

# 1C19 エネルギー R & Dによる潜在エネルギーリスク最小化方策の分析 —リスク工学的アプローチ—

○佐々木幸陽, 渡辺千仞 (東工大社会理工)

## 1 序論

世界のエネルギー研究開発を取り巻く環境は大きく変化している。特に、規制緩和によるエネルギー市場の競争激化とコストダウン圧力、途上国の経済成長によるエネルギー需給の逼迫、環境問題の深刻化・国際化が顕著である。

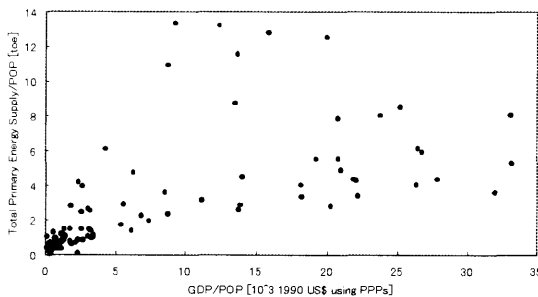
我が国では、近年のエネルギー価格（化石燃料価格）の低下などにより、エネルギー問題への危機意識が薄れはじめており、潜在エネルギーリスクは高まっていると考えられ、国としてのエネルギー政策の再構築が求められている。

## 2 目的

本研究では、まず一人当たり一次エネルギー供給量が国ごとに異なる要因を因子分析によって半明にする。そしてその背後にはエネルギーリスクが潜在的に影響を与えていると考えられるため、エネルギーリスクを代表する指標を設定し、それを要素分解してエネルギーリスクを国別、および日本の時系列の変化を調べ、エネルギーリスクの対処動向を比較する。さらに、日本はエネルギーリスクの低減に省エネ効果の多大なる貢献があったが、それにはエネルギー研究開発の収益性の高さが背景にあったことを実証する。

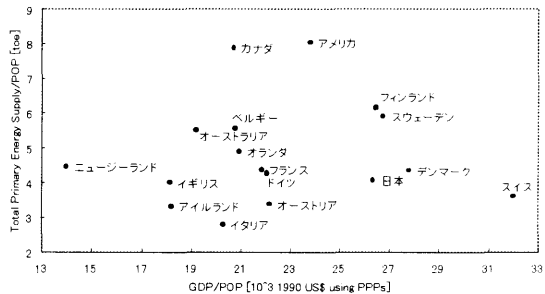
## 3 一人当たり一次エネルギーの差異の背景

汚染物質排出量は経済レベルの上昇に伴って逆 U 字型の軌道を迎えることが一般的に言われている。これは時系列のデータでも確認できるが、多国家間のパネルデータでも、多様な経済状態の集合が結果的に経済の発展段階を表していることになるのでその形状が把握できる。図 1 は世界 103 カ国の一人当たり GDP と一人当たり一次エネルギー供給量との散布図である。一次エネルギー供給量は化石エネルギーで賄われていることが多く、二酸化炭素の排出レベルに近い値を示していると考えられる。



出所) OECD 「CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION」

図 1 世界 103 カ国の一人当たり GDP と一人当たり一次エネルギー供給による散布図(1996)



出所) 図 1 に同じ

図 2 OECD 主要 17 カ国の一人当たり GDP と一人当たりエネルギーによる散布図(1996)

この図を見ると経済レベルが初期の頃は右肩上がりで、成熟に近づくにつれ右肩下がり、つまり逆 U 字型の成長曲線であることが確認できる。ここで注目するのは各国間でのばらつきである。一国だけ時系列でプロットする場合はこれほどのばらつきは発生しない。これは国ごとに異なる特性が反映されているからである。散布のばらつきを発生させると考えられる支配要因を以下に列挙する。

- ①エネルギー輸入依存度 (エネルギー輸入量/一次エネルギー供給量)
- ②石油輸入依存度 (石油輸入量/石油供給量)
- ③石油依存度 (石油供給量/一次エネルギー供給量)
- ④化石燃料以外のエネルギー割合 (一次エネルギー供給量のうち原子力、水力、地熱、太陽熱、風力、再生可能エネルギーの割合)
- ⑤ガソリン価格 (Premium Leaded Gasoline の価格<sup>1</sup>)
- ⑥家庭用電気料金

