
地学クラブ講演要旨

石油探鉱のパラダイム変換と「ピークオイル」

井 上 正 澄*

Paradigm Shift in Petroleum Exploration and “Peak Oil”

Masazumi INOUE*

Abstract

Anticlinal theory, in combination with reflection seismic surveys, has been a powerful paradigm in petroleum exploration, and its application has dramatically increased oil discoveries and production since the end of World War II. However, the peak oil theory claims that oil production will peak soon (or has already peaked), and will then decline. The ultimate recoverable resources, production capacity, and future price of petroleum are examined, and the possibility of a new exploration paradigm is discussed.

Key words : paradigm shift, petroleum exploration, peak oil, anticlinal theory, reflection seismic survey, Hubbert curve, fractal

キーワード : パラダイム変換, 石油探鉱, ピークオイル, 背斜説, 反射法地震探査, ハバート曲線, フラクタル

I. はじめに

石油は古くより接着剤, 防腐剤, 燃料などに利用されてきたが, その生産・使用量は 19 世紀まではごくわずかであった。それが 2000 年には, 1900 年の約 200 倍へと, 生産量が爆発的に増加した。この「石油ビッグバン」は精製技術, 内燃機関, 化学工業の進歩に帰すこともできようが, 探鉱技術, 具体的には地下の石油のあり方に関する理論(「パラダイム」)とそれを応用するに適した「ツール」の進歩により大量の油が発見されるようになったことが, 最大の原因である。

一方で, 人類はすでに石油のほぼ半分を使い果たし, 近々(あるいはすでに)生産量はピークを

過ぎ減退に向かい, 深刻なエネルギー危機に直面すると警告する「ピークオイル」論が, 近年世界中で沸騰している。

ここでは, 「石油ビッグバン」を起こした「探鉱パラダイム」について概観し, これに代わる「新探鉱パラダイム」の可能性について考察するとともに, 「ピークオイル」論について検討し, 石油の資源量・生産量・原油価格について将来予測を行う。各議論の詳細については文献に列記した弊論文・解説を参照していただきたい。

II. 石油探鉱のパラダイム変換

1) 油田のでき方

堆積盆地では, 砂岩などの粗粒岩と泥岩などの

* エムシー・エクスプロレーション株式会社

* MC Exploration Co., Ltd.

細粒岩が成層しているが、砂岩では砂粒の隙間が連続してネットワークを形成していて、通常は水で満たされている。油が生成すると、それは小さな割れ目などを通して砂岩の隙間ネットワークに入り込み、浮力（比重の差）により、水と入れ替わって砂岩層中を上方へと移動する。そして、これ以上、上方移動できないところ（「トラップ」）があると、そこに油が集積する。背斜、ドーム、尖滅、礁、断層ブロックなどがトラップであり、そこに油田が形成される。これらのうち背斜やドームは地表調査や地形から判断しやすく、そこを掘れば油田が見つかるというのが「背斜説」である。

途中にトラップがなく、隙間のネットワークが地表や海底まで連続し、露出していると、地質時代を通して生成・移動してきた油が漏れ出し、散逸していく。これが「油兆」で、油兆を利用している限りは油も循環型の再生可能資源で、枯渇の心配はなかった。

2) 背斜説と地震探査（探鉱パラダイムの成立）

こうした油田のでき方は当初よりわかっていたわけではない。「近代石油産業の始まり」とされる1859年の米国ペンシルバニアのドレークによる試掘井は、地表の油兆をたよりに掘削したものである。地質学の石油探鉱への関与は、1885年にホワイ特がサイエンス誌に「背斜説」を発表して始まり、各地での試掘の成功を経て背斜説は徐々に定着していく。しかし、地表から推定できる背斜はすぐにほとんどが試掘されて、このままでは大量の石油は発見されず、現代文明の開花もなかったかもしれない。

