



# 21 世紀の世界の石油埋蔵量（資源量）を どう見るか：レビューと二三の考察

（財）日本エネルギー経済研究所 客員研究員 てらしま ひでし 寺嶋 英志

（ジャパン石油開発株式会社）

## はじめに

実際、将来の世界の埋蔵量に関する問題全体を論じることは容易なことではない。しかしながら、世界の埋蔵量をどう考えるかに関しては、すでに世界の専門家は楽観論者と悲観論者という両極端の 2 つの陣営に分かれて激しく論争していることは広く知られている。もちろん両極端の間にはいろいろな異なる見解が存在し、それらの間になされた論争のいくつかはすでに発表されている。いまさらほかに何を付言することがあるかということになるが、両極端の見方が妥協せずに存在していること自体、この問題にまだ議論をさしはさむ余地のあることを意味しているであろう。

本報告の目的は、21 世紀を目前にして、世界の石油エコノミストや石油資源アナリストは、(1)世界の究極石油埋蔵量をどのように見ているか（公表された究極埋蔵量の推定値そのものには拘泥しない）、また(2)21 世紀に石油埋蔵量（および石油生産量）はどのように推移すると予想しているか、を問題点として文献レビューを行い、それを中心にして考察することである。埋

蔵量に関連する問題を扱った文献は予想どおり非常に多く、代表的なものすべてに十分に目を通すことは時間的に困難なことであった。したがって個人的見解として二三の考察の結果を述べることになったが、結論的にいって本報告者の立場は楽観論側にある。

## 1 . 背景

この半世紀において資源エネルギーの分野に起こった最も注目すべき変化は、消費量の急激な増加、すなわち指数関数的増加であった。このような増加はエネルギー資源に限られたものではなく、金属資源にも見られる現象であった（西山 1998）。1970 年代に入ってエネルギー資源も金属資源もそれ以前に比べて成長率がより小さくなった。しかしながら、1970 年代始めまでは、エネルギー生産量の増加率と金属資源生産量のそれはほぼ等しかったが、それ以後、前者は後者を上回った。他の資源に対して、エネルギー資源の相対的な重要性は石油危機後により大きくなっているように見える。すなわち世界のエネルギー使用量は

鈍化していないということである。

世界規模での化石エネルギー資源について現在までの生産状況をまとめてみると次のようになる。これらの化石エネルギー資源は、歴史的に見て世界的に枯渇に瀕したことは一度もなく、需要がある限りにおいて、生産量は全体的に増大してきた。そしてこのような生産量の増加が可能であった理由は、(a)たえず新しい資源量を発見することによってつねに消費した分が補充されてきたこと、と同時に、(b)補充される量が生産される量につねに見合っていたか、より多かったことである。

しかしながら、化石エネルギー資源は非再生可能資源である。生産が続けられる限り、非再生可能資源はいつか枯渇しなければならない。もし生産量の増加が指数関数的であればその資源はずっと速く枯渇し、たとえ一定の増大率に抑えてもいずれは補充量が生産量に追いつかなくなる。このように生産する限り枯渇に向かうとすれば、その資源をできるだけ長くもたせるためには、ある時点から生産量を時間とともに減少させる(増大率を負にする)しか方法がない。しかしそれぞれの国が石油の生産量(と消費量)を決めている現状では、世界の生産量(と消費量)をいまずぐ抑制することはほとんど不可能に近いことであろう。したがって現在のところ(近未来においても)石油の生産量(と消費量)は資源量からの制約なしに推移することになる。こうして21世紀の化石エネルギー資源(とくに石油資源)の見通しは、これまで増大する一方であった生産量がいつ資源量による制約から減少を開始するかにかかっているこ

とになる。資源量による制約とは、つまり資源量が有限であることが基礎になっていることである。

## 2. いま石油資源の枯渇が問題にされる理由

石油資源の枯渇は早くも今世紀のはじめから何度も声高に叫ばれてきた。またここ数年こうした石油資源の枯渇問題が世界でより頻繁に議論されるようになってきている。しかしながら、このような議論が最近とみに活発になった理由は、必ずしも石油の生産能力に限りのあることが現実に見えてきたことにあるわけではない。少なくとも他に3つの理由をあげることができるであろう。

第一の理由は、それは周期的に起こる流行であり、また世紀の変わり目であるということからくる心理的なものである。将来予測を行なう際には時間軸が必要である。2000年から2100年までの需要供給モデルの作成など、100年モデルを考えるには切りのよい格好の時期なのである。2000～2020年の予測から2000～2100年の予測にゆくのは心理的に容易である。こうして今後の100年を考えなければならなくなると、当然、資源の枯渇問題が視野に入ってこざるをえない。これまでこのようなモデルに資源の枯渇問題が本質的に組み込まれたことはほとんどなかったからである。

第二の理由として、70年代初めの石油ショックを経験してすでに四半世紀が経過し、そろそろ次の石油危機に対応するための準備をするように世間の注意を喚起する必要が感じられていることである。現在、

