

石油の探鉱・開発のための掘削技術

Drilling Technology for Petroleum Exploration and Development

鳥谷部 隆 英 (とりやべ たかひで)

石油資源開発㈱作井部 作井技術担当

加 藤 進 (かとうすすむ)

石油資源開発㈱探鉱部 探鉱技術担当主査

1. はじめに

石油開発事業は大きく探鉱、開発および生産段階に分けられる。探鉱とは、石油という地下の「流体鉱床」の存在を技術的に予測し、実際に坑井を掘削してそれを確認し、石油が発見された場合には商業的に開発する価値があるものかどうかを見極めるまでの段階である。油田の採算性が判明すると、生産のために坑井を掘削し、生産施設を建設するが、この段階が開発であり、実際に石油の生産を始めると生産段階に入る。このように、石油の探鉱・開発では坑井の掘削が不可欠であり、坑井はその目的に応じて、試掘井、探掘井、評価井、開発井（探掘井）と呼ばれている。これらの坑井は通常垂直に掘削されるが、経済的な理由や効率的な採取などにより、傾斜掘りや水平掘りが行われることもある。

試掘井において、石油・ガスの産出に成功する確率（試掘成功率）は1～2割程度であるが、油・ガ

ス田として開発される確率（油田発見率）は2～3%であり、石油開発事業のリスクは非常に大きい。そのため、国内の石油・天然ガス資源の探鉱を促進することを究極の目的として、昭和36年度から国の基礎調査が行われており、平成4年度までに構造試錐15坑、層序試錐7坑、基礎試錐45坑が掘削されている。本稿では、石油の探鉱と試掘井での坑内調査の概要を述べ、陸上石油井の掘削に関する一般的な技術、水平掘り、海洋掘削について簡単に紹介する。