①と②はその国のエネルギー供給がどれほど外国に依存しているかを表しており、この値が高いほどエネルギーリスクが高く、一人当たりエネルギーが低い値をとる国であるといえる。③～⑥は政府の対応度、市場の開放度を表すプロキシとして用いる。エネルギーリスクが高くても新エネルギーの開発や、価格の統制による需要の抑制など政府の対応如何でリスクをコントロールすることができ、この値が高い国も一人当たりエネルギーが低い国と考えられる。一人当たり一次エネルギーが国ごとで異なるメカニズムを解明するために、以上の 6 つの支配要因を変量として図 2 に見られる OECD 主要 17 カ国に対して因子分析を行う。分析にはそれぞれの

<sup>1</sup> オーストリア、カナダ、デンマーク、フィンランド、日本、ニュージーランド、アメリカは Regular Unleaded Gasoline の価格

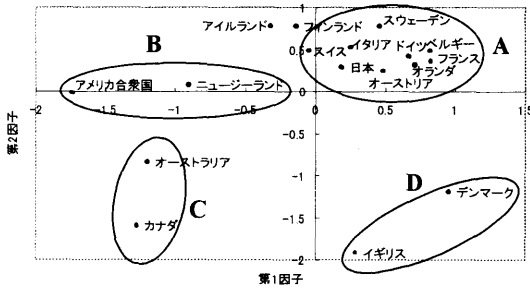


図3 因子分析結果

変量を基準化し、より明確な解釈が可能な因子軸を得るためにバリマックス回転を施す。第1因子と第2因子によるプロットの結果を図3に示す。

第1因子はガソリン価格と家庭用電気料金が強く正に働いており、政府対応度の強弱を表していると考えられる。第2因子はエネルギー輸入依存度と石油輸入依存度の影響が正に強く、その国のエネルギーリスクの大小を表現しているものと思われる。

この結果から、10カ国を4つのグループに分けることができる。グループAはエネルギーリスクが高く、そのリスクに対処するために政府が強い影響力を発揮している国々の集まりである。グループBはエネルギーリスクが少なからずあるにもかかわらずあまり政府が対応を施していないグループである。グループCはエネルギーリスクが小さく、そのため政府も対抗措置をとっていないグループである。グループDはエネルギーリスクが低いにもかかわらず政府の対応度が高いグループである。

グループAとCに関してはリスクと政府対応度の自然な関係を表しているといえる。しかしなぜグループBやDのような国々が出てくるのであろうか？グループDはイギリスとデンマークであるが、イギリスは以前グループAの国々と同様にエネルギーにあまり恵まれない国であったが北海油田の発掘に伴い一転して石油輸出国になったという背景がある。つまり、エネルギー的に余裕が生じるようになったとしても、元来より続いていたエネルギーリスクに対処するためのエネルギー政策やエネルギー消費に対する国民意識や生活習慣は変わりにくいものと考えられる。

一方でグループBであるが、アメリカは石油や石炭など地下資源に恵まれ、エネルギー多消費型の産業・生活を築いてきたが、近年は徐々にエネルギー自給率が低下しリスクも高まっている。

しかしリスクの高まりにもかかわらず政府はエネルギー供給をできるだけ市場にまかせ、小さな政府をエネルギー政策でも標榜している。カルフォルニア州の電力危機はまさにそういった情勢の潜在的な問題が現実的に表面化したと言える。また、一度多消費型の生活を体験すると節約型の生活ができないのも事実であろう。