世界の石油はどちらかといえば供給過剰気味にあり、OPECにも昔日の勢いはない。しかしながら、もはや大きな石油危機は発生しないと考える石油エコノミストやアナリストは多くないであろう。今後も石油危機が起こるとすれば、それは石油資源枯渇の不安を伴ってやってくるか、あるいは石油資源の有限性そのものが原因である可能性も高まってくることになるからである。

第三の理由としては、さまざまな技術が石油以外の多様なエネルギー源の開発に本格的に取り組むことを可能にするレベルに達したため、そのような技術をさらに発展させるための強力な動機として、石油資源の有限性に訴えることが有効なことである。これまでの代替エネルギー開発の第一目的は1970年代に起こったタイプの石油危機を回避することであったが、そのような回避が可能であるという自信が得られたあともそうした技術開発の努力を維持し発展させるためには、さらに根源的な資源量そのものの有限性に訴えることがもっとも手近な方法であるとされるのである。

### 3. 埋蔵量(資源量)の有限性およびR/P比について

まず、資源、とくに化石エネルギー資源の有限性とは何か。石油や他の重要な地下資源における理論上の最大上限を決めるものは、われわれの地球の大きさである(実際、地球の資源の量を論ずる場合に正確な値で確定している枠組みはこれだけなのである)。そして有用資源の存在が考慮される対象は、その地球のほんの一部である

表層の地殻である。さらに、資源が存在しても技術的に抽出できる場所は地表に近い部分に限られる。さらに、技術的・経済的に採算の合う資源のある場所となると特別に濃縮した地域(通常の油田・ガス田など)に限られる。こうしてわれわれが最終的にたどりつく資源量が埋蔵量である。最も確かな資源量は生産された量、つまり使用済みの量ということになる。

資源量もそれに含まれる埋蔵量も一般に外側に向かって(究極的に増える方向に)開いている。したがって埋蔵量は本質的に確定した量でもないし予め存在する量でもない。埋蔵量の大きさを決めるのはその時代の科学技術進歩のレベルおよび社会経済条件であって、それらが変われば埋蔵量の大きさも変化する。地球の体積や、地殻の体積はあまりにも大きいため実際上の上限としては役に立たない。このため資源量や埋蔵量の有限性が問題とされるとき、それらの上限は存在量の上限ではなくて、科学的認識、技術レベルおよび経済条件によって決まる上限なのである。

また石油の資源量と埋蔵量の有限性が言及されるとき、この表現は現在の生産量をいつまでも維持することは不可能であるという意味に使われることが多い。この場合に、確認埋蔵量の大きさ(R)を表わす一つの測度として、現在の生産量(P)を基準にしたR/P比がある。このR/P比はふつう年で表わされる。このため、この年数を用いて、ある国の埋蔵量、あるいは世界の埋蔵量があと何年で尽きるはずである、と結論されることになる。注意すべきことは、この比は現在の確認埋蔵量の大きさを単に最

新の年産量で割った結果にすぎず、資源量の有限性を示す指標では決してないということである。しかし、この比の値は日常的な大きさをもつ明確な数字で表わされるということも理由となっており、地下の状態を表わす客観的数字であるとして誤解される強い傾向がある。RもPもつねに変わる人工的な数字であり、しかも時間とともに変化するだけでなく、評価の仕方によっても異なるのである。

R/P比にもとづいた単純な結論によって世界の危機感をあおる傾向は石油産業の初期から存在した。しかしながら、石油の歴史によれば、R/P比にもとづいて、あと何年で石油がなくなると脅されても、それだけでは石油の生産量の増大傾向に歯止めをかけることはできなかったという事実がある。実際には、つぎつぎと埋蔵量の追加があったために、R/P比の実質的な減少が起こらなかったからである。R/P比の減少が年々はっきりと示されて埋蔵量（資源量）の「有限性」を実感できる状況にでもならない限り、人類は生産量をコントロールすることができないということなのかもしれない。

ところで、現在の世界の石油生産量を安定的に維持するためにはR/P比をどのような値に保つ必要があるのだろうか。理論上は、R/P比の値がどのような大きさであっても、現在の生産量を維持しうるのである。ある一定期間内に生産された量と同じだけその期間内に埋蔵量が補充さえされていれば、R/P比の大きさは一定であり、生産量と無関係にある。また、もし、その期間内の生産量よりも補充される埋蔵量のほ

うが大きければ、たとえ生産量が増大中であっても、R/P比が一定のままであることが可能である。1981年以来、全体として世界はこの状態を続けていると見なすことができる（30年より大きいR/P値がずっと保たれている）。現在世界はRとPの関係のきわめてよい状態にあるといえる。したがって、生産量の維持という観点から問題となるのは、R/P比の大きさ自体ではなくて、ある一定の生産量を維持しているときにR/P比が減少する場合であろう。R/P比が減少すれば、いつか生産量は埋蔵量減少による影響すなわち資源量の制約をより大きく受けることになり、R/P比の大きさが生産量を決定する状況が発生する。それゆえ、実際上は、安定的に維持できる生産量を決定するための適正なR/P比が存在するのである。たとえば、仮にR/P比が2年とか3年という小さい値ならば、それはきわめて危機的な状況であるに違いない。M.G.Salameh（1999）は、このように生産量を決定するようになるR/P比を10年であるとし、これを臨界R/P値と呼んでいる。