ここで登場したのが反射法地震探査で、1920年頃から理論・技術・応用が急速に発展し、1940年頃には一応の完成を見る。本手法を用いれば、地下の地質構造が断面図の形で読み取れ、背斜が容易に判定できる。おりしも、石油の重要性を再認識させた第二次世界大戦が終了し、全球的規模での石油探鉱の展開が開始された。背斜説は、反射法地震探査という強力なツールを得て、世界各地で目覚ましい成果を挙げてパラダイム化していく。

「パラダイム」とは、研究者全部が根本的な考え方では一致して、それに従って多くの問題を解くようになるとき、その法則・理論・モデル・装置などを一括していう。いったんパラダイムが成立すると、もう根本問題で論争する必要はなく、研究が能率よく進むようになる。地震探査を実施し、抽出された背斜構造を順次掘削していけば、半自動的にそれなりの成果がついてきた。こうして、石油発見は1945年頃より、生産も1950年頃より急増して、現在では1950年頃の10倍近くの約300億バレル/年に達している。

3) 探鉱パラダイム=超ひも理論？

背斜説パラダイムは強力であったがゆえに、過去の試掘はほとんどが背斜を狙ったものであり、世界の主要背斜はほぼ試掘された。一方、トラップがあれば背斜やドームでなくとも油は集積可能であるが、これらはほとんど試掘されておらず、その存在を的確に判定する新パラダイムが成立すれば、発見量は今後も増加するはずである。

向斜部で油ガス田を発見した例を、私がかかわった2プロジェクトより紹介する。西アフリカ・ガボン沖鉱区では、1970年代に発見したドーム状の背斜に位置する2油田が、約20年間生産し、ほぼ枯渇してきていた。ここで三次元地震探査を実施し、より細密にデータを取得し、従来の解析が地質構造のみを対象としていたのに対し、岩質の相違やその分布の判定を試みた。この結果、従来毛布のように薄く広く分布すると考えていた砂岩層は、実はひも状のタービダイト（深海堆積物）チャンネルであり、既存2油田は、それぞれドーム頂部付近を通過するチャンネル砂岩から生産していることが判明した。その中間の向斜部にも、より発達したチャンネルの分布が推定され、掘削の結果、既存2油田より大規模な油田を発見した。

豪州北西大陸棚LNGプロジェクトでは、並行する背斜（ガス層準では両側を断層に画された地塁）で1970年代に発見した2巨大ガス田から生産していた。ここでも1990年代に入り三次元地震探査を実施し、地質構造だけでなく、ガスを胚胎する砂岩層を直接判読することを試みた結果、

両ガス田間の向斜部に巨大ガス田を発見した。当時、近隣他社のゴルゴン・ガス田が、LNGプラントの余剰能力を使用することを検討していた。新ガス田は怪物ゴルゴンを退治した英雄にちなんでペルセウス・ガス田と命名された。

最近、西アフリカのアンゴラなどの深海で大油田が続々と発見されているが、これらはみな、ひも状のタービダイトチャネルにトラップされている。三次元地震探査が普及し、P波だけでなくS波やポアソン比の情報も利用できるようになり、これらを解析するコンピュータやソフトの能力も大幅に向上した。深海の探鉱が世界各地で進むにつれ、ひも状のタービダイトチャネルが普遍的に存在することが明らかになり、堆積機構や分布形態に関する研究も進展している。従来は油を貯める砂岩層も、粘土や火山灰などの細粒降下堆積物同様、毛布のように面的に広がっていると考えていたが、むしろひも状の形態の方が卓越しているようだ。深海は、構造変形が軽微で背斜がまれなこともあって、過去にはほとんど探鉱されていない。地質学版「超ひも理論」は新探鉱パラダイムの有力候補である。

III. 「ピークオイル」の真実

1) ピークオイル vs. チープオイル

「石油生産のピークがいつくるのか？」に関して悲観論（「ピークオイル」）と楽観論（「チープオイル」）の論戦が世界中で大沸騰している。この議論が混乱している原因の一つが「累計生産量」、「埋蔵量（リザーブス）」、「資源量（リソース）」の定義にあるので、ここで整理しておく。「累計生産量」は読んで字のごとく過去の生産量の累計である。「埋蔵量」は既に発見された石油のうち、現在の技術と経済環境で回収可能な量、「資源量」は地下に存在する全資源のうち、今後の技術の進歩や経済環境の変化も考慮して最終的に回収可能と考えられる量である。地下に存在する石油の全量を「原始埋蔵量」といい（日本語では同じ「埋蔵量」の語が入っていてまぎらわしいが英語では「インプレース」と異なる表現をする）、「埋蔵量」、「資源量」はこのうち技術や経済