#### 4 エネルギーリスク指標と要素分解

カリフォルニア州の電力危機からも日本の石油危機からも、輸入エネルギーが経済に及ぼしうるインパクトは非常に大きいことが

伺える。エネルギーを他国に依存している国ほど、その国の経済はエネルギー的な脆さを有している。よってエネルギーリスクと輸入エネルギー量の関係を見るために、先の因子分析でエネルギーリスクを表していた第2因子と石油輸入量 GDP 原単位との散布図を図4に示す。すると、第2因子と石油輸入量の間には非常に高い相関関係があることが見て取れ、相関係数は0.918とその密接度の高さが確認できる。つまりエネルギーリスクとは経済活動に対する石油輸入量の度合いとも言い換えることができる。よってここではエネルギーリスク指標として石油輸入量GDP原単位(OI/V)を用いる<sup>2</sup>。

エネルギーリスク指標を構成する要因を明らかにするために、以下のように分解する。なお、添え字の*i*は産業とそれ以外を表す。

$$\frac{OI}{V} = \frac{OI}{OS} \cdot \frac{OS}{E} \cdot \sum_i \frac{E_i}{V} \quad (1)$$

OI: 石油輸入量 [toe] V: GDP [S]

OS: 石油供給量 [toe] E: 一次エネルギー供給量 [toe]

この分解法だとエネルギーリスク指標である石油輸入量 GDP 原単位が石油輸入依存度と石油依存度を要素として分解され、この2つは先の因子分解の第2因子を説明する変量であったことを考えると、エネルギーリスクの指標として石油輸入量 GDP 原単位を用いることが妥当であることが分かる。

各要因の変化(他の条件は一定)によるエネルギーリスクの変化を分離・計測するため、(1)式を次のように展開する。

$$\begin{aligned} \Delta \frac{OI}{V} = & \left( \Delta \frac{OI}{OS} \right) \cdot \frac{OS}{E} \cdot \sum_i \frac{E_i}{V} + \frac{OI}{OS} \cdot \left( \Delta \frac{OS}{E} \right) \cdot \sum_i \frac{E_i}{V} \\ & + \frac{OI}{OS} \cdot \frac{OS}{E} \cdot \left( \sum_i \Delta \frac{E_i}{V} \right) + \sum_i \Delta Z \quad (2) \end{aligned}$$

右辺の第1項は石油供給量のうち輸入された石油の割合、つまり石油輸入依存度の変化を表す。第2項は一次エネルギー供給量のうち石油で供給された割合、つまり石油依存度の変化を表す。第3項はエネルギーGDP原単位の変化を産業とそれ以外で分離計測する。第4項は交絡項である。

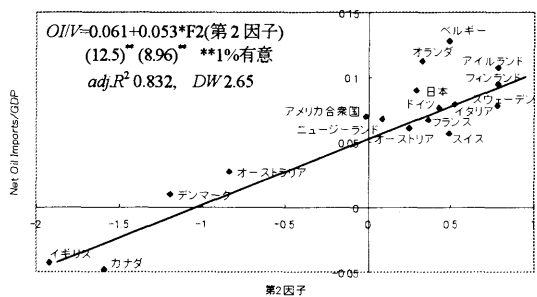


図4 第2因子と石油輸入量 GDP 原単位による散布図

<sup>2</sup>一般的にエネルギーのリスクといった場合、エネルギー源の供給地および輸送経路におけるリスク、また供給削減および価格高騰によるリスクが対象となるが、ここではそれらを包括する指標として石油輸入量 GDP 原単位を用いている。

OECD主要10カ国についてこの分解方法で石油輸入量GDP原単位の変化率への各貢献要因を1971年から1994年にかけて計測した結果を図5に示す。変化要因の計測結果はすべて寄与度(%)で表示されていることに注意されたい。

結果を見ると、いくつかのパターンに分けられることがわかる。イギリスとカナダはエネルギーリスクの低減に石油輸入依存度の減少幅が大きかった国である。イギリスは先述のとおりであるが、カナダも自国の石油生産量を増加させて輸入石油の割合を低下させている。スウェーデン、フランス、スイスは石油依存度変化の貢献が大きいグループであり、原子力等代替エネルギーの導入が積極的な国々である。一次エネルギー供給量のうち原子力エネルギーの割合はそれぞれ38.2%、39.2%、24.2%であり、石油危機以後、エネルギーリスクを減少させるための解決策を原子力等の代替エネルギーを中心に見出すという政府の方針が明確に見取れる。