#### 4 . 悲観論者 vs. 楽観論者

究極（可採）埋蔵量とは、すでに生産された量（累計生産量）に未生産の確認埋蔵量と未発見の推定埋蔵量を加えた数字である。この究極埋蔵量の大きさに関して、1995年ごろから悲観論と楽観論の2つの考え方に分かれた論争が起こった。議論の始まりは、問題の性質上、悲観論者の側からであった。

悲観論者は究極埋蔵量を1兆8,000億バ

レルと考える。既生産量を 8,070 億バレル (1997 年末現在) , 未生産の確認埋蔵量を 8,180 億バレル(同)として , 彼らの考える未発見埋蔵量は 1,750 億バレルであるということになる。これに対して , 楽観論者は , 究極埋蔵量が 2 兆 3,000 億 ~ 3 兆バレルであると主張する。同様な計算から , 彼ら楽観論者の未発見埋蔵量はおよそ 6,800 億 ~ 1 兆 3,800 億バレルの範囲ということになる。ゆえに , 悲観論者と楽観論者の間にある違いの大部分は , 未発見の埋蔵量の大きさに関してどのように考えるかにある。未発見埋蔵量に関する両者間の差は約 5,000 億 ~ 1 兆 2,000 億バレルの範囲である。

悲観論者が彼らの考え方において第一の根拠とするのは , 今後の埋蔵量追加となるべき有望な地質構造がもう限られてしまったという彼らの結論と , 新しい油田の発見率が世界全体として下がりつつあるという事実である。1950 年代にアメリカの石油生産量に対して予測を行なった M.K.Hubbert がこの立場の古典的な例である。当時 , 彼は , 米国 48 州には十分な石油埋蔵量の追加は期待できないので , まもなく生産量が減退するであろうという警告を出したことで有名になった。現在の悲観論者の代表は , C.J.Campbell , J.H.Laherrere , L.F.Ivanhoe , A.Perrodon たちである。

悲観論者の観点を要約すると :

- (1) 発見率は少なくとも 20 年間減少を続けているが , 一方 , 新しい油田の発見は年間生産量のわずか 25% にすぎない。
- (2) 世界の石油生産量のおよそ 5 分の 4 は 1973 年以前の発見である。
- (3) 現在世界的な権威があるとされる埋蔵

量データは , OPEC 諸国の「政治的」に水増しされた埋蔵量を含んでおり , 実際よりかなり大きく評価されたものである。

- (4) 上記埋蔵量データには , 非在来型石油 (ベネズエラのオリノコ石油地帯の重質原油など) や生産される確率の非常に低い (5%) 予想埋蔵量が含まれている。
- (5) 石油生産は Hubbert 曲線に従う。したがって , 埋蔵量の 50% が生産されたときがピーク生産であり , 究極埋蔵量 1 兆 8,000 億バレルに対するピークは 2000 年ごろである。
- (6) 油田回収率が時間的に向上するというのは幻想であり , 初期埋蔵量の推定値が不正確であったから起こったことである。

楽観論者の未発見量が大きな幅をもっているのは楽観論という性質からくる一つの結果であり , 一方 , 悲観論者の未発見量は自然狭い範囲におさまっている。もちろん悲観論者グループでも見解の幅はあり , もっとも厳しい見方をするのが C.J.Campbell である。たとえば , 悲観論者のなかにも , 「Campbell の未発見量は石油業界のコンセンサスのうちでも最小値である。彼は未知の生産層について何の考慮も与えていないからであるが , 技術進歩によって 2,500 億 ~ 3,000 億バレルの範囲にはなるであろう。」という意見がある (G.Cope 1998)。

楽観論者が第一の根拠とするのは , 技術の進歩と探鉱開発コストの低下によって新しい埋蔵量の追加が可能になるという確信である。彼らの基本的な態度は , 究極可採埋蔵量というものを動的概念でとらえよう

とするものである。この立場をとるのは、M.A.Adelman、M.C.Lynch、P.R.Odellら、それに米国地質調査所(USGS)の評価グループである。

悲観論者に対する、楽観論者たちからの反論を要約すると：

- (1) 悲観論者は技術進歩による効果と新技術の役割(油田回収率の向上、コスト低下によるマージナル油田の収益性の改善、新しい埋蔵量の発見と既存油田の回収率向上など)を無視している。
- (2) 悲観論者は在来型石油を非常に狭く定義している。メキシコ湾・ブラジル沖・西アフリカ沖などの大水深油田の寄与を軽視するか無視している。
- (3) 悲観論者は油田寿命の(とくに後期における)埋蔵量成長を無視している。
- (4) 悲観論者が論拠にしている発見データは限定的なものであり、総可採埋蔵量を過小評価している。
- (5) 中東油田の発見率が過去20年間に低下した理由は、主にOPEC石油需要の低下によるものである。

楽観論者は、石油の資源量にはまだ予想されていない量の増加があると考え。しかしながら、楽観論者といえども無限の石油資源量があるとしているわけではない。彼らの楽観論とは、将来の適切な時期に代替エネルギーに取って代わられるだけの在来型石油が十分にあるという楽観主義なのである。「楽観」できるのはせいぜい21世紀半ばすぎまでであろうが、その時までには石油は代替エネルギーに置き換えられていると考えられている。

