

解説

エネルギー収支比的視点がなぜ重要なのか

- EPR の定義と意義の再検討 -

松島 潤¹

投稿受付：2009年9月30日 受理日：2009年10月9日 WEB公開日：2010年2月22日

要旨

本稿は、EPR (Energy Profit Ratio:エネルギー収支比) の定義を再検討することで、その意義を明確化することにより EPR の適切な適用を促すことを目的としている。人間の行為を「余剰エネルギーを生産する行為」と「余剰エネルギーを消費する行為」とに便宜的に分けると、EPR の本来的な適用範囲は前者である。従って、人工物の製造や利用については、「余剰エネルギーを消費する行為」に分類され、このような場合は EPR ではなく熱効率などの効率指標を用いるべきであろう。また、EPR の社会的な重要性として、EPR 低下が高インフレ率と景気後退 (スタグフレーション) をもたらし、我々の社会に深刻な影響を与えることを示した。

ABSTRACT

The present paper revisits the definition and meaning of EPR (Energy Profit Ratio), which is the ratio of energy produced to energy consumed by an energy production method. Although the estimation of EPR can provide useful insights for examining the advantages and disadvantages of different fuels, it is important to understand the coverage of the application of the concept of EPR. Human societal activities can be separated conveniently into “production of surplus energy” and “consumption of surplus energy.” The present paper emphasizes the notion that the application of EPR should, for consistent metrics, be related to the efficiency of production of surplus energy while the consumption of surplus energy should be estimated by other forms of energy efficiency such as thermal efficiency. The present paper also reviews the historical changes in oil production and its associated EPR in the United States and demonstrates the significance to economic activities of decreasing EPR.

1. はじめに

人類は、木材、石炭、石油とより良質なエネルギー源へと変遷させながら高度な文明を築きあげてきた。エネルギーの「質」は、我々の社会の質を決定する重要な要素である。全世界の石油生産量がピークを迎えるというオイルピーク論がメディア等で取り上げられることが多くなってきた。背景には、昨今の油価高騰が現実問題として我々の生活に影響を与え始めたことがある。しばしば「枯渇」という表現がなされるが、これは正しくない。なぜならば、現在の議論では、人類が利用可

能な石油の半分を使い果たしたかどうか焦点になっているからである。石油生産量の数理モデルとして古典的であるが最も有名な Hubbert モデルによれば、人類が利用可能な石油の半分を使用した時点は、生産量のピークと一致する (図 1)。ピーク到来時期については、様々な予測がされているが、予測という性質上歴史が証明するしかない。仮にピークが到来しても、「まだ半分あるなら、安心ではないか」と思うかもしれないが、エネルギーの「質」を理解する重要性がここにある。

石油の生産量がピークを迎えると何が問

¹松島 潤 (まつしま じゅん)

東京大学大学院工学系研究科 工学博士



題なのか。まず、供給が減耗し需要に追いつかなくなることにより石油価格が高くなることは想像に難くない。その一方で、生産ピークは安く豊かな石油の時代が終わりを意味し、高く乏しい石油の時代への転換点である、とも理解されている。これは、質的な転換期であることを言っているが、このことが非常に理解されにくい。原因の一つに、図1の生産量モデルには「質」の要素が明示的に含まれていないからである。また、石油を生産する過程においては、技術革新効果と地質的境界の相互作用により、その生産量が決定されてくるが、政治的・経済的・地質学的な様々な要因の影響を受けるため、その変化から情報を読み取ることが妥当でないと解釈されることもある。

エネルギー・資源の質の良し悪しを議論するには、直接的に質を表現する指標を用いた経年的評価が有効である。そこで本稿では、エネルギー収支比 (Energy Profit Ratio: 以下 EPR) の概念を再検討することにより意義を明確化し、その適切な理解と適用について議論するきっかけとしたい。また EPR の観点から、石油資源の質的側面を解説し、質的变化の動向、またその変化が我々の社会にとってなぜ重要かについて指摘する。