日本は産業のエネルギー消費効率の貢献が大きかった国である。周知のとおり、日本の産業界は高い生産性を武器に競争力を付けてきた。それが経済的にもエネルギーリスク的にもよい結果をもたらしたといえる。イタリアとドイツは各要素どれもがバランスよく貢献しており、ドイツは産業以外のエネルギーGDP原単位の減少の貢献が大きいことも注目値する。パーク・アンド・ライド方式の導入など、民生部門でのエネルギー対策が功を奏しているものと思われる。オーストラリアはリスク対策はほとんどしていないことが分かる。アメリカは石油依存度、産業および産業以外の消費エネルギーGDP原単位が負に働いているが、それ以上に石油輸入依存度が高まっているため全体的にはリスクが増加してしまっている。

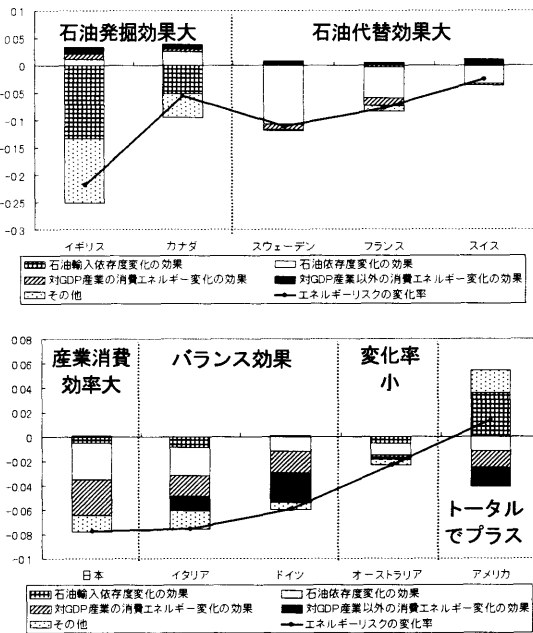


図5 OECD主要10カ国のエネルギーリスク変化率とその貢献要因(1971-1994)

先のカルフォルニア州の電力危機はこの石油輸入依存度の高まりに政府がなんらかの措置を講じなかった結果起きた事故といえよう。新たなエネルギー対策が今求められている。

## 5 日本の省エネ効果と省エネ研究開発の収益性

### 5.1 日本の産業消費エネルギーGDP原単位の要素分解

4節の分離計測によって日本の産業消費エネルギーGDP原単位が日本のエネルギーリスク低減に大きく寄与しており、他国に比べても大きい減少率を示していることが分かった。しかし産業消費エネルギーGDP原単位と言ってもこの指標にはいくつかの要素が入り組んでいるため、この指標をさらに細かく分解してどの要因がエネルギーリスクの減少に貢献していたかを調べる。産業消費エネルギーGDP原単位を次のように分解する。

$$\frac{E_I}{V} = \frac{E_I}{Y_I} \cdot \frac{Y_I}{V_I} \cdot \frac{V_I}{V} \quad (3)$$

E: エネルギー消費量 [toe] Y: 産出高 [\$] V: GDP [\$]

添え字のIは産業を意味する。産業エネルギー消費量GDP原単位の変化を分離計測するため以下のように展開する。

$$\Delta \frac{E_I}{V} = \left( \Delta \frac{E_I}{Y_I} \right) \cdot \frac{Y_I}{V_I} \cdot \frac{V_I}{V} + \frac{E_I}{Y_I} \cdot \left( \Delta \frac{Y_I}{V_I} \right) \cdot \frac{V_I}{V} + \frac{E_I}{Y_I} \cdot \frac{Y_I}{V_I} \cdot \left( \Delta \frac{V_I}{V} \right) + \Delta Z \quad (4)$$

右辺第1項は産業のエネルギー投入係数変化、すなわち省エネルギー効果の変化を表す。第2項は産業の付加価値率変化の効果を表す。第3項は産業構成比変化の効果を表す。第4項は交絡項である。

