して、GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量という2つの効率性の間にはトレードオフの関係があるといえる。ただし、クロスセクションデータでは、両者の間に大まかな傾向は読み取れるものの、厳密なトレードオフ関係が必ずしも見出されるわけではない。これは、GDP原単位も一人あたりエネルギー消費量も、産業構造、気候、地勢といったエネルギー消費量を規定する諸要因を捨象した上で算出されていることにも影響されている。

図3 GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量のトレードオフ, 2008年



出所: IEA 「Energy Balances」、世界銀行 「World Development Indicators」 より算出

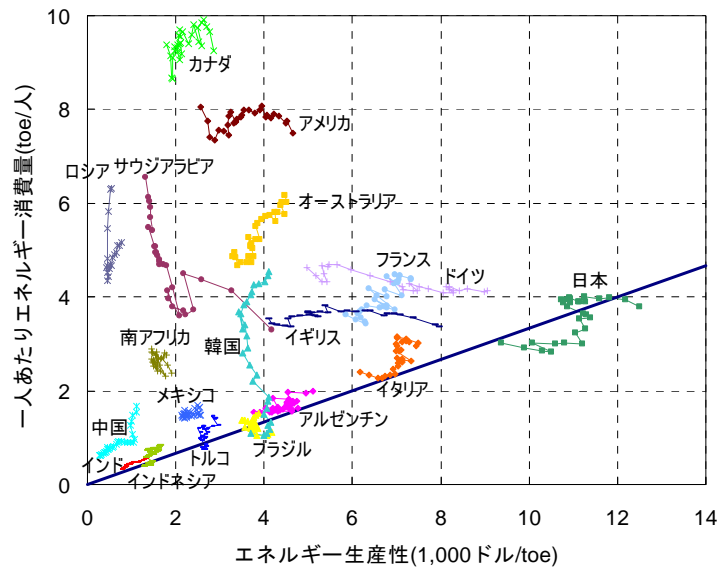
2.3 効率的フロンティアの導出

ここで、データの見方を変えてみることにする。GDP原単位の逆数であるエネルギー消費量あたりのGDPは、エネルギー生産性として知られている。エネルギー生産性が高く、一人あたりエネルギー消費量が少ない、すなわち図4で右下にあるほど、効率がよいということに異論はないであろう。全ての国を取り上げるとエネルギー生産性と一人あたりエネルギー消費量との間に厳密なトレードオフの関係は定義できないものの、最も効率のよい国々の集合—インド、インドネシア、トルコ、ブラジル、アルゼンチン、イタリア、日本—においては、両者の間に直線的な関係を見出すことができる。すなわち、

$$\frac{E}{N} = c \frac{Y}{E} \quad (1)$$

である。ここで、 E はエネルギー消費量、 N は人口、 Y はGDPである。また、定数 c はおよそ $1/3$ [toe²/(1,000ドル・人)]と推量される。

図4 エネルギー生産性と一人あたりエネルギー消費量, 1980~2008年



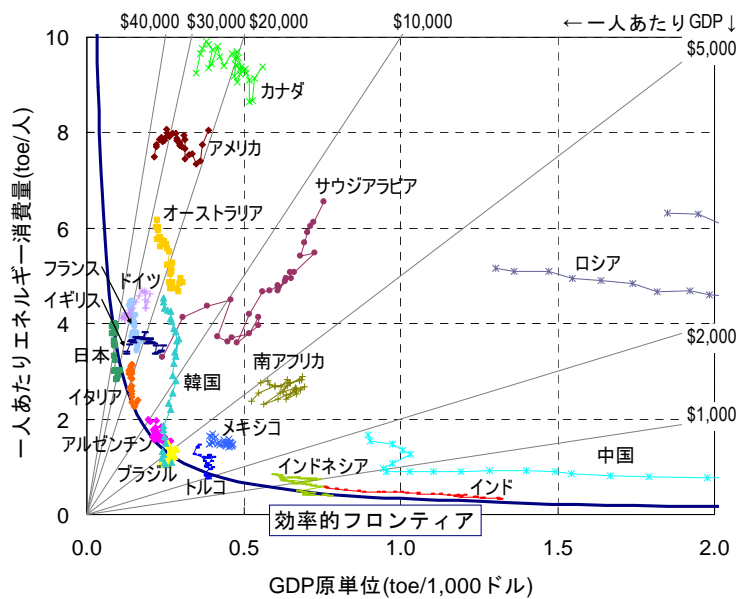
出所: IEA 「Energy Balances」、世界銀行「World Development Indicators」より算出