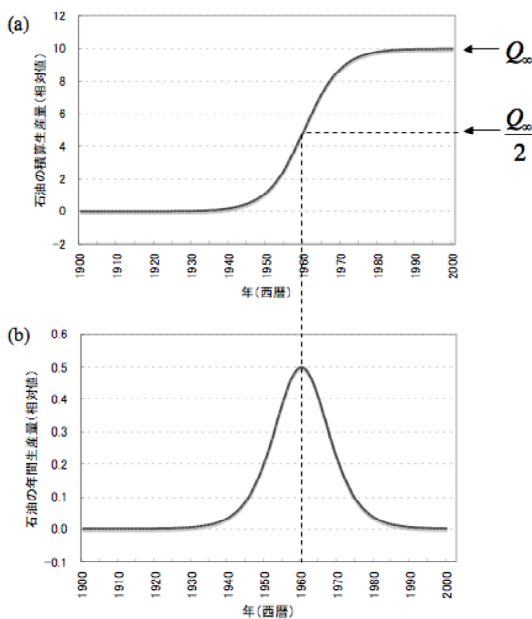


図1 (a) 石油の累積生産量, (b) 年間生産量を示し、(a)のグラフを時間に関して微分したものに相当する。なお、横軸の年度は意味を持たない。

2. EPR の定義と概念

EPR は EROI (Energy Return on Investment) と同義語であり、学術誌ではむしろ EROI が使

用されている。EPR の原型は Yield Per Effort (すなわち、単位努力当たりの成果) として、Hall and Cleveland (1981) の Science 誌に発表された論文に見ることができる。この論文では、掘削距離に対する石油産出を議論しており、EPR の考え方の源流とされるが、概念的には Odum (1973) にも同様の考え方が述べられている。

EPR の定義は一般的に「出力エネルギー÷入力エネルギー」あるいは「回収エネルギー÷投入エネルギー」と記述されるが、意味をより明確にするには「社会に供給されるエネルギー÷それを得るのに要するエネルギー」となる。素朴であるが人類がエネルギーを得る行為を端的に表現するため、潜在能力の大きい指標とされている。しかし、実際に EPR を算出する過程では、明確な標準化が行われていないのが現状であり、そのため不完全な部分を残している。第一に、特に入力エネルギーの範囲をどのように考えれば良いかという問題があり、第二に、EPR の計算に適した対象はどこまで広げられるかという問題がある。第一については、計算主体者の違いにより EPR 算出結果が異なる問題 (つまり、恣意的要素が入りやすいこと) であり、第二については、本来 EPR が適さない対象について評価してしまう場合である。第一の問題については、Mulder and Hagens (2008) が EPR 評価を実施する際の首尾一貫した枠組みを構築することを試みている。本稿では、第二の問題について焦点を当てることにする。

図2に EPR の概念的な定義を示す。図2は、「人間は自然界からエネルギーという恵み (E_{out}) を得ようとする際に、その恵みを楽しむにはエネルギー (E_{in}) が必要であり、それらの差 ($E_{out} - E_{in}$) から得られる余剰エネルギー (E_{net}) を社会で利用できる」ということを表現している。さらに、図2で注意深く見る必要があるのは、回収エネルギーの一部から投入エネルギーを捻出していることである。すなわち、投入エネルギーは、回収エネルギーの一部から回帰的に投入されるエネルギーということである。ただし、ここで誤解を与えないように補足すると、例えば石炭を地下から回収する際に投入するエネルギーが石油であったりするが、投入される資源の種類と回収される資源の種類は同一である必要はないが、回収される資源は何らかの形で、エネルギー回収のために投入エネルギーとして使用されうる性質を有する必要がある。従って、EPR の基本的な考え方としては、「人間が自然界からエネルギーを回帰的に投入することにより余剰エネルギーを楽しむ行為」を数式でマクロ的に表現したものと解釈できる。