1971年から1994年にかけての日本の産業消費エネルギーGDP原単位の変化要因を計測すると図6のようになる。

1971年から1978年までは省エネ効果と産業構成比の変化が大きな減少要因であることがわかる。この時期は第1次石油危機が起きた時期であり、産業界の省エネ対策と、政府主導による産業構造の重厚長大型産業から知識集約型産業への移行の軌跡が見取れる。1979年から1986年までは第2次石油危機ということもあり、この時期も省エネ効果が大きかったことがわかる。しかしバブル期以降はその効果も減少し、90年代に入ると省エネ効果は無くなり、エネルギー効率が悪化していることがわかる。

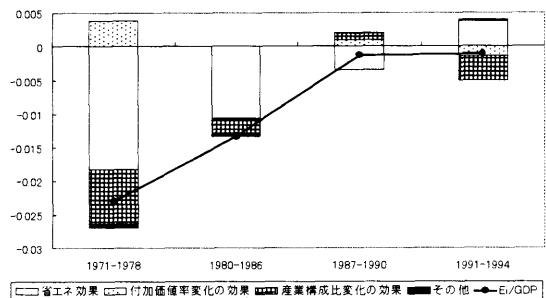


図6 日本の産業消費エネルギーGDP原単位の変化率とその貢献要因(1971-1994)

## 5.2 エネルギー研究開発の収益性

通常研究開発投資の収益率といった場合、投資額に対する収益の比率のことを指すが、エネルギー研究開発、特に省エネルギー研究開発の場合、その効果は売上高や生産量の増加といった直接的な収益の増加としては現れず、エネルギーコストの削減といった生産コストの減少効果によって利益が増加することになるので、結局コストの減少分が収益の増加分、つまりリターンと考えられる。

研究開発投資内部収益率は、その研究開発プロジェクトの初期費用とその投資によって得られるリターンのそれぞれの現在価値が等しくなるような割引率であり、以下のように求められる。

研究開発投資の期待収益率を  $r$ 、研究開発のリードタイムを  $m$ 、技術の陳腐化率を  $\rho$  とする。内部収益率の概念より、1 単位の研究開発投資の商業化開始時点 ( $t=0$ ) での価値が 1 単位の研究開発投資によって将来得られる収益の商業化開始時点での価値と等しくなるとすると、

$$e^{mr} = - \int_0^{\infty} \frac{\partial EC_M}{\partial T_E} e^{-(r+\rho)t} dt \quad (5)$$

$EC_M$ : 製造業エネルギーコスト

$T_E$ : 製造業省エネルギー技術ストック<sup>3</sup>

左辺を一次の項までテイラー展開で近似すると、

$$1 + mr = - \frac{\partial EC_M}{\partial T_E} / (r + \rho) \quad (6)$$

と表せる。次に  $\partial EC_M / \partial T_E$  を求める。エネルギーの増減は生産量、省エネ技術ストック、技術ストック (省エネ技術を除く)、およびタイムトレンドに依存すると仮定すると、

$$EC_M = Ae^{tT} T^{\alpha} T_E^{\beta} Y^{\gamma} \quad (7)$$

$T$ : 製造業技術ストック

$Y$ : 製造業産出  $t$ : タイムトレンド

となり、両辺の対数をとると、

$$\ln EC_M = \ln A + \lambda t + \alpha \ln T + \beta \ln T_E + \gamma \ln Y \quad (8)$$

ここで  $T_E$  の弾性値  $\beta$  は、

$$\beta = \frac{\partial EC_M / EC_M}{\partial T_E / T_E} = \frac{\partial EC_M}{\partial T_E} \cdot \frac{T_E}{EC_M} \quad (9)$$