性も考慮して回収可能な量を指す。「資源量」は技術や経済環境の見通しが的確であれば増減しないが、その一部である「埋蔵量」は発見されることによって増加していく。

現在累計生産量は約1兆バレル、埋蔵量は統計により小異があるが約2兆バレルというのがだいたいのコンセンサスである。ところが資源量になると諸説あり、これが大論争の根本原因である。「ピーク派」の悲観論は約2兆バレル（すなわちほぼすべて発見済み）としており、石油生産は、今をピークに急落し、数十年後には枯渇するとしている。一方、「チープ派」の楽観論は、世界の資源量を約3兆バレルとしていて、今後の需要増に応じて石油生産は順調に増加し、原油価格も低位安定すると予想している。しかし、この資源量でも、今のペースで増産していけば30～40年後には枯渇して、石油生産は事実上停止せざるを得ない。楽観論者の多くは、（在来型）石油が枯渇しても、資源量の豊富な天然ガスや非在来型のタールサンド、メタンハイドレートなどが続くため、これらを含めれば当面安泰だと考えている。

2) ハバート曲線

楽観論の資源量3兆バレルは米国地質調査所の数値であるが、悲観論の2兆バレルの根拠は何だろうか。ちょうど50年前の1956年、シェール石油に在籍していた構造地質学者ハバートは、米国の石油生産のピークが1970年来ると予告し、その予告は実現した。この「元祖ピーク論」の原理はマルサスの人口論にさかのぼる。マルサスは、人口は指数関数的に増加するが、食料生産は直線的にしか増加せず、したがって不足すると論じた。この考えを数式化したのがベルハルストで簡略化すると次のロジスティック関数となる。

$$(\text{人口増加}) = A \times (\text{人口}) - B \times (\text{人口})^2$$

ねずみも細菌も制約がなければ、その時点の個体数に比例して増加し、指数関数（ねずみ算）で繁殖する。これが右辺第一項である。しかし、個体数が増加すると栄養（食料）、競争、老廃物などにより増殖にはブレーキがかかる。これが右辺第二項で、（人口）の2乗に比例しているの

A に比して B を充分小さくしておくと、その影響は当初は軽微だが、徐々にその効果が高まり、ついには第一項に匹敵する大きさになる。

ハバートは上式の（人口増加）を（生産量）、（人口）を（累計生産量）と読み替えて、石油生産に当てはめた。微分方程式を解いて本式を時間の関数に変換するとベル型の「ハバート曲線」になる。ハバート曲線の元々の原理は極めてシンプルで、上式の右辺が 0、すなわち第一項と第二項が等しくなると「石油の生産」が停止するというものである。このとき（累計生産量）が A/B になり、これ以上（累計生産量）は増加できない。一方、（生産量）が最大になるのは（累計生産量）が $A/2B$ の時で、これが「ピーク」である。ハバートはこの方法で米国石油生産のピークを予告した。世界の石油生産は、石油危機後の需要の落ち込みを除くとハバート曲線の前半でほぼ近似でき、この式を当てはめると、 A/B （最終累計生産量）が約 2 兆バレルの曲線が最も良くフィットし、その半分の 1 兆バレル生産時（すなわち今！）が「ピーク」になるというのが悲観論の根拠である。

この議論は人口論（あるいは細菌数）ではそれなりの成因論的根拠があるが（にもかかわらず現実の人口推移にあまり当てはまらない）、なぜ石油生産がこの曲線をたどるかの説明がない。しかし、米国の石油生産のみならず、過去の米国の鯨油、ペンシルバニアの無煙炭、英国の石炭などの多く資源が、ほぼこの曲線に沿う増産・ピーク・減退を示した。資源の増産は経済の拡大をもたらし、ますます需要を喚起する。しかし過度の増産は種々の矛盾を引き起こし、徐々に他者にとって代わられる。ハバート曲線は「驕れる者久しからず」という盛者必衰の理を表現した自然哲学と見るべきだろう。上記した諸資源も実は枯渇したわけではなく、他資源や輸入との競争に敗れて衰退したものである。むしろ後継者がいまだに現れてこないことが石油の悲劇である。