ここで、指標をGDP原単位と一人あたりエネルギー消費量に戻すと、この直線は、

$$\frac{E}{N} = c \left(\frac{E}{Y} \right)^{-1} \quad (2)$$

となる。すなわち、両者の間のトレードオフ関係は、反比例として表現可能である。

図5 GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量, 1980~2008年



出所: IEA 「Energy Balances」、世界銀行「World Development Indicators」より算出

本稿ではこの経験曲線を「効率的フロンティア」と呼称することとする。効率的フロンティアは、これまでに実現された最高効率の軌跡の集合である。仮に、ある国が効率的フロンティアに沿って経済発展(図5で右下から左上へ移動)しているならば、それは実績値から見て最も効率的なエネルギー・パスを達成しているといえる。

2.4 効率的フロンティアとエネルギー消費のGDP弾性値

効率的フロンティア上におけるエネルギーとGDP、人口との関係は、(2)式より、

$$E = c^{\frac{1}{2}} N^{\frac{1}{2}} Y^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

となる。すなわち、これまでに実現された最も効率的なエネルギー・パスにおいては、エネルギー消費の中長期的なGDP(所得)弾性値は0.5(GDPの1%の増加によるエネルギー消費の増加は0.5%)ということになる⁵。

以下では、効率的フロンティア上における性質を応用した分析を行う。

3. 効率的フロンティアに準拠した要因分解

3.1 標準的な要因分解

エネルギー消費増減を定量的に分析する際、人口、一人あたりGDP、GDP原単位の積による定義式

$$E = N \frac{Y}{N} \frac{E}{Y} \quad (4)$$

に沿った要因分解がよく用いられる。

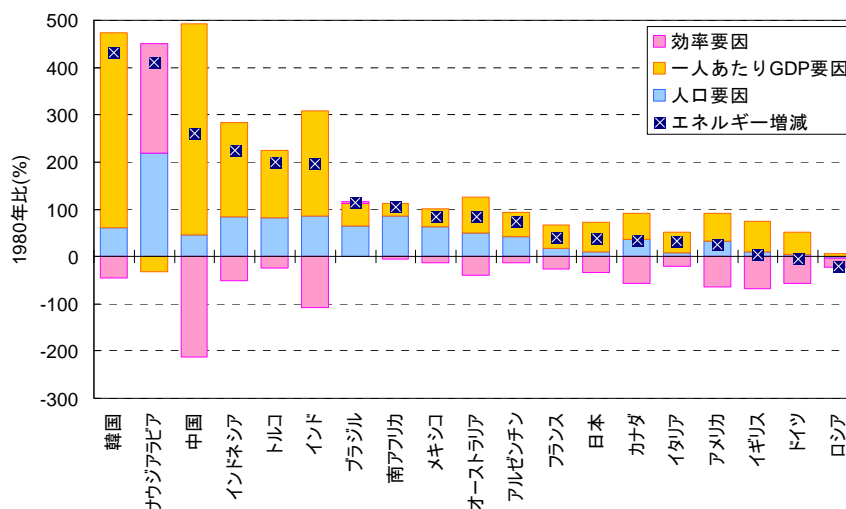
すなわち、エネルギー増減は人口要因、一人あたりGDP要因、効率要因の寄与に分解される。

$$\underbrace{\Delta E}_{\text{エネルギー増減}} = \underbrace{EN^{-1} \cdot \Delta N}_{\text{人口要因}} + \underbrace{ENY^{-1} \cdot \Delta \frac{Y}{N}}_{\substack{\text{一人あたり} \\ \text{GDP要因}}} + \underbrace{Y \cdot \Delta \frac{E}{Y}}_{\text{効率要因}} + \text{交絡項} \quad (5)$$

(4)式に基づくこの標準型の要因分解は、暗黙裡にエネルギー消費のGDP弾性値が1であることを仮定しているとも解釈できる。すなわち、エネルギー消費の伸び率がGDPの伸び率を下回る場合、それは全て効率要因(GDP原単位)の寄与によるものになる。