$R_E$ : 製造業省エネルギー研究開発費<sup>4</sup>

となる。(8)式を 1971 年から 1996 年まで回帰分析することによって  $\beta$  を求める。なお、 $\beta$  は係数ダミーとして ① 1971-1986 と ② 1987-1994 の 2 期間で計測する。回帰結果は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \ln EC_M = & 47.7 - 0.026t + 0.710 \ln T - 0.167 \ln T_E 1 \\ & (3.77)^{**} \quad (3.77)^{**} \quad (7.83)^{**} \quad (7.11)^{**} \\ & - 0.161 \ln T_E 2 + 0.490 \ln Y \\ & (6.08)^{**} \quad (2.86)^{**} \quad **1\% \text{ 有意} \quad adj.R^2 0.805, DW 1.08 \end{aligned}$$

弾性値  $\beta$  を 2 期間で分けて求めた結果、87 年以降は以前に比べコストの削減効果が小さくなっていることがわかる。ここで求めた  $\beta$  に  $EC_M/R_E$  を乗じると  $\partial EC_M / \partial T_E$  が求まるので、これを(9)式に代入して内部収益率  $r$  を求める<sup>5</sup>。

すると 2 つの期間の平均内部収益率は次のようになる。

$$\begin{cases} 1971-1986 & 3.22 [\%] \\ 1987-1996 & 1.31 [\%] \end{cases}$$

71 年から 86 年までは比較的高い収益率を計上し、省エネルギー研究開発が企業にとって収益向上のための経済的に有効な手段であったことがわかる。しかし 87 年以降は 1.31% と低く、省エネルギー研究開発が投資対象にはなりにくいものとなっていったことが伺え、内部収益率の低下とともに省エネルギー研究開発離れが進み、省エネ効果が減少するという構図が見て取れ、これは正に図 6 に示されている 87 年以降の省エネ効果の減少を説明している。

## 6 結論

本研究では、国ごとの一人当たりエネルギー消費の差異 (これは二酸化炭素の一人当たり排出量にも通じるものである) の背景には、潜在的にエネルギーリスクの存在があることを示すと共に、エネルギーリスクの指標を確立し、その値と変化の要因を主要先進国間で比較分析を行った。その結果、ほとんどの国は原子力エネルギーの導入や省エネなどを通じてエネルギーリスクの低減に努めていることが見て取れた。特に日本の製造業の省エネ効果は非常に大きく、80 年代の半ばまではその高い効果を維持していたがそれ以後は低迷し、その背後には収益率の低下があったことが示された。収益率の低下の原因としては、エネルギー価格の下落によるエネルギーコストの削減インセンティブの低下、省エネ技術シーズの一巡・枯渇、収縮通減による収益の減少、および情報技術等他の先端的研究開発への資金の移動などが考えられる。

石油危機後の日本の製造業による旺盛なエネルギー研究開発とその高収益率の理由としては政府の補助による研究開発リスクの低減による効果が多大なる影響を及ぼしていたことが考えられる。よって今後は、エネルギー研究開発の促進メカニズムと収益性の支配要因を政策の役割を中心に解明したい。

## 参考文献

- [1] 内田光穂, “日本経済・エネルギーに関する計量経済分析,” 名古屋大学平成 11 年度博士論文, 1998
- [2] 小澤泰介, “研究開発投資の収益性・収益構造に関する分析,” 東京工業大学平成 10 年度卒業論文, 1999
- [3] 渡辺千帆, 宮崎久美子, 勝本雅和, “技術経済論,” 日科技連, 1998
- [4] IEA, “ENERGY PRICES AND TAXES,” 1997
- [5] IEA, “Energy Balance of OECD Countries,” 1997
- [6] OECD, “CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION 1971-1996,” 1998

<sup>3</sup> 『科学技術研究調査報告 エネルギー研究調査』(総務省統計局) 中の製造業の省エネルギー研究開発費をもとに構築。構築にあたって製造業全体におけるリードタイムと陳腐化率を用いた。

<sup>4</sup> 『科学技術研究調査報告 エネルギー研究調査』(総務省統計局) 中の製造業の省エネルギー研究開発費

<sup>5</sup> リードタイムと陳腐化率は「技術経済データベース」(東工大渡辺研) の製造業の研究開発における値を用いた