2. 石油の探鉱と坑内調査

2.1 石油の探鉱

石油鉱床（油・ガス田）が形成されるためには、少なくとも次の条件が必要とされている（図-1）。

- ① 十分な量の石油が生成されていること（石油根源岩の存在）
- ② 石油を蓄える入れ物（貯留岩）の存在
- ③ 石油を集積し、逃がさない地質条件（トラップ）

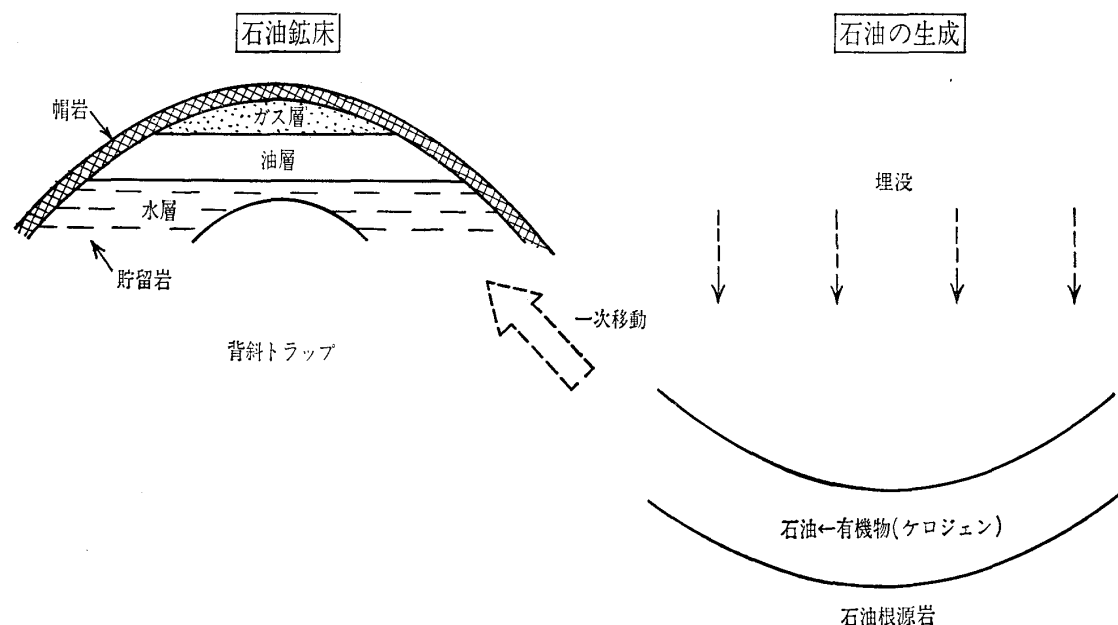


図-1 石油鉱床の形成

ブ)の存在

石油は温度・圧力・時間の条件下で有機物から生成されると考えられていることから、有機物の量、質、熟成度によって石油根源岩（母岩）の評価が行われる。泥質岩、珪質岩、炭酸塩岩が一般的な根源岩である。貯留岩となりうるのは多孔質で浸透性（油層のような多孔質岩石中を流体が流れるときの流れやすさを示す尺度）の良い岩石であり、主に砂岩や炭酸塩岩であるが、日本では火山岩類、花崗岩類も貯留岩となっている。トラップは貯留岩と石油の上方への移動を阻止する不浸透性の岩石（帽岩）との組み合わせであり、構造運動によってできる構造トラップ、岩相変化や不整合によって形成される層位トラップなどのいろいろな種類が知られているが、背斜トラップが最も一般的である。石油根源岩で生成された石油が貯留岩まで移動する過程は一次移動と呼ばれているが、その機構はまだよくわかっていない。

実際の探鉱作業においては、重力探鉱や地震探鉱

表—1 坑内調査の種類

実施時期	調査項目
掘削時	泥水検層(坑井地質調査), 微化石調査(概査), MWD
掘削後 坑井作業終了後	物理検層, 産出テスト 微化石調査(精査), 地化学分析, 岩石鉱物分析, コア試験

表—2 物理検層の測定目的と主な検層種目

目的	主な検層種目 (Schlumberger 社商品名)
油・ガス層評価 浸透層の検出	自然電位検層 (SP), キャリパー検層, マイクロおよびマイクロラテロ検層 (ML, MFS L)
孔隙率の算出	音波検層 (BHC), 密度検層 (LDL), 中性子検層 (CNL)
比抵抗	インダクション検層 (ISF), ラテロ検層 (DLL)
フラクチャー検出	ラテロおよびマイクロラテロ検層 (DLL-M SFL), 密度検層 (LDL)
地層流体の推定	地層流体サンプラー (RFT)
地質解釈	
地層対比・岩相の同定	インダクション検層 (ISF), 自然電位検層 (SP), 天然ガンマ線検層 (GR, NGS)
地層傾斜・堆積環境の推定	ディップメーター (SHDT, FMS)
火山岩類の岩質の推定	密度・中性子・天然ガンマ線検層 (LDL-CNL-GR)

の概査によって堆積盆地のおおまかな形態を把握し、周辺地域に露出する地層の地表地質調査や古生物調査、岩石の各種分析などに基づいて①や②の条件が満足されているかを検討し、地震探鉱の精査を実施して③を確認あるいは予想して試掘井の位置選定と掘削深度の決定が行われる。

2.2 坑内調査

試掘井の目的は油・ガス層を発見することであるが、そこから得られる坑井データは直接的な地下情報であり、産出テストを行うかどうかの判断の基礎になるばかりでなく、探鉱の次のステップへ進む上でも重要である。試掘井で実施される坑内調査はその実施時期によって、表—1のように分けられる。

ここでは坑井仕上げを決定する上で重要な役割を果たす、泥水検層と物理検層について簡単に述べる。

泥水検層では循環泥水を利用して油・ガス層から泥水に混入したガスを連続的に分析し、同時に泥水によって地表に回収された掘屑（カッティングス）を採取して、岩質や蛍光反応による油兆調査、ガス分析を行う。ガスクロマトグラフによってメタンからプロパンまでが測定でき、これらの成分濃度から油層かガス層かの判定もある程度可能である。このほか、掘進率、ビット荷重、ポンプ圧力等の掘削に必要な約10種類のパラメーターも測定・記録され、小型コンピュータによって自動的に記録・処理される。