⁵ 同様に、人口弾性値も0.5と1を下回る。これはいささか奇異に感じられるかもしれないが、それほど突飛なことではない。身近なマイクロな例として、世帯人員数が2倍になっても世帯のエネルギー消費量は2倍までは増えないことなどが挙げられる。

図6 エネルギー消費増減の要因分解(標準型), 1980-2008年



注: ロシアは1990-2008年

3.2 効率的フロンティアに準拠した要因分解

ところが、エネルギー消費の伸び率がGDPの伸び率と等しくある必要はなく、現実にもGDP弾性値は1を下回ることが多い⁶。この現象は、時系列的には産業構造の変化、エネルギー利用機器・設備の更新によるストック効率の改善、クロスセクションデータの観点からは規模の経済性などとして解釈することができる。

ところで、効率的フロンティア上では、GDP弾性値は0.5である。このことを鑑み、効率的フロンティアに準拠したエネルギー消費増減の要因分解を行う。なお、これは1を下回るGDP弾性値の棚ぼた的な実現を意味するものではなく、効率的フロンティアへの接近に向けた追加的な省エネルギーを計量するものである。

(2), (3)式を念頭に置けば、エネルギー消費量は定義的に

$$E = N \left(\frac{Y}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E}{Y} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

と書き換えることができる⁷。これより、

$$\underbrace{\frac{\Delta E}{E}}_{\text{エネルギー増減}} = \underbrace{EN^{-1} \cdot \Delta N}_{\text{人口要因}} + \underbrace{\frac{1}{2} ENY^{-1} \cdot \Delta \frac{Y}{N}}_{\text{一人あたりGDP要因}} + \underbrace{\frac{1}{2} Y \cdot \Delta \frac{E}{Y} + \frac{1}{2} N \cdot \Delta \frac{E}{N}}_{\text{効率要因}} + \text{交絡項} \tag{7}$$

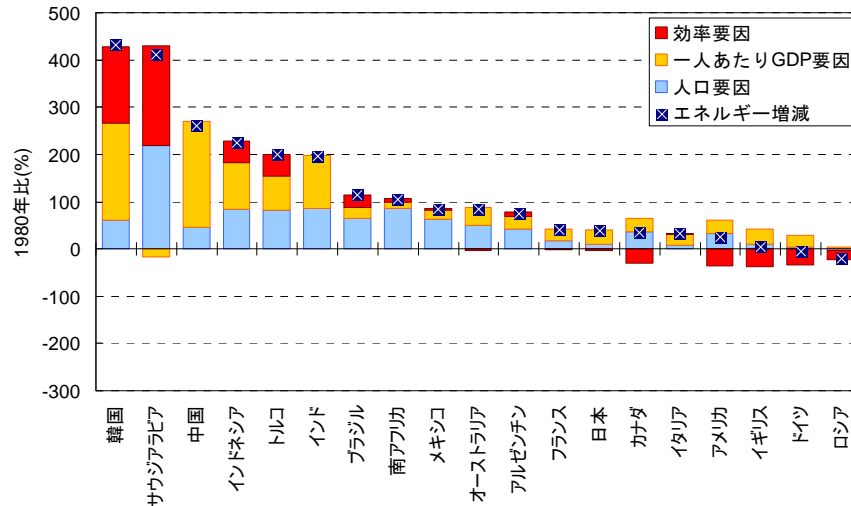
である。

⁶ 自律的エネルギー効率改善(Autonomous Energy Efficiency Improvement, AEEI)は、GDP弾性値が1を下回ることを別の角度から捉えたものとも考えることもできる。

⁷ GDPあたりではなく、GDPの平方根あたりという評価軸は、気候変動枠組条約第5回締約国会議(COP5)におけるアルゼンチンの自主削減提案に奇しくも通じるものがある。

なお、効率的フロンティア上、あるいは並行する曲線上を推移する場合、効率要因を表す最後の2項は相殺し、その寄与は0となる。一方、効率的フロンティアに近づく場合は、効率要因は負値(減少寄与)となる。