悲観論者陣営がとくに重要視することの

一つは、1980年代後半に主要産油国(ベネズエラ・イラン・イラク・アブダビ・サウディアラビア)が自国の埋蔵量に対して合計2,770億バレルの政治的な上方修正を行なったことである。しかしながら、仮にこれらOPEC諸国による大幅な上方修正がなかったとしても、その後の世界の石油埋蔵量は増大する方向にあった可能性がある。この主要OPEC諸国の上方修正は、彼らがそれまで埋蔵量として認定しなかったか、あるいは発表しなかった未熟な資源量が埋蔵量カテゴリーに繰上げ計上されたものであったと考えることもできるからである。よって、もしそのような上方修正がなかったとしても、その部分がその後起こったであろう着実な埋蔵量の増大に寄与した可能性が大きく、逆に悲観論者にとっては不利な状況となっていたかもしれない。

悲観論側のC.B.Hatfield(1997)は、世界の埋蔵量を1兆バレルとして、年260億バレルの消費率を続ければ埋蔵量は2036年までに枯渇する、と述べている。このような計算は1997年時点での埋蔵量が単にとり尽くされたならばという仮定であり、次年度から埋蔵量追加がゼロで単に埋蔵量を取崩す(R/Pを減らす)のみならばという仮定にすぎない。彼の議論は将来起こりうる埋蔵量の追加を完全に無視している(もっとも、悲観論者は未発見の埋蔵量はきわめて少ないと信じているが)だけでなく、現在のところは埋蔵量成長率がプラスなのであるから、信じられないほどに非現実的なものである。

## 5 . 資源量および埋蔵量の信頼性

世界の埋蔵量および資源量のサイズに関して、われわれに入手可能な歴史的に一貫性をもったデータは、米国の2つの雑誌World Oil(WO)とOil & Gas Journal(OGJ)の毎年の統計、それに過去数年おきに見直されてきた米国地質調査所(USGS)の評価、の3種類があるだけである。それ以外に、われわれは、オリジナルに評価された世界の埋蔵量統計をもたないのである。近代石油産業の歴史のほぼ全期間をとおして世界を支配してきた三大メージャ石油会社のエクソン・シェル・BPはおそらく長年積み上げた独自の埋蔵量データを所有していると推測されるが、それが外部にもれることはまったくないように見える。有用な「BP世界エネルギー統計レビュー」(いわゆる「BP統計」)でさえも世界の石油埋蔵量統計としてOGJのそれをそのまま採用していることはいわゆる「メージャ流」であるのかもしれない。

J.Laherrere(1999)は、OGJとUSGSの埋蔵量データがOPEC諸国の大雑把な政治的埋蔵量を含んでいる一方、それらの扱う米国の埋蔵量がSEC(証券取引委員会)による厳格な埋蔵量分類基準にしたがっているという矛盾を問題にしている。彼はまたWOに対しても、評価手法の一貫性のなさとして、1998年8月に発表した1996年末時点の世界埋蔵量評価において前年8月の推定値1兆1,600億バレルから1,830億バレルの削減をしたことをあげている。WOとOGJの推定値比較において、1996年

末における埋蔵量[約1兆1,600億バレル(WO)]>約1兆190億バレル(OGJ)]から、1997年末には[約9,740億バレル(WO)]<約1兆200億バレル(OGJ)]へと、両者の推定値の関係が逆転したからである。とくにOGJとWOの埋蔵量統計は国ごとに異なる埋蔵量定義が適用されて得られた数字の合計であることに注意すべきである。これは第一に世界標準として適用できる埋蔵量定義が存在しないことによるが、たとえそれが存在しても厳密に適用するかどうかはその国の問題になる。世界の埋蔵量をより統一的に扱おうとする試みとして、1997年に米国の石油技術者協会(SPE)と世界石油会議(WPC)による共同定義が提出されたが、各産油国が自国の埋蔵量を算定する以上、今後も統一性ある埋蔵量データを得ることは難しいであろう。この意味でより一貫した世界埋蔵量データは、国境横断的に堆積盆地ベースの評価がなされてきたUSGSの評価であろう。

## 6 . 米国地質調査所の評価

米国地質調査所(USGS)は自国の経済的安全保障が世界のエネルギー資源に密接に関連していることを認識して、1980年代前半から世界の炭化水素資源量の評価を定期的実施してきた。これまでに資源量評価が4回連続的に発表されてきた。これらは同じ評価チームにより基本的に首尾一貫した方法論にもとづいて実施されたものであり、客観的に世界の資源量と埋蔵量の進化を評価できる最良のデータであるといえる。1997年の世界石油会議(北京)におい

て、最新の USGS 評価が発表されるものと一般には予想されていたが、その提出はなかった。おそらくそれまでの評価主任者 C.D.Masters の引退があり、各種の新しい評価手法の採用があったために、先延ばしになったものであろう。