物理検層はワイヤーラインの先端に各種のセンサーを接続して、地層の物理的・化学的性質を連続的に測定する。その記録は深度に対して表示されることからログ (log) と呼ばれる。物理検層には多数の検層種目があり、その測定目的は油・ガス層の評価と地質解釈の二つに大きく分けられる（表—2）。浸透性があり、ある程度の孔隙率を有する地層で、比抵抗が高く（油・ガスは電気を通さない）、油・ガス兆が認められる区間が仕上げ対象として取り上げられる。

3. 陸上の石油井掘削

3.1 石油井掘削と仕上げの概要

石油井の掘削は主にロータリー掘削法で行われる。ロータリー掘削法はビットを掘管に接続して坑底まで降下し、地上からビットに荷重と回転を与えるこ

とによって掘進する方法である。

ロータリー掘削において重要な点は泥水を使用することである。泥水は地表の泥水ポンプにより掘管を通してビットより噴射され、掘屑と共に掘管の外側を上昇して地表に戻る。微細な掘屑は泥水の性状に悪影響を与えるので地表に設置した各種のソリッドコントロールシステムを利用して取り除いている。坑井掘削における泥水は血液にたとえられ、泥水性状を適切に維持しなければ重大なトラブルを引き起こすことになる。

所定の深度まで掘削すると、坑壁の崩壊を防いだり、異常低圧・異常高圧の層を隠したりするために、ケーシングと呼ぶ大口径のパイプを降下し、その周りに種々の添加剤を混入したセメントを送入して固定する。

目的深度まで掘削すると物理検層を行い、油・ガス層が存在しないならば坑井をセメントで埋立て廃坑する。もし、油・ガス層の存在する確率が高いならば、生産のためのケーシング（プロダクションケーシング）を降下する。

一般的な坑井仕上げ方法は、ケーシングをパーフォレーションする仕上げとアンカーパイプを降下する仕上げと裸坑のままの仕上げである。パーフォレーション仕上げは、成形した火薬をワイヤーラインで降下・爆発させ、そのジェットによってケーシングを穿孔し、油・ガス層と坑井とを導通させることである。アンカー仕上げは、油・ガス層の部分のプロダクションケーシングを孔明管にして、それ以浅をセメンチングする。裸坑仕上げは、油・ガス層を裸坑のままにして、その直上にプロダクションケーシングをセットする。

次に、仕上げ層の隔離のため硬質ゴム製のパッカーと採油・採ガスのための小口径のパイプであるチュービングを降下・セットする。降下終了後、地表には油・ガスの産出量をコントロールのためにクリスマスツリー（坑口装置）をセットする。チュービング内の水頭を減少させることによって、油・ガスは自噴し、クリスマスツリーを通して生産施設に送られる。パッカーとチュービングを複数使用することによって多数の層を仕上げることもできる。

3.2 坑井トラブル

油・ガス井の掘削中には、

- ① 膨潤・崩壊性の泥岩に遭遇することなどによる地層の崩壊
- ② ドリルストリングの切断・遺留
- ③ 地層圧力に対して泥柱圧が高すぎることでドリルストリングが坑壁（泥壁）に押しつけられて動けなくなる差圧抑留
- ④ 地層の孔隙や割れ目への逸泥
- ⑤ 掘削装置の故障

などのトラブルがしばしば発生する。

しかし、一番恐ろしいのは暴噴（ブローアウト）である。通常、泥柱圧を地層圧力よりわずかに高めに設定して掘進するので、地層流体が坑内に侵入することはない。しかし、何らかの理由でバランスが崩れて、泥柱圧よりも地層圧力が高くなると地層流体が坑内に侵入する。地層流体が侵入しても坑井のコントロールができる状態がキックであり、できない状態を暴噴と呼ぶ。