3) ダブルタンクモデル

石油の資源量は、採鉱により発見されて初めて埋蔵量として登録される。油田の開発には長い

リードタイムがかかり、生産量も諸施設の能力に規制されるため、発見された埋蔵量も自由に生産できるわけではない。この過程はダブルタンクモデルで考えると理解しやすい。上に資源量、下に埋蔵量のタンクがあり、最初は両方とも空であった。石油が生成し上のタンクに液滴として落ちてくるが、その一部はタンクの底から漏れ出す液滴として散逸し、残りはタンク内に蓄えられる。この過程は数千万～数億年継続し、上のタンクには資源量が蓄えられた。

背斜説パラダイムが確立した 1945 年以降、上のタンクの蛇口が大きく開かれ、毎年平均 300 億バレルの埋蔵量が下のタンクへと落ちていった。最近は新規発見量よりも、「回収率」（原始埋蔵量（インプレース）中の地上に回収される率）が、従来の 20～30% から 50% 近く向上したことによる「埋蔵量成長」の影響が大きい。これまでの累計で、2 兆バレル弱が埋蔵量のタンクへ入り、そのうち約 1 兆バレルが既に生産された。

埋蔵量タンクからの流出量（石油生産）は液位（すなわち液圧）に依存し、蛇口をより開けば一時的に流出量を増やせるが、タンク内の液位が低下してきて、結局流出量は流入量と等しくなる液位で平衡に達する。埋蔵量タンクからの流出量は徐々に増加してきて、現在、流入量とほぼ等しい 300 億バレル/年となっており、タンクの液量は約 1 兆バレルで平衡に達している。今後の需要増に応じて生産量が 300 億バレル/年を大きく超えるためには、採鉱を大々的に展開して上のタンクからの流入量を大幅に増やす必要がある。

このモデルを定量化すべく、1945 年以降の埋蔵量増加を 300 億バレル/年で一定とし、各油田の生産プロファイルの重ね合わせを考慮して、世界の石油生産能力をシミュレートしてみた。埋蔵量増加が一定であっても、各油田の開発時の立ち上がりプロファイルの重ね合わせによりハバート曲線のベル型の前半は再現される。一方その後半、すなわち将来予測は、2004 年で発見も埋蔵量成長も終了するという非現実的な仮定のケースが、生産減退プロファイルの重ねあわせにより、悲観論者のハバート曲線に酷似していて、総生産

量も約 2 兆バレルとほぼ一致する。しかし、実際には 2005 年以降も油田発見は続いており、それは新探鉱パラダイムの成立により今後も継続すると期待される。すなわち、ハバート曲線から推定される資源量は過少評価であり、資源量は別の方法で推定する必要がある。

IV. 石油の資源量・生産量・原油価格予測

1) 油田規模はフラクタル

悲観論の 2 兆バレルという資源量は過少評価であることが判明した。楽観論の米国地質調査所の 3 兆バレルという数値も、既発見油田と地質情報から求めたもので、「探鉱パラダイム変換」の効果も充分反映していない可能性が高い。そこでここでは、従来と全く異なる方法で資源量の推定を試みた。種々の証拠から、油田サイズはフラクタルであると私は考えた。しかし、現実の既発見油田の頻度分布は、むしろ対数正規分布で近似されることが多く、必ずしもフラクタルではない。これは、探鉱では大規模な油田から狙うが、地下情報には不確実性のゆらぎが伴い、「背斜説パラダイム」による偏りも加わり、それがフラクタルの油田サイズと組み合わされて生じていると考えることができる。探鉱過程やゆらぎを理論的に分析・模倣してシミュレートすると、現実の既発見油田のサイズ分布がほぼ再現され、この仮定の妥当性が示された。この方法は世界のどの地域にも適用でき、発見油田規模分布の歴史的変遷が合理的に説明され、将来予測も行える。この理論で推定すると、中間値で約 4 兆バレルという楽観論よりもさらに大きな世界の資源量値が得られた。この数値は、「探鉱パラダイム変換」の効果も加味したものといえる。この大きな資源量は、楽観論の主張のように、石油は今後の需要増に応じて増産可能であること（チープオイル）を意味しているのだろうか。