USGS(1997)の結果によると、世界の在来型石油の未発見資源量における1981年から1993年までの変化は相対的に小さい。これと対照的に、世界の既発見埋蔵量は、この期間に合計3,790億バレル増大した。評価ごとに既発見埋蔵量が増大するトレンドは、将来の埋蔵量成長がつねに過小評価されていることを示すものと解釈され、したがってこの効果は将来に対する石油供給不安を緩和する方向にあることを意味している(表1)。

USGSの評価結果は、炭化水素の埋蔵量だけでなく資源量も時間とともに変化すること、すなわち究極可採量そのものに固定した絶対的な値はないことを示している。ゆえにUSGSの解釈から、資源量と埋蔵量は増大するものであり、そしてその増大の上限は視界の中に入ってきてはいない、つまり現時点では実際上無限であると見なされ得るであろう。

またUSGSの評価は、世界の在来型石油資源量(既発見埋蔵量+未発見資源量)は

エネルギー換算で天然ガス資源量にほぼ等しいという結果を得ている。このことは在来型石油の次期代替物としての天然ガスの地位が正当なものであることを確認している。

## 7. 究極原油回収量vs.ピーク生産年

世界の石油生産量は1983年以来現在も増大中である。いつ世界が生産量のピークを迎えるかを予測することは、世界の石油アナリストにとって、悲観論者であるか楽観論者であるかにかかわらず、きわめて興味深いことであろう。これまでに多くの予想がなされているので、推定究極埋蔵量の違いが、予想されるピーク年にどのように反映されているかを見ることができる。J.D.Edwards(1997)は、世界の究極原油回収量およびピーク生産年の予測を一覧にしている。それをもとにして代表的な著者の予測結果を表2にまとめて示す。

これから、究極回収量を2兆バレル付近またはそれ以下と見なす悲観論者は2000年前後にピーク生産年があることを予想しており、一方、究極回収量を3兆バレル付近とする楽観論者は2025年までにピーク年がくるであろうと予測していることが見てとれる。

表1 USGSの世界石油ガス評価の要約

評価年(1月1日)	石油(10億バレル)				ガス(石油換算10億バレル)			
	1981	1985	1990	1993	1981	1985	1990	1993
累計生産量	445	524	629	699	-	196	266	292
既発見埋蔵量	724	795	1,053	1,103	-	651	750	856
未発見資源量(最頻値)	550	425	489	471	-	700	736	780
将来資源量(最頻値)	1,274	1,220	1,542	1,574	-	1,351	1,486	1,636
総資源量	1,719	1,744	2,171	2,273	-	1,547	1,752	1,924



表2 代表的な著者による究極回収量とピーク年の予測

著者（発表年）	究極回収量 （10億バレル）	ピーク年
Hubbert（1969）	2,100	2000年
Moody（1978）	3,200	2004年
Odell/Rosing（1983）	3,000	2025年
Bookout（1989）	2,000	2010年
Townes（1993）	3,000	2010年
Laherrere（1994）	1,750	2000年
Campbell（1995）	1,650	1997年以前
Mackenzie（1996）	2,600	2019年
Mabro（1996）	1,800	2000年
Edwards（1997）	2,836	2020年
Al-Jarri & Startzman（1997）	1,760	1996年

## 8 . Hubbert 曲線の意味について

[ 生産/需要/埋蔵量予測に使用できるか ]

悲観論者は Hubbert 流の分析法を信奉し、鐘の形をした Hubbert 曲線をもっとも信頼できる生産量予測の道具であると見なしている（Campbell 1998 ,Ivanhoe 1996 , Hiller 1997 など）。彼らは生産量の予測だけでなく埋蔵量推定や需要予測にさえこの曲線の助けを借りることまでしている。

A.S.Al-Jarri & R.A.Startzman( 1997 )は、Hubbert 曲線を適用して世界の生産予測を行なった。彼らは、世界の石油生産量が1996年に7,240万B/D(バレル/日)でピークに達し、そして2000年まで7,000万B/Dを維持し、その後は減退に入って、2050年までに1,820万B/Dになるであろうと予測した。（Campbellは2050年には1,550～1,620万B/Dになると予測している）。さらに彼らは、世界の究極原油回収量は約1兆7,600億バレルであろうと結論した。これまでの他の予測に比べて彼らの研究のユニークな点は、Hubbert曲線を用いて、世界

全体だけでなく、世界の地域別およびブロック別の生産予測を行なったことと需要予測を試みたことにある。彼らは Hubbert 流の分析法を採用する理由として、結果の再現性を重視するためであると主張している（同時に彼ら自身これを非常にリスクなことであるとも述べているが）。

ある資源の将来にまで延ばした Hubbert 曲線は、その評価時点における資源の量を固定したものと見なすことである。この分析方法には、その後の技術の進歩はもちろん時間的な埋蔵量の追加というものがまったく組み込まれていない。要するに現在の残存資源量はただ枯渇させられるために存在するのである。結果として、Hubbert曲線に頼る立場は完全に悲観論的にならざるをえないのである。ここで注意すべきことは、ある資源の Hubbert 曲線がどれほど現実の生産曲線に合っていようとも、それは自動的に資源の枯渇を表わす曲線であると断言することはできないし、また、資源量の制約を受けて生産量が時間的に変化したことを意味することにもならない、ということである。