このように考えると、EPR の概念にそぐわ

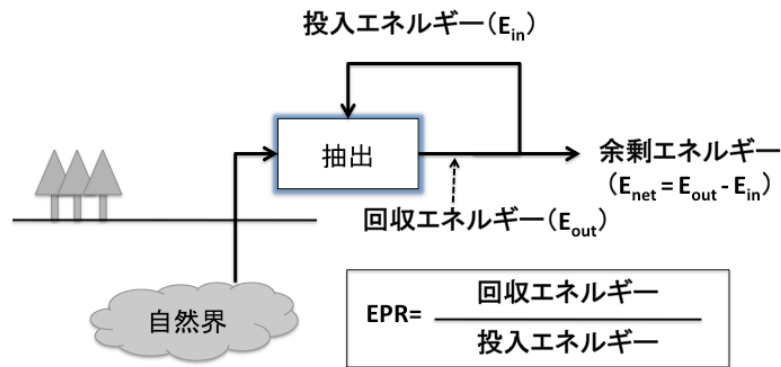


図2 EPR の概念的な定義

ない計算対象は自ずと明確になる。例えば人工物の製造や利用は、熱力学の法則で定義される仕事の過程、すなわち余剰エネルギーの効率的な使用方法として捉えるべきであろう。便宜的に「人類が自然界からエネルギーを得る行為（余剰エネルギーを生産する行為）」と「余剰エネルギーを消費する行為」とを分けると、EPR の本来的な適用範囲は前者ということになる。ただし、後者での適用を完全に否定するものではなく、その拡張的な使用の可能性もあるかもしれない。

余剰エネルギーの重要性として、Cleveland (2008) は以下のように述べている。

「EPR のより高い燃料源の入手機会を有した経済社会は、経済の拡大・多様化へのより大きな潜在力を有することになる。人類文明の拡大の歴史とその物質的な生活水準は、EPR が増大し続ける燃料源への継続的なアクセスと開発と直接的にリンクしているものであり、これらが原因によって生ずるものではない。」

さらに、図2から解釈できることとして、発電の際に投入される燃料は、投入エネルギーとして加算しないことも容易に理解できる（例えば、石油による火力発電の場合、燃料として投入される石油自身が持つ燃焼エネルギーは投入エネルギーに加算しない）。

3. EPR 的視点から見た石油開発

いま、リングが沢山成っている木を想像していただきたい。いくつかのリングは手を伸ばせば容易に採れるし、梯子を使ってよじ登らないと採れないものもある。つまり、我々が自然界から恵みを得ようとするとき、入手しやすいものと入手しにくいものがある状況で、人間は入手しやすいものから採っていくということである。石油を地下から採取することも同じように考えることができる。

採取の困難さ（つまり、これを質と考える）を数学的に表現するための一つの方法として前述した EPR があり、回収エネルギーを投入エネルギーで割り算することにより得られ、

その比が 1 以下であるとエネルギー的に無駄をしていることになる。ニューヨーク州立大学の Hall 教授によれば、米国の石油開発の黎明期である 1930 年代の EPR は 100 程度であったが、1970 年代には EPR は 30 程度、2000 年には 15 程度以下と低下し続けていることを指摘している (Hall, 2008)。さて、原油を回収する際のプロセスを考えると、人類が自然界から石油という恵みを受取る構図であると捉えることができる。このとき、EPR が 1 以下になったときに、人類はエネルギー・資源の恵みを受取るできなくなるのであり、エネルギー・資源自体が枯渇するわけではない。従って、「石油が枯渇する」という表現は正しくないことがわかる。

石油は 100 分の 1 ミリ程度オーダーのマイクロスケールの細かな隙間に水と一緒に入りこんだ液体状態で存在しており、その深度は地下 100 メートル以深、最近では 7000 メートル以深でも確認されている。採取容易性の観点から、埋蔵深度の浅い油層から順次開発対象とされていき、時代とともに対象油層の深化が進んでいきます。石油の埋蔵深度が深いほど、開発のためのエネルギーを要することになる。また、大水深や極地などの悪環境では、さらに多くの開発エネルギーを要するし、小規模油田では多くの回収エネルギーを期待できない。現在では、easy oil（容易に採取できる石油）から、これまで開発対象にならなかった条件の悪い油田の開発に目が向けられている。