2) ピークからプラトーへ

ダブルタンクモデルのシミュレーションでは、生産能力は 1995 年頃から 300 億バレル/年のプラトーに達している。ただし、石油危機後の需要の落ち込みがあったため、実際に生産量がこのレ

ベルに達したのは 2004 年である。300 億バレルでプラトーとなるのは、上のタンクからの流入量（新規発見＋埋蔵量成長）を毎年一定と仮定しているためで、これを上回るためには、探鉱による新規発見量を増加しなければならない。

前記の探鉱過程シミュレーションでは、今後、過去の全探鉱量を繰り返しても埋蔵量は約 2000 億バレルしか増加しない。埋蔵量を 1 兆バレル増加させるには過去の約 20 倍の探鉱量が、さらに 1 兆バレル増加させて資源量を全部発見するためには実に約 500 倍の探鉱量が要求される。油田サイズ分布はフラクタルで、個数は無限に近いが、残されているものはどんどん小規模になり、同じ埋蔵量を確保するために要求される探鉱量は指数関数的に増加するからである。もちろんここで「探鉱量」と記したものは効率も含めた相対的な概念であり、技術の進歩や探鉱パラダイム変換により、要求される実作業量はこれより大幅に少なくてすむが、それにしても現在の埋蔵量増加ペースを維持していくことがいかに困難かは理解できよう。こうした理由から、いかに資源量が多くとも需要に応じて自由に増産することは不可能で、相当頑張っても現在のプラトー生産量維持がやっとであると私は考えている。

3) 原油価格と石油の寿命

この生産能力グラフと生産実績を重ねると面白い事が判明した。両曲線には基本的に開き（余剰生産能力）があるが、1973 年と 1979 年の 2 ヶ所でほぼ接していて、これは 2 回の石油危機に相当する。一般には、前者は第四次中東戦争、後者はイラン革命が原油価格高騰の原因で、需給には問題がなかったとされている。しかし、この単純な前提に基づくシミュレーションは、最近を含め過去 3 回の原油価格高騰が、実は経済学の大原則どおり、需給の逼迫が原因であったことを示している。

アナリスト達は、地政学、在庫レベル、先物ボジションなどにより価格を予測しているが、ほとんどの中してない。これ等の要因は価格変動の引き金となったり、増幅することはあっても、中長期的な価格は基本的には探鉱・開発・生産シス

テムに基づく生産能力と需要のバランスに依存している。アナリストが「需給のファンダメンタルズ」という時、彼らは原油の実需と実際の供給量（すなわち生産実績）を比較している。しかし、この差は「在庫」に相当し、これも短期需要予想や思惑により発生するもので「需要」に含めるべきである。石油の将来予測を「ファンダメンタル」（根本的）に行うのであれば、生産実績（需要）と生産能力（供給）を比較しなければいけない。生産能力の積み上げが困難なことから、新エネルギーへの転換などにより石油需要が大幅に抑制されない限り、今後も高原油価格が続くと私は考えている。

生産能力シミュレーションで、資源量の4兆バレルがすべて発見されるまで、今後も毎年300億バレルの埋蔵量追加が続くと仮定すると（このためには既述のように探鉱への注力が必須であるが）、プラトー生産は今世紀末近くまで継続可能である。