図7 エネルギー消費増減の要因分解(効率的フロンティア準拠), 1980-2008年

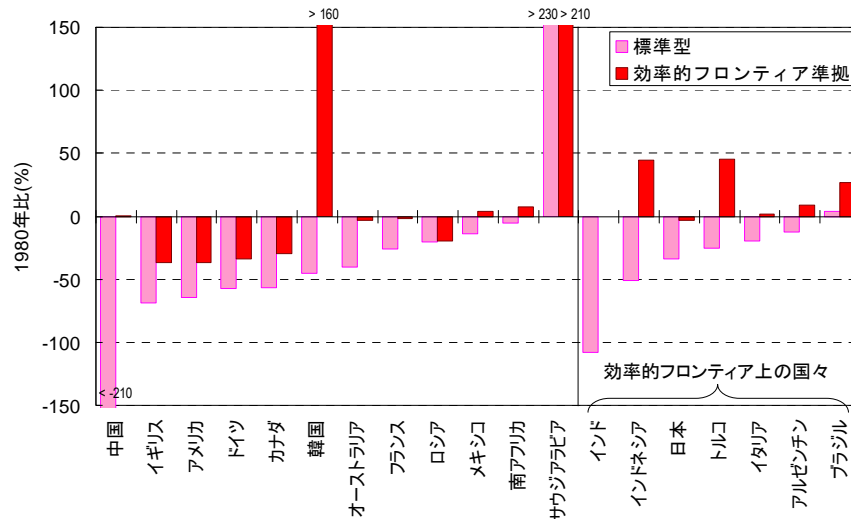


注: ロシアは1990-2008年

3.3 効率要因の寄与の比較

これら2種類の要因分解の結果から、効率要因の寄与のみ取り出して比較したものが図8である。

図8 効率要因のエネルギー消費増減への寄与度, 1980-2008年



注: ロシアは1990-2008年

当然のことながら、実現最高効率の集合である効率的フロンティア上にある国々では、さらなる効率化はほぼないわけであるから、効率的フロンティアに準拠した要因分解で効率要因がエネルギー消費に減少寄与となることはほぼない。むしろ、インドネシア、トルコ、ブラジルのように、効率の悪化により効率的フロンティアから乖離し、効率要因がエネルギー消費に増加寄与となっている国もある。

これらに対し、効率的フロンティア上にない国々のうち、欧米、及びロシアでは、効率要因がエネルギー消費に減少寄与となっていることが多い。これは、相対的に非効率的なエネルギー需給構造が改善されていることを示している。一方で、これと異なる動きを示しているのが中国と韓国である。標準型の要因分解に見るように、中国もまた非効率的なエネルギー需給構造を改善しつつある。しかし、実のところその程度は効率的フロンティアに接近するほどではなく、効率的フロンティアと並行した改善推移にとどまっている(効率的フロンティア準拠の要因分解で効率要因の寄与がほぼ0)。この傾向のまま推移すると、他の国々が効率的フロンティアに近づいていることから、中国の非効率さがより顕在化することになる。韓国も各最終消費部門における省エネルギーの進展により、標準型の要因分解では効率要因がエネルギー消費に減少寄与となっている。しかしながら、産業部門の伸張などによる経済構造の変化と急速な電化により、一人あたりエネルギー消費量が大きく増加しており、効率的フロンティアから急速に離れつつある。

4. 効率的フロンティアと環境クズネッツ曲線

環境クズネッツ曲線とは、一人あたり所得が増加するにつれ、当初は環境負荷が増大するものの、一人あたり所得がある水準を超えると環境負荷は減少に転じるという、逆U字型の経験曲線である。