一方、油田から石油を生産する際における必要なエネルギーを考える。発見された油田から原油の全て回収されるわけではなく、多くの場合 3~4 割程度しか回収されない。石油の貯まった層は地下に働く圧力の一部を受けているので、この油層に井戸を掘れば、圧力により井戸から勢いよく石油が噴出してくる（これを自噴と呼ぶ）。このように、油層が本来持っているエネルギーだけで石油を回収することを一次回収と言う。その後、長期間

にわたって石油生産を続けると、油層自身の圧力は低下し、生産量はしだいに減退し、結果として一次回収では、油層内の原油量の2~3割程度しか生産できない。生産にしたがって油層のエネルギーが弱まった段階で、水やガスを圧入して油層の圧力を維持して石油を回収することを二次回収と呼び、回収率は3~4割程度に向上できる。それでも油層には6~7割の石油が残されており、さらに油層に熱的あるいは化学的な刺激を与えて回収率を向上するための研究が行われている。これを三次回収あるいはEOR (Enhanced Oil Recovery) 技術と呼ぶ。以上のように、一つの油田からより多くの石油を回収するには、それに応じてより多くの投入エネルギーが必要になってくるわけである。

4. 非在来型石油

現状ほとんど実用化されていないが、将来的に利用できる可能性がある石油を非在来型石油と呼び、例としてオイルサンド、オイルシェールがある。国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) が発行している World Energy Outlook 2008 によると、長期的な視点で回収可能な非在来型石油は合計で6.5兆バレルとなっている。在来型石油資源の究極資源量が2兆バレルとも3兆バレルとも言われているので、非在来型石油の量の膨大さは相当なものであることがわかる。

オイルサンドは侵食などの地殻変動によって油層が地表付近に移動し、軽質成分が揮発してしまい重質化した石油を含んだ砂であり、カナダではすでに商業生産が行われている。生産の際に地下に水蒸気スチームを圧入して重質油を流動化させるために、投入エネルギーに見合う回収エネルギーが必要となる。実際、高温蒸気を生成するために大量な天然ガスが使用されている。

一方、オイルシェールは、埋没深度が石油の熟成度にまで達しなかった、「石油のできそこない」である。堆積岩中にケロジェンが比較的高濃度 (油分10%前後) で蓄えられた堆積岩 (泥岩) をオイルシェールと呼ぶ。また、このケロジェンを含む堆積岩が、さらに長い年月、地中深く熱と圧力を受け、ケロジェンから生成される液体状の有機成分が石油である (桜井, 2006)。オイルシェール採取後は乾留による熱分解により石油を抽出する必要があるため、ここでも投入エネルギーに見合う回収エネルギーが必要となってくる。

オイルサンド、オイルシェールが地表に近い場所に埋蔵されている場合は、大規模な露天掘りで採取するが、そうでない場合は、地下に水蒸気を圧入したり熱的刺激を加える等して、地下でビューメンの分離や乾留を行う。現状として、オイルサンドやオイルシェ

ールのEPRは現状決して高いものではないが (Hagens, 2008)、技術進歩によるEPR向上を評価していくことが重要である。

5. 技術革新の効果

石油の生産量や回収に伴うEPRの経年変化は、技術革新的要因と地質的要因との相互作用により大局的に決定されるものである。図3に米国メキシコ湾における石油生産量の経年変化と主な技術革新イベントを示す。1970年から1990年まで、生産量が伸び悩んでいる期間があるが、地質的境界と技術革新の相互作用が行われている状態と考えれば、様々な技術革新が功を奏して、生産量が増加したと解釈することができる。技術革新的要素がどのように寄与しているかを見極めることは、エネルギー供給的視点で大変重要である。