BOP（噴出防止装置）が坑口には取り付けられているので、キックが確認されたら BOP を閉めて坑井を密閉した後、それ以上の地層流体の侵入が無いように地層圧力を抑えながら、抑圧に必要な比重を持った泥水を循環すれば、井戸を平常に戻すことができる。

4. 傾斜掘り・水平掘り

4.1 傾斜掘り

試掘の場合でも地下のターゲット（目的位置）の真上にリグを設置できないことが多いので、ターゲットまで坑井の進路を制御しながら掘進する傾斜掘りという手法が取られる。垂直井に比べて、特別な機材と坑跡制御への配慮が必要だが通常のロータリー掘削法で可能である。

増角開始点に達すると、ベントサブまたはベントハウジングとマッドモーターを降下する。マッドモーターは泥水の流れによってビットを回転させ、ベントサブまたはベントハウジングはある一定の傾きをビットに与える。この掘進方法では地上で回転を与える必要がないので、ビットは目的方位に向かって直進する。従来は坑底での傾斜・方位を測定するために、掘進を中断して、測定器付きのワイヤーラインを坑底まで降下しているが、最近は、泥水の圧力波を情報の伝達媒体として活用したMWD(Meas-

urement While Drilling) によって、泥水を循環するだけで傾斜・方位が読み取れるようになった。また、MWDは単に傾斜・方位を測定するだけではなく、実際に坑底で発生している掘削パラメーターに関するデータ、地質評価に関するデータ、物理探査に関するデータ等を掘進しながら測定できるツールもあり、今後も様々な能力を持つMWDの開発が期待されている。

4.2 水平掘り

水平掘りは坑井1本当たりの生産量を増大させるために坑井傾斜を 90° まで増角させて、地下に横たわる油・ガス層をより長い区間掘削する技術である。増角率によって Short Radius ($1.5\sim3^\circ/\text{ft}$), Medium Radius ($8\sim20^\circ/100\text{ft}$), Long Radius ($2\sim6^\circ/100\text{ft}$) に分類される (図-2)。

Short Radius は既存の坑井の再仕上げに利用することが多く、急激に増角するので水平区間長も短く $90\sim300\text{m}$ であり、仕上げ方法も限られている。掘進には Short Radius 用の特別なベントハウジングとモーターが必要である。

Medium Radius は一次増角区間→沿角区間→二次増角区間→水平区間 ($450\sim1\,050\text{m}$) と掘進する。新掘井で油・ガス層の層厚が厚くない場合に最も一般的に採用される方法であり、ステアラブルマッドモーターを利用して増角掘進と沿角掘進を選択しながら坑跡制御が可能であり、増角率がそれほど大きくないので、作業性およびターゲットに入る信頼性

は高い。

Long Radius は通常の傾斜掘りの機器を使用して、なだらかに増角する方法であり、水平区間長も $600\sim1\,800\text{m}$ と長い。坑井掘削の初期から傾斜・方位のコントロールが必要であり、ターゲットの層厚が厚くないと外れる可能性もある。

仕上げ方法として、当初は裸坑仕上げやケーシングに無数の穴を開けたスロテッドライナーを水平部に放置する仕上げが多かったが、油層間の確実なアイソレーションの必要性から、ケーシングをセメンチングしたり、スロテッドライナーとケーシングの外側をシールするタイプの裸坑パッカーを数個使用する仕上げが多くなっている。

水平坑井を掘削する場合は傾斜が 90° と大きくなるので、坑井のローサイドに掘屑等が沈殿しない様な泥水・ハイドロリックスのデザイン、コンピュータプログラムを活用したトルク・ドラグの予測、曲げや摩耗を考慮した油井用鋼管のデザインを実施する必要がある。

水平掘りは、成功すれば1本の坑井からの生産性

表-3 泥水技術の発展

時 期	泥 水 の 種 類	使用限界温度($^\circ\text{C}$)
1950年代	ベントナイト泥水	120
1960年代	リグノスルフォネート系泥水	180
1980年代前半	リグナイト系泥水	200
1980年代後半	リグナイト系泥水 +高温用分散剤・脱水調整剤	210
1989年	高温用ポリマー泥水	260