Hubbert 曲線では、生産量は最初ゆっくりと上昇しているが、その後、上昇率を増し、ある時点から上昇率を落としてついにはゼロになり、その後は負の上昇率で逆の経過をたどる。上昇率ゼロの時点が生産ピークとなり、資源が枯渇するにつれて時間的に左右対称の釣鐘形の生産曲線が描かれる。肝心な点として、この曲線は単にこのような性質をもってさえいけばよいのである。Hubbert 曲線はこのような形の曲線に対して名づけられたものであり、従わなければならない特定の方程式があるわけではない。ある有限量の資源量が与えられ、その利用に関係した経済的・技術的な変数やパラメータが組み合わされた結果として、このような曲線の存在が発見されたのではない。このような曲線の形は Hubbert によって経験的に直感的に見つけられたのであり、それ自体はある種の真実を含むのであろうが、いわゆる「科学的」根拠にもとづいた推論の結果とはいえない。もし何か明確な真実を含んでいるというなら、何らかの理論的モデルといくつかのパラメータにもとづいて Hubbert 曲線が導出されてもよさそうなものであるが、現在のところそのような研究はなされていないようである。Hubbert 曲線がなぜそうなるのか、またこの曲線に含まれている真実が何かについては明らかでない。おそらく複数のきわめて複雑な要因が織りなされてこのような曲線が形成されるのであろう。全体的な議論をするには便利な道具であるとしてたびたび使用されている。

M.K.Hubbert は彼の分析法に自信をもっていたがその哲学的基礎については説明し

ていない(L.J.Drew 1997)。彼が1956年に行なったアラスカを除く米国48州の予測について、L.F.Ivanhoe (1995) は「石油生産量に関する唯一の真に有効な科学的予測である」と述べているが、これは決して正しい表現ではない。もともと M.K.Hubbert は、米国の石油生産が生産実績から見てこのような生産量曲線を描いて推移するであろうと推測したのであり、それが資源量の制約からそのような曲線になると推測したのではない。ある資源に対して Hubbert 曲線がまさにそのようになって、その生産量変化の原因として枯渇以外の要因(複数)が根底にある可能性が除外されているわけではない。この曲線はその資源を中心にした人間の文化的経済的活動における何らかの結果を表現しているのかもしれないからである。

ゆえに、たとえ現在までの世界の石油生産が「Hubbert 曲線らしい曲線」を追っていても、それは一定の枯渇パターンに従っていることにはならないし、また厳密に資源量の制約を受けている結果であることにはならないであろう。さらに、たとえ資源利用の一般的な歴史的経過が必ず Hubbert 曲線をもつものであるという観点に立ったとしても、それが自動的に資源量の制約を受けて枯渇曲線をたどっていることにはならないであろう。ゆえに、現在世界の石油生産量は資源量の制約を受けずにそのような曲線をたどっているかもしれないし、さらに可能性として、十分な資源量や埋蔵量を残したまま「Hubbert 曲線を示して」石油時代が終わることさえあり得るのである。

## 9 . 石油資源量枯渇の過程 ,OPEC 産油国の 21 世紀は ?

悲観論者Campbellの予測によると ,中東産油国は 2008 年までに世界の需要の 50% を供給し ,2013 年までに彼らのピーク (Hubbert 曲線の枯渇中点) に近づき ,そして ,かなり高い価格によって緩和されているけれども ,在来型石油の永続的な不足が 2010 年ごろから明らかになるであろうという (Sellwood & Coleman 1997) 。また ,Al-Jarri & Startzman (1997) の予測では ,OPEC が ,2000 年までに世界の原油生産の 50% シェアをもつようになり ,2004 年には 3,090 万 B/D のピーク生産に達するであろうという。

米国エネルギー情報局 (EIA) は ,1996 年度予測において ,2015 年の世界生産能力が 9,920 万 B/D であろうと予測した。このような超楽観主義的な予測は非在来型石油の開発を見込んでのことであろう。しかしながら ,在来型石油のみを対象にしてこのような予測はなりたないのであろうか。2015 年時点における世界全体の R/P 比が本質的に減少し ,たとえば ,10 年になっていることを前提にすれば ,在来型石油だけでも理論的にはこれを実現することは可能なのである。1998 年の生産量で R/P 比 10 年に対して必要とされる世界の埋蔵量は 3,620 億バレルであり ,この大きさは ,現在の USGS 既発見埋蔵量を 1 兆 1,000 億バレルとして ,大体その 3 分の 1 にあたる。R/P 比を 10 年にとることは必ずしも非現実的なことではないであろう。成熟しているが依然として世界の産油地域をもつ米国が

現在この値をもっているからである。(最新の EIA 予測 (1999 年) は 2020 年の世界石油生産能力として 1 億 1,220 万 B/D をあげているが ,これに必要な埋蔵量は R/P 比 10 年に対して 4,100 億バレル ,つまり現在の埋蔵量レベルの 37% である)。