筆者は、米国内務省鉱物管理局 (MMS: Minerals Management Service) で公開されているデータを使用することにより、メキシコ湾における石油開発に係るEPR評価を試みた。なお、メキシコ湾に着目する理由は、開発対象の深度が年を追う毎に大水深エリアに移行していること、また大水深における石油開発技術に係る最新テクノロジーが適用されるエリアであり、将来の大水深石油開発を展望する上で有効となるだろうと考えたからである。図4に1977年から2004年までのメキシコ湾における石油回収のEPRの経年的変化を示す。1980年以降は大局的にEPRが向上していることがわかる。このEPR向上は技術革新によるものと考えられるし、結果として図3に示したように生産量も増加していることもわかる。しかし、向上し続けるEPRもどこかで低下を始めるときがあり、それを適切に把握することが重要である。

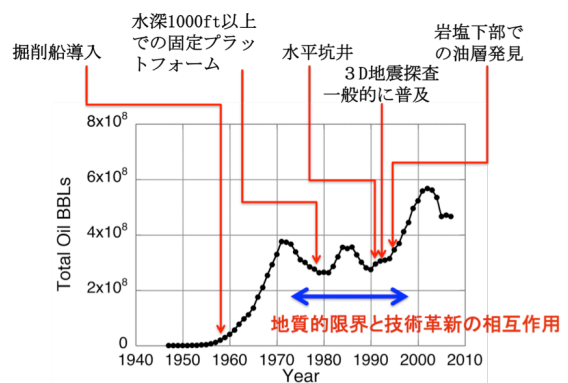


図3 米国メキシコ湾における石油生産量プロフィール (米国内務省鉱物管理局のデータを使用) と主な技術革新イベント

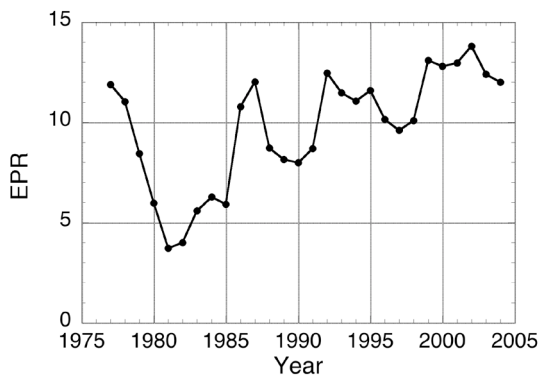


図 4 米国メキシコ湾における EPR の経年変化

6. 石油回収の EPR 低下と実体社会への影響

前節では、メキシコ湾における石油回収の EPR について紹介したが、米国全体ではどうなるのであろうか。図 5 に米国の石油生産量と EPR の経年的変化を示す。米国の石油生産量は 1970 年頃をピークとして減耗していることがわかる。さらに図 5 に示した EPR の経年的変化を見ると、1975 年付近において EPR が低下を始めていることがわかる。米国の例では、生産ピークと EPR 低下時期がほぼ一致していることがわかる。

石油を生産する過程においては、技術革新効果と地質的境界の相互作用により、その生産量が決定されてくることを述べた。1975 年から 1985 年頃まで、それまでの 2 倍以上の石油掘削が行われたが、生産量減耗を食い止めることができなかった (Hall et al., 2008)。すなわち、米国全体における石油生産としては、技術革新効果に比べて地質的境界が支配的な状態にあると解釈できる。もちろん、これはあくまで大局的な評価であるから、個々の油田では事情が異なってくるし、さらなる精査は必要であると思う。

さて、米国での石油生産は 1970 年頃にピークを打ち、その後まもなく EPR 低下が開始したわけだが、このことが米国社会にどのような影響をもたらしたのであろうか。前述の Hall 教授は以下のように考察している。石油生産ピーク後は輸入原油への依存が増し、また EPR 低下に伴い、石油回収のためにより多くのエネルギーが必要になった。すなわち、それまで経済活動に投入されてきた資金あるいはエネルギーは、石油回収のために振り向けられることになる。結果として、個々の企業は燃料高による影響を受け、製品価格高騰による需要減退が起こった。1970 年代の米国で起きた高インフレ率と景気後退 (スタグフレーション) が発生した理由について、通常の経済理論では説明できない現象を、エネル

ギーの視点から容易に分析できることは興味深いことである。EPR が高いということは、それだけ経済活動など社会で利用できる余剰のエネルギーがあるということであり、経済の拡大・多様化を可能とする。

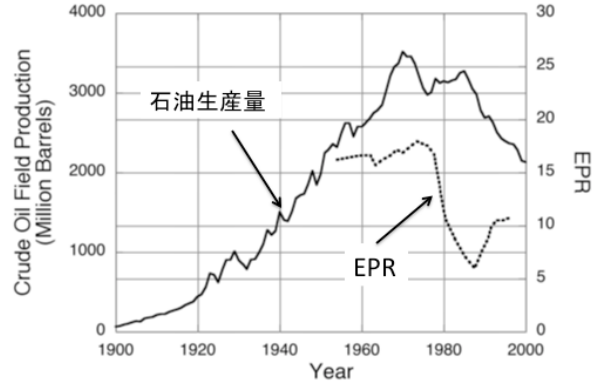


図 5 米国における石油生産量 (米国エネルギー情報局のデータを使用) と EPR (Cleveland (2005)のデータを使用) の経年的変化

7. おわりに

本稿では、EPR の定義を再検討することで、その意義を明確化した。すなわち、人間の行為を「余剰エネルギーを生産する行為」と「余剰エネルギーを消費する行為」とに分けると、EPR の本来的な適用範囲は前者であることを述べた。また、EPR の社会的な重要性として、EPR 低下が高インフレ率と景気後退 (スタグフレーション) をもたらし、我々の社会に深刻な影響を与えることを示した。代替エネルギーの可能性についても、EPR に基づいた科学合理的な技術評価が重要であると考えられる。

参考文献

- Cleveland, CJ, 2005, Net energy from the extraction of oil and gas in the United States, *Energy*, 30, 769-782.
- Cleveland, CJ, 2008, Energy, Environmental economics and Net energy analysis, [http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_\(EROI\)](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROI))
- Hall, C.A.S. and C.J. Cleveland. 1981. Petroleum drilling and production in the United States: Yield per effort and net energy analysis. *Science*, 211, 576-579.
- Hall, C.A.S., R. Powers and W. Schoenberg, 2008, Peak oil, EROI, investments and the economy in an uncertain future. pp. 109-132 in Pimentel, David. (ed). *Renewable Energy Systems: Environmental and Energetic Issues*.
- Mulder, K., Hagens, N., 2008, Energy Return on Investment: Towards a Consistent Framework, *AMBIO*, 37, 74-79.

- Hagens, N., 2008, Unconventional Oil: Tar Sands and Shale Oil - EROI on the Web, Part 3 of 6, <http://www.thespiralbalance.info/oilsandsoverview.html>
- Odum, H.T. 1973. Energy, ecology, and economics, *Ambio*, 2, 220-227.
- 桜井紘一, 2006, 帰ってきたオイルシェール～一世紀にわたる技術開発に飛躍の芽～, 石油・天然ガスレビュー, Vol.40, no.4, 1-23.
- 松島 潤, 2009, エネルギー収支分析(EPR)によるオイルピークの定量的評価, *JETI (Japan Energy & Technology Intelligence)*, Vol. 57 No.2, pp. 32-35.
- 松島 潤, 2009, エネルギー収支的視点から見た石油開発, *ICEP ニュース*, No. 66, pp. 16-20.
- 石井吉徳, 石油最終争奪戦～世界を震撼させる「ピークオイル」の真実, 日刊工業新聞社, 247p (2006).
- 産業技術総合研究所・オイルピークを見据えたエネルギー関連研究戦略検討委員会、成果報告書、100p (2007).
- 松島 潤, 「石油ピーク」論を理解するための基礎知識(1) -石油資源-, もったいない学会 WEB 学会誌, Vol. 1, pp. 11-14 (2007).