需要が毎年定率で増加すると、必要な生産量は指数関数で増加する。天然ガス資源量は米国地質調査所によると現在の生産量の約130年分存在し、たとえ石油が枯渇しても安泰であるという楽観論の根拠のひとつとなっている。メタンハイドレートなども考慮して、その倍の260年分の資源量が存在すると仮定しても、石油の増産が困難で、その分もガスがまかなうとして年率5%で増産していくと55年弱で完全に枯渇してしまう。日本近海に現在の日本の消費量の約100年分のハイドレートが存在するという試算があるが、これも年率5%で増産すると40年も持続せず、石油より前に枯渇する。ハイドレートの研究は重要だが、この商業開発が実現してもエネルギー問題がすべて解決するわけではなく、あくまでも次世代への「つなぎ」と考えるべきである。また、ターラサンドなどの非在来型資源の場合、回収・改質に必要な投入エネルギーや追加排出CO₂の処理・廃棄コストを差し引いて考える必要がある。指数関数的増産の前には、どんな資源も、再生可能でない限りは、早晚枯渇してしまう。

V. おわりに一人類生き残りへの処方箋

恐竜は、隕石の地球衝突により絶滅したという説が有力だが、当時進化の絶頂だったがゆえに些細なきっかけでも絶滅する運命にあったとも言われる。現在、人類文明は栄華を極めているが、エネルギー資源の枯渇、CO₂などによる環境汚染、世界人口が爆発する一方で諸国に先駆けて減少に転じた日本の人口等々、人類の行く末に恐竜の姿を重ね合わせて危機感を抱いているのは私だけではあるまい。上記の考察に基づき、人類生き残りへの処方箋を私なりに列記してみた。これら3項目を促進することから、高原油価格はむしろ望ましいと私は考える。

①成長神話からの脱却

定率成長（複利）は指数関数的爆発を意味し、今、エネルギー資源の消費も環境への負荷も臨界点に達しようとしている。無限の資源量・人口増加・排出物（エントロピー）廃棄を前提にして永遠に続く将来の成長（GDP・金利・信用）を担保にしている経済理論と社会哲学からのパラダイム変換が必須である。成長ではなく、需要抑制や省エネによる持続可能な安定が求められている。

②再生可能な循環型へ

人類は、数千万～数億年かけて生成した石油の大半を、わずか1世紀弱の間に消費し尽くそうとしている。再生可能でない資源は、どんなに豊富でも早晚枯渇する運命にある。一方、地球に降り注ぐ太陽エネルギーは、現在の化石燃料使用量の約1.5万倍といわれ、成長神話から脱却できれば充分な量である。化石燃料が残されているうちに、新エネルギー技術を確立して、循環型社会を構築しなければならない。

③石油探鉱・技術開発への傾注

太陽光や風力発電の技術進歩は著しいが、完全に化石燃料に取って代わるには道はまだ遠く、多くの技術や経済性のブレークスルーが要求される。一方で、石油をはじめとする化石燃料は、現在の生産レベルであれば、今世紀中は持続可能な資源量が残されている。しかし、それらを活用して時間を稼ぎ、新エネルギーと循環型社会に円滑

にバトンタッチするためには、過去と同程度の埋蔵量追加を継続しなければならない。「石油の時代は終わるのだから、探鉱は必要ない」のではなく、次の時代に円滑につなぐためには、資金と頭脳を結集して、必死で石油探鉱と技術開発に取り組まなければならない。地質学・地球物理学などの地球科学を専攻する学生諸君には、石油の探鉱・開発に是非チャレンジしていただきたい。

文 献 (総説的なもの)

- 井上正澄 (2002a): 背斜説から向斜説へ?—21 世紀の探鉱パラダイム—. 石油技術協会誌, **67**, 143–15.
井上正澄 (2002b): 石油探鉱におけるパラダイム変換. ペトロテック, **25**, 503–507.
井上正澄 (2004a): 石油資源の将来—生産量推移・油田規模分布・究極資源量に関する考察. 石油技術協会誌, **69**, 679–691.
井上正澄 (2004b): 石油の資源量と寿命—ピークオイル論もチープオイル論も正しくない. 石油・天然ガスレビュー, **39**, 1–11.
井上正澄 (2006): 未来の石油発見を予測する—探鉱シミュレーターの試み. 石油技術協会誌, **71**, 280–292.