J.D.Edwards (1997) は ,石油を含めた全エネルギー供給について 21 世紀全体にわたる予測を行なった。彼によれば ,世界の原油生産は 2020 年に 9,000 万 B/D のピークを経験したのち ,2100 年までに枯渇に近い状態になっているという。彼はまた ,「21 世紀の間 ,エネルギー供給は ,化石燃料の究極資源量 ,再生可能エネルギー源の開発・経済・技術 ,人口 ,政治的・社会的決定 ,環境的制約 ,インフラストラクチャーなどの組み合わせの影響によってコントロールされるであろう。これらすべてが 100 年という時間スケールでは未知なのである」と述べている。彼によるその他の予測は以下のような結論を導いている。天然ガスは 21 世紀が終わるまでにほとんど枯渇している。非在来型原油の生産量は ,2020 年以降に在来型原油の生産の減退とともに増大するであろう。油価上昇で経済的操業が可能になるにつれて ,最大級の非在来型石油資源の最も生産的な部分からの生産が増大する。そして非在来型原油生産は 2100 年までに 2,000 万 B/D に達している可能性があるという。

とにかく 21 世紀の中ごろまでに ,在来型石油の生産量はその資源量の不足から減退に向かっているであろうという点については ,すべての著者が一致している (Odell 1996 ,Campbell 1998 ,他) 。けれども ,もし資

源量の制約が原因となって生産量が年々低下してゆくとして、どのような過程を経てそうなるのかに関して、具体的に予測した研究はまだ不十分である。数字だけを扱うシミュレーションの問題ではなくなるからである。

1970年代初期の石油危機のあとに世界の石油生産量の伸びに鈍化があったが、この危機の直接的な原因は中東の石油生産国に発した政治的なものであり、グローバルに見た資源量の制約が原因ではまったくなかった。同様に、将来においても、生産量あるいはその成長率の鈍化が資源量の有限性を明瞭に意識した形で起こるとは限らない、つまり有限の資源量が直接および物理的原因となって生産が需要に応じられない状況が発生するとは限らないであろう。そのかわり、将来においては、資源量の制約を間接的原因として心理的・政治的・環境的・社会的・文化的な数多くのきわめて複雑な状況が発生し、これらのことが直接的原因となって生産量を着実な減少に導いてゆくという可能性が大きいのではなからうか。このような過程を経ることによって世界は最終的な在来型石油の枯渇へと向かってゆくことになるのであれば、過去に経験したタイプの石油危機が、今後も短期的に繰り返されるという可能性は十分に考えられることである。

OPECが原油生産シェアを増やせば石油価格と生産量のコントロールを強めるであろうという点では、楽観論者、悲観論者にかかわらず、すべての石油アナリストが一致している。しかしながら、石油資源が本質的にOPECのコントロールとなることイ

コールOPECの横暴の再来と考えるのは早計であると思われる。資源の所有者はそれを所有しているだけではコントロールすることにはならない。石油危機のあとに続いた国際石油産業の展開の経験から、消費国あつての産油国であるということをOPECは学んでいるからである。結局は、独占から公平へというのが自然の流れであるからである。その時には、代替エネルギーの開発もいっそう進んでいるだけでなく、液体燃料（石油）のソースも多様化（天然ガス液化・石炭液化・重質油改質など技術の劇的な発展が期待できる）しているであろうから、消費国あつての生産国であるという状況は現在以上に強まっている可能性は大きいと思われる。代替エネルギーをもっとも恐れているOPECが石油を売り惜しむ理由はいまのところ見当たらないのである。

石油価格の上昇は、探鉱を刺戟する傾向があるため埋蔵量をいくらか増やすであろうことが期待されるけれども、石油価格と世界埋蔵量の歴史は、両者の間に特別な関連性がないことを示している。したがって、将来油価がバレル当たり\$30になり、それがたとえ10年続くことになったとしても、目に見えるほどの効果は世界の石油埋蔵量の数字にはほとんど表れないかもしれない。発見可能な埋蔵量が比較的多くあつた過去において石油価格と埋蔵量が無関係であったのなら、将来においては埋蔵量に転換されるべき資源量が現在よりは減っているであろうから当然そうであり、また在来型石油に取って代わる非在来型の代替エネルギーの開発もいっそう進んでいるからなおさらそうであろう。

## おわりに

世界の石油資源量が有限である限り、石油はいつかは枯渇するか、少なくとも使用量が絶対的に減少するであろう。一部の有力な石油専門家は、その枯渇の過程は21世紀の間に起こり、資源量制約をまともに受けた非常に暗いものであるであろうという悲観的な未来像を描いている。本報告では、それとは対照的に、石油が世界の主要エネルギー源から後退する過程は、資源量制約の直接的影響を被ることなしに起こり得るであろう、ということの可能性について考察を試みている。

伝統的に、石油ジオロジストに限らず、

一般にジオロジストは、経験主義に陥りやすい保守的傾向の強い職業集団であるとたびたび言われる。現在の悲観論の急先鋒は豊富な探鉱経験をもつ石油ジオロジストに属している。試掘成功率の低いことが石油ジオロジストを必然的に悲観論の立場にするのかもしれない。しかしながら、逆説的にいって、発見率の低いことはとりもなおさず永続する発見量の存在を示唆するだけでなく、資源量の未知の大きさをも示唆していることにならないであろうか。最後に、「経験的な科学的体系というものは経験によって反駁されることが可能でなければならない」というカール・ポパーの洞察を引用しておきたい。