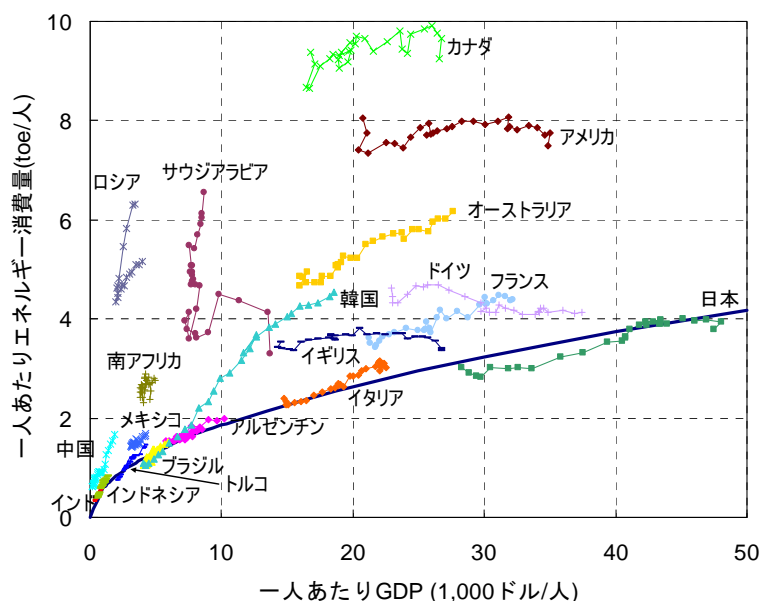
環境クズネッツ曲線が実際に成立するかどうかは、対象とする環境負荷の種類に依存する。これまでのところ、窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、あるいは粒子状物質(PM)などの大気汚染物質に関しては、環境クズネッツ曲線が成立するとみなされている。これに対し、エネルギーや二酸化炭素(CO_2)に関しては、広く認められた結論は得られていない。気候変動問題に絡み、温室効果ガス、とりわけエネルギー起源の二酸化炭素の排出抑制が訴えられているが、実際に一人あたり二酸化炭素排出量が逆U字型といえるほど大きく減少に転じている国はいまだない。

ところで、効率的フロンティア上においては、一人あたりGDPと一人あたりエネルギー消費量との間には、(2)式より、

$$\frac{E}{N} = c^{\frac{1}{2}} \left(\frac{Y}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

という関係が成り立つ。すなわち、一人あたりエネルギー消費量は、一人あたりGDPに対して単調に増加する。別言すれば、効率的フロンティア上を推移する場合、一人あたりエネルギー消費量を環境負荷とする環境クズネッツ曲線は描かれない(図9)。環境クズネッツ曲線が成立するのは、一旦、非効率になった後に、再び効率化が進展する場合に限られる。

図9 一人あたりGDPと一人あたりエネルギー消費量, 1980~2008年



5. おわりに

GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量は、マクロなエネルギー効率を表すものとして最もよく用いられている。これらの効率は、エネルギー消費量を規定する諸要因を捨象して算出されたものであることから、両者の間に厳密な定量的関係を導き出すことは難しい。一人あたり所得の増加とともにGDP原単位は減少してゆく一方で、一人あたりエネルギー消費量は増大してゆくことが一般に認められているのみである。

本稿では、これまでに実現された最高効率の軌跡の集合を対象として、ナイーブな経験曲線である効率的フロンティアを提示した。この効率的フロンティア上では、GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量とのトレードオフ関係は、反比例として表現可能である。効率的フロンティア上では、エネルギー消費の中長期的な所得弾性値が0.5であることを示した。また、欧米、及びロシアは効率的フロンティアに向けエネルギー効率の改善が進んでいる一方、中国の効率改善の歩みは効率的フロンティアに近づくほどのものではないことが明らかになった。さらに、一人あたりエネルギー消費量を環境負荷とする環境クズネッツ曲線は成立しないことを示した。

国際交渉の常として、各国は自国に有利となるように自らの「効率性」を主張しがちである。GDP原単位と一人あたりエネルギー消費量との間のトレードオフ関係を定量的に把握することは、各国のこれまでの省エネルギー努力、及び今後の目標などがどの程度の強度であるのかを理解し、評価する一助になろう。

参考文献

International Energy Agency, (2007), “Energy Use in the New Millennium”

International Energy Agency, (2008), “Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency”

World Bank, (2009), “World Development Report 2010: Development and Climate Change”

内山 勝久, (2007), 「二酸化炭素排出と環境クズネツ曲線 —ダイナミック・パネルデータ推計による検証—」, 『経済経営研究』 第27巻第3号

末広 茂, (2007), 「省エネルギー指標としてのGDP原単位 —GDP原単位における国際比較の問題点と部門別アプローチによる推計—」, 『エネルギー経済』 第33巻第5号

柳澤 明, (2011, 3月公表予定), 「二酸化炭素原単位の要因分解 —エネルギー需給構造に基づく積み上げ手法—」

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp