

## 解説

## 「石油ピーク」論を理解するための基礎知識(2) –Hubbert モデル–

松島 潤<sup>1</sup>

投稿受付：2008年11月16日 受理日：2008年11月18日 WEB公開日：2008年12月8日

## 要旨

石油ピーク論は、人類が利用可能な石油の半分を使用したこと、またその人類社会への影響を指摘するものである。本解説では、このような石油ピーク論の基礎となる数理モデルとして、古典的であるが最も有名な Hubbert のモデルについて説明する。

## 1. はじめに

石油ピーク論自体は、人類が利用可能な石油の半分を使用したこと、またその人類社会への影響について警鐘しているものであるが、従来型の「石油ショック」と同質に理解される場合や、石油の枯渇と誤認される場合も見受けられる。人類が利用可能な石油の「半分を使用したこと」、「減耗していくこと」の重大性がなかなか理解されにくいためであろうか。このことを理解するためには、石油の「量」ではなく「質」の視点からの理解が必要となる(石井,2006)。人類が利用可能な石油の半分を使用したことの重要性は、生産コストの安い回収しやすい石油を取り尽くし、残りの半分は生産コストの高い回収し難い石油として残存している点にあることが理解できる。

前編(松島,2007)では、天然資源である石油に関する基礎的事項を述べた。石油が地下資源として、どのように生成され、どのように地下に存在し、どのように発見・回収されているかについて概説し、「石油ピーク」論を理解する上での基礎知識を提供することを試みた。ここでは、石油の生成段階における時空間的制約による地域的な偏在性・有限性、埋蔵量の地質学的ならびに政治的不確実性について述べた。さらに、エネルギー収支の視点から石油の「量」だけではなく「質」を考えることで、石油ピークの重要性が理解でき

ることも指摘した。

本解説文では、石油ピーク論の基礎となる数理モデルによって説明する。石油の生産量と埋蔵量との関係については、Hubbert のモデルが古典的であるが最も有名であり(e.g.,Deffeyes, 2005)、このモデルについて解説する。

## 2. 石油ピーク論の創始

石油ピーク論の創始については、意外にも今から約50年前まで遡ることができる。1956年に米国の石油地質学者である M.King Hubbert (1903-1989)は、米国本土48州の石油生産ピークは1970年頃になることを発表した(Hubbert, 1956)。図1は、Hubbert(1956)による予測結果を示している(横軸は西暦、縦軸は石油の年間生産量)。なお、石油の量を表す単位として bbl (バレル) が使用されるが、前述のように1バレルは約159リットルである。図1において、Cumulative production は既に生産された石油の量、Proved reserves は今後生産を期待できる石油の量、Ultimate は今後の技術発展により究極的に生産可能と見込まれる石油の量(これを究極埋蔵量と呼ぶ)を示す。実線はそれまでの年間生産量の履歴を表し、点線はその予測である。Hubbert は究極埋蔵量を1500~2000億バレルと推定しており、最小と最大の場合についての予測が図1

<sup>1</sup>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



にそれぞれ示されている（2000 億バレルとした場合のピークが 1970 年頃となる）。図 1 を見て驚くことは、Hubbert が予測をした 1956 年においては、生産量は上昇を続けている過程にあり、その状況で生産がピークを迎えることは一般的に想像できないことであろう。実際、Hubbert の予測はその当時受け入れられなかった。Hubbert が予測に利用した図 1 の曲線が「にきび」の形状に似ているため、「Hubbert's pimple（ハバートのにきび）」と皮肉られたりもした（Clark, 1983）。はたしてその後、1970 年に米国本土 48 州の石油生産ピークは訪れた。それ以降、生産量は着実に下降して行き、米国は石油輸入に依存することになった。Hubbert の予測は見事に的中したのである。

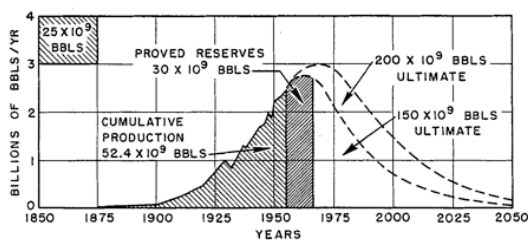


図 1: Hubbert により作成された米国本土 48 州の石油生産の履歴（実線）と生産予測（点線）（Hubbert, 1956）。

その後、Hubbert の石油生産の予測研究がきっかけとなり、世界規模での石油生産のピーク時期を予測する研究が行われるようになった。そこでは、様々な手法が適用されており、また使用するデータにも相違があるため、ピーク到来時期については図 2 に示したような分布になっている。すでにピークを迎えているとするもの、近い将来ピークを迎えると予測するもの、数十年後にピークを迎えるもの等様々である。ここでは、それらを詳細に比較議論することはせず、予測手法として最も有名な Hubbert の方法を紹介する。

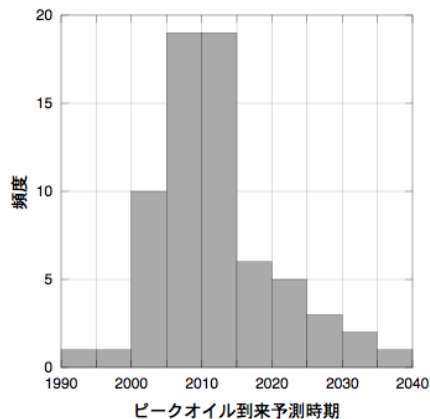


図 2: 約 70 文献により予測された石油生産のピーク時期の頻度分布。（独）産業技術総合研究所がまとめたデータ（産業技術総合研究所, 2007）より作成した。

### 3. Hubbert の方法

なぜ Hubbert は石油生産を予測できたのだろうか。Hubbert の予測にはいくつかの仮定があるので、それらについて順を追って以下に説明する。

#### (a) 石油の発見量と生産量の関係

石油が発見されてから、実際に石油が生産活動に入る間には一定の遅れが存在するので、発見量のパターンと生産量のパターンとの間には、図 3 に示すような関係があると仮定している。図 3 において、発見量のパターンを時間方向にずらしたものが生産量パターンとなっている。この仮定においては、発見量パターンにおいてピークがわかれば、ある年数後遅れて生産ピークが訪れることを予測できる。

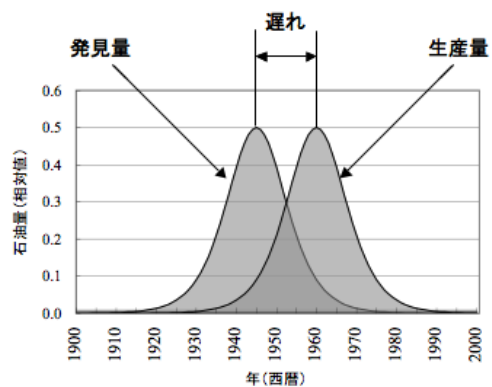


図 3: 石油の生産パターンは発見量パターンを時間方向にずらしたものとして表現する。

#### (b) ロジスティック曲線

Hubbert は、有限な天然資源である石油の累積生産量は図 4(a)に示すようなロジスティック曲線で表現できると仮定した。図 4(a)において、累積生産量は無限に拡大できるのではなく、究極累積生産量 ( $Q_{\infty}$ : 前述の究極可採埋蔵量と同等) に収束する様子がわかる。ロジスティック曲線は以下の(1)式で数学的に表現できる。

$$Q = Q_{\infty} / (1 + \exp(-a(t - t_0))) \quad (1)$$

式において、 $t$  は時間（ここでの単位は年）、 $Q$  は時間  $t$  における累積生産量、 $Q_{\infty}$  は最終的な（時間  $t$  が無限の場合）の累積生産量、 $a$  と  $t_0$  は係数である。(1)式を  $t$  に関して微分して整理すると以下の(2)式ようになる。

$$dQ/dt = a(1 - Q/Q_{\infty})Q \quad (2)$$

なお、 $dQ/dt$  は年間生産量に相当する。(2)式を図示すると図 4(b)のような釣鐘型のグラフになる。図 4(b)において 1960 年において生産量がピークになっていることがわかる。す

なわち、係数  $t_0$  は(2)式のピーク位置を決定するパラメータである。図 4(a)と図 4(b)を比較すると、累積生産量と年間生産量との重要な関係が導かれる。すなわち、累積生産量が究極可採埋蔵量  $Q_\infty$  の半分に達したときに、生産量はピークを迎えることである。逆に言えば、生産量ピークを迎えたときには究極可採埋蔵量の半分をすでに生産したことを意味する。この数学モデルが Hubbert の予測モデルの本質部分であり、(2)式で示された釣鐘型の曲線は Hubbert 曲線とも呼ばれており、そのピークを Hubbert ピークと呼ぶ。

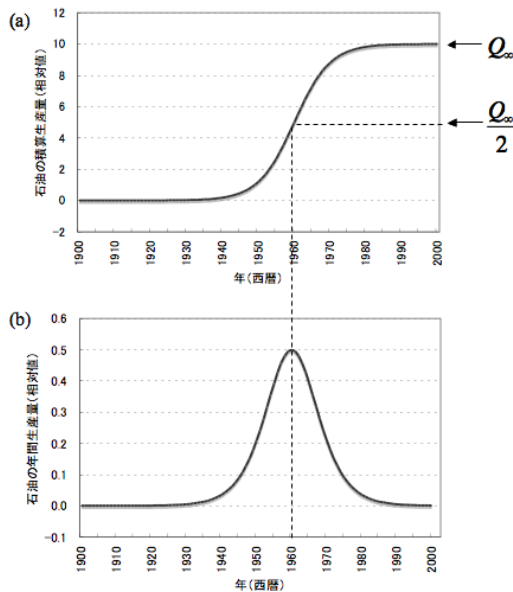


図 4: (a) (1)式で表されたロジスティック曲線、(b) (a)で示したグラフを時間に関して微分したもの。これを Hubbert 曲線と呼ぶ。

(2)式が意味するところを Deffeyes (2005)は以下のように考察している。(2)式中の  $Q/Q_\infty$  は究極可採埋蔵量に対する、すでに生産した量の割合を表す。したがって  $(1 - Q/Q_\infty)$  は、残存可採埋蔵量の割合を表すことになる。このように考えると、石油の年間生産量  $dQ/dt$  は、残存している生産可能な石油の量の割合  $(1 - Q/Q_\infty)$  に依存することがわかる。このような効果は、例えば生態系の個体数増加問題においても、存在密度が高くなると個体数は増加率に負の効果を与えるとされ、これはロジスティック効果と呼ばれる。

さて、(2)式において、 $a$  と  $Q_\infty$  は未知数であるのでこれらの値を決定する必要がある。Hubbert は以下の手順で推定した。

まず、(2)式を以下のような(3)式に変形する。

$$dQ/dt \cdot 1/Q = a + (-a/Q_\infty) Q \quad (3)$$

(3)式において、 $dQ/dt$  を  $P$  とし、 $(-a/Q_\infty)$  を

$b$  とすれば、(3)式は(4)式のような一次関数の式となる。

$$P/Q = a + bQ \quad (4)$$

(4)式は、縦軸に年間生産量を累積生産量で割った値  $P/Q$ 、横軸に累積生産量  $Q$  をとったものである。ここで、年ごとにそれらのパラメータに対応する値をプロットし、(4)式で直線近似する操作を模式的に図式化すると図 5 のようになる。図 5 において網掛け部分が生産の履歴となる。かくして、究極可採埋蔵量  $Q_\infty$  は近似直線を延長して  $Q$  軸と交差する点  $(-a/b)$  より求めることができる。同様に  $a$  の値は近似直線と  $P/Q$  軸の交点より求めることができる。このように  $a$  と  $Q_\infty$  が求められれば、(2)式の釣鐘曲線を描くことができることになり、最終的に石油ピークの到来時期を予測することができる。