## 【参考文献】

1. Adelman, M.A. & Lynch, M.C., Oil & Gas Journal, Apr.7, 1997
2. Ahlbrandt, T.S., 15th World Petroleum Conference, [1]P1(abstract), 1997
3. Ahlbrandt, T.S., In an Interview with IEEJ delegate on Jan.12, 1998
4. Al-Jarri, A.S. & Startzman, R.A., Journal of Petroleum Technology, Dec.1997
5. Bakhtiari, A.M.S., OPEC Review, 23(1), Mar. 1999
6. BP-Amoco, "BP-Amoco Statistical Review of World Energy, June 1999"
7. Campbell, C.J., Petroleum Review, Jul. 1999
8. Campbell, C.J., "The Coming Oil Crisis", Multi-Science Publishing Co./Petroconsultants S.A., 1998
9. Campbell, C.J., Oil & Gas Journal, Apr.7, 1997; (ibid) Dec.29, 1997
10. Colitti, M. & Simoni, C., "Perspectives of Oil and Gas: The Road to Independence", Kluwer Academic Publishing Co., 1995
11. Cope, G., Petroleum Review, Mar.1998; (ibid) Apr.1998; (ibid) Jun. 1998
12. Drew, L.J., "Undiscovered Petroleum and Mineral Resources - Assessment and Controversy", Plenum Press, 1997
13. Edwards, J.D., AAPG Bulletin, 81(8), Aug. 1997
14. US DOE/EIA, "International Energy Outlook 1996"; "(ibid) 1999"
15. Hatfield, C.B., Nature, 387, 8 Mar. 1997

16. Hiller, K., *Erdoel Erdgas Kohle*, 113(9), Sep. 1997
17. IIASA, "Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond", IIASA/WEC Report 1995
18. 石井 彰, *石油 / 天然ガスレビュー*, 12/1998
19. Ivanhoe, L.F., *World Oil*, Oct.1995; (ibid) Nov. 1996
20. Kerr, R.A., *Science*, 281, 21 Aug. 1998
21. Knott, D., *Oil & Gas Journal*, Jan.29, 1996
22. Laherrere, J., *World Oil*, Dec.1997; (ibid) Feb. 1998
23. Laherrere, J., *Oil & Gas Journal*, Feb.1, 1999
24. Laherrere, J., *Petroleum Review*, Feb. 1999
25. Laherrere, J., *Petrole Informations*, No.1732, Fev.-Mar. 1998
26. Lynch,M.C., *石油の開発と備蓄*, 31(4), 8/1998
27. Martinez,A.R. et al., *Proceedings of 15th World Petroleum Conference*, 1998
28. Martinez, A.R. & McMichael, C.L., *Journal of Petroleum Geology*, 22(2), Apr. 1999
29. Masters, C.D. et al., *Science*, 253, Jul.12,1991
30. Masters, C.D. et al., *Proceedings of 14th World Petroleum Conference*, vol. 5, John Wiley & Sons, 1994
31. Masters, C.D. et al., *Oil & Gas Journal*, Oct.13, 1997
32. McCabe, P., *AAPG Bulletin*, 82(11), Nov. 1998
33. Meyer, R. & de Witt, Jr.,W., *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1994
34. Miller, K., "Overview of Global Oil Reserves Debate" (IEA unpublished doc.), 1998
35. 西山 孝, *エネルギー・資源*, 19(1), 1998
36. Odell, P.R., *Petroleum Economist*, Nov. 1997
37. Odell, P.R., *Erdoel Erdgas Kohle*, 112(4), Apr. 1996
38. Odell, P.R., *Petroleum Review*, Mar.1999
39. Perrodon, A. et al., "The World's Nonconventional Oil and Gas", *Petroleum Economist*, 1998
40. Popper, K.R., "The Logic of Scientific Discovery", 1959
41. Rogner, H., IIASA WP-96-56, May. 1996
42. Salameh, M.G., *OPEC Review*, 23(2), Jun. 1999
43. Schmoker, J.W. & Dyman,T.S. *Oil & Gas Journal*, Feb.23, 1998
44. Sellwood, B. & Coleman,M, *Petroleum Review*, Dec. 1997
45. Smil,V., *OPEC Review*, 22(4), Dec.1998
46. SPE, "Petroleum Reserves Definitions", SPE/WPC, Mar. 1997
47. Taylor, P.J., *Journal of Petroleum Technology*, May. 1997
48. TOTAL, "The Ultimate Stock of Recoverable Oil" (unpublished doc.), 1998
49. 内山洋司, (財)電中研研究報告 Y95009, 2/1996
50. USGS Open-File Report 97-463, 1997
51. USGS Fact Sheet-145-97, 1997
52. WEC, "1998 Survey of Energy Resources"

( 付記: 網羅的リストを意図していないためと紙面の関係から , 国内外のその他の多数の埋蔵量関連文献を割愛した。)

お問い合わせ

[info@tky.ieej.or.jp](mailto:info@tky.ieej.or.jp)