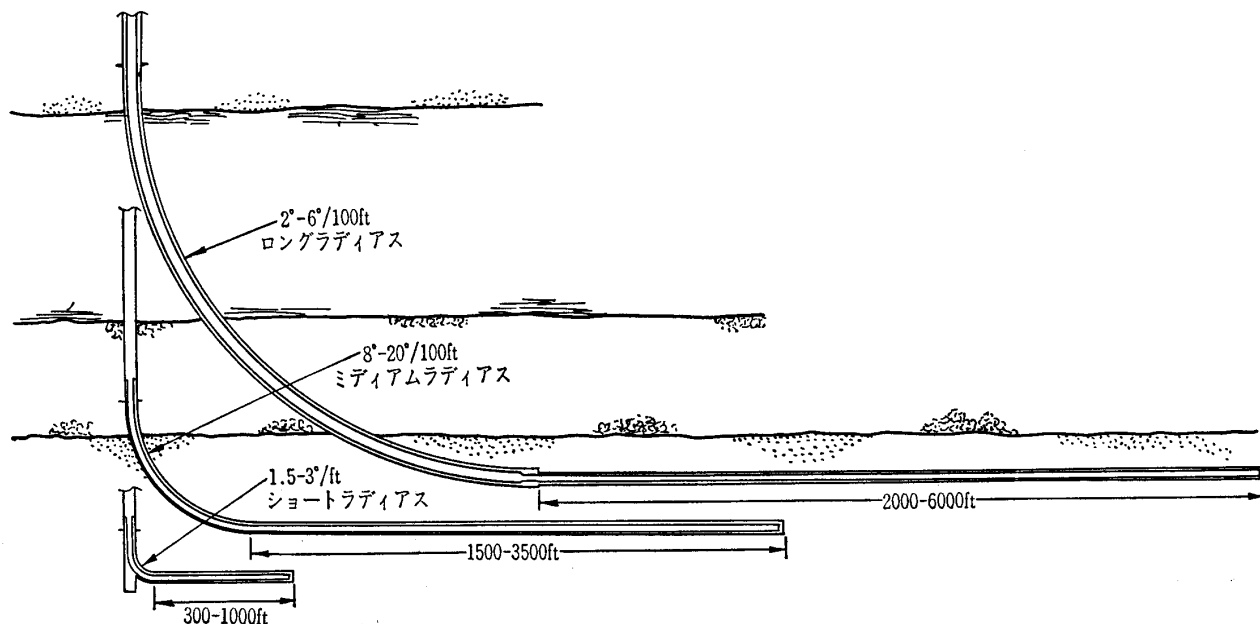


図-2 水平掘りの概要

を数倍に高める可能性もあり、今後ますます盛んになると思われる発展中の技術である。

5. 大深度井への挑戦

現在、国内で最も深く掘削された坑井は、1993年に新潟県で実施された国の基礎試錐「三島」の6300m（石油資源開発㈱）である。

日本の掘削の歴史では1955年に3000m、1961年に4000m、1968年に5000mが記録されてから、6000mが達成されたのは22年後の1990年である。これほど長い時間を要したのは、温度限界によるところが大きい。基礎試錐「三島」の坑底温度は225℃であり、これは掘削深度約9500mの米国の油・ガス井掘削や深度約12000mの旧ソ連の学術ボーリングの坑底温度とほぼ同じである。地域により地温勾配が異なるため、海外では比較的低压低温で深い深度まで掘削しているが、日本では比較的浅い深度でかなり高压高温となる点、および日本の地層が難掘性である点から見ると、温度限界を始めとする世界の技術的限界に直面しているという点で、大深度掘削に関する日本の技術は、世界的にも最高レベルにあると言える。

泥水、セメント添加剤、ビットのベアリング、ダウンホールモーター、各種機器のシール剤、物理検層ツール等は坑内温度によって制限を受ける。清水をベースにした泥水の例を表-3に示す。泥水は、