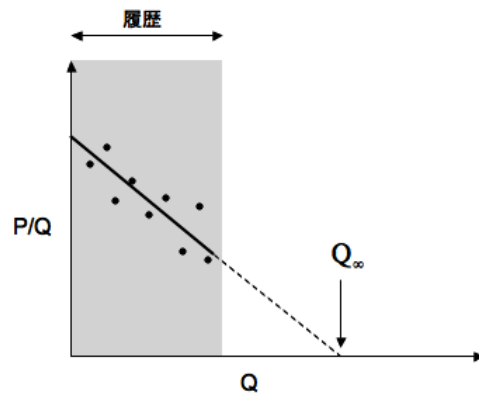


図 5: 究極可採埋蔵量  $Q_\infty$  を推定する方法を模式的に示した。

### (c) 妥当性

最後に Hubbert の方法の妥当性について触れておく。上述したように Hubbert の方法はとてもシンプルなものである。Hubbert 自身は、この方法が最も良く石油生産の挙動を表現できるとし、そのことを、靴が足に合っているからその靴を履いているような単純なものとして主張する (Deffeyes, 2005)。Hubbert は彼自身の手法の妥当性について深く述べないが、その背景には Hubbert 自身が有する超越した地球自然観があるものと推察する。実際、単純な法則が複雑な事象を概ね良く近似できる経験を我々は持っている。

これまで、Hubbert の方法の妥当性に関する文献は数多く出版されている。容易に想像できるように、Hubbert の方法への異論は多くある。とりわけ、前述の油田成長の効果が過小評価されているという点、投資環境・技術革新などが Hubbert の時代と現代とでは大きな隔りがある点が Hubbert の手法の弱点であると指摘されている (Nehring, 2006)。Deffeyes

(2005)は、技術革新による油田成長は、Hubbert 曲線に内在されるものとして反論している。さらに、Campbell and Laherrere (1998)は、技術革新による将来的な生産性の向上効果は、油田の埋蔵量評価の際にすでに考慮されている点を指摘している。予測であることの性質上、真偽は歴史が証明するより他ない。

なお、生産ピークを迎えた 1970 年以降の米国の例では、中東の石油にシフトできたため生産は下降したと考えれば、世界的な生産ピークを迎えた際にシフトすべきエネルギーが無ければ、生産は下降することができず猛威的な原油価格の高騰をもって需要を減退させ、結果的に生産は減退するのだろうか。

#### 4. おわりに

本解説文では石油ピーク論として最も有名な Hubbert のモデルについて説明してきた。数学的にはロジスティック曲線を基礎とする単純なモデルであり、何故このような単純なモデルで複雑な要因の影響を受ける石油生産量予測をできるのか、理解に苦しむ一面もある。しかし、その背景には Hubbert 自身が有する超越した洞察力、地球自然観があるのかもしれない。その意味で人間としての Hubbert の歴史・哲学に興味を持つのである。次稿では、そのような視点で解説することとしたい。

#### 参考文献

- Campbell C., Laherrere J., The End of Cheap Oil, Scientific American, March 1998, p. 78-83 (1998)
- Clark, D. R., "King Hubbert", The Leading Edge, 2, pp. 16-24 (1983).
- Deffeyes, K. S., Beyond Oil, Hill and Wang, 202p (2005).
- Hubbert, K. M., Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Publication 95, Shell Development Company, Exploration and Production Research Division (1956).
- Nehring R., Hubbert's Unreliability-3, Oil & Gas Journal, April 24, pp. 43-51 (2006)
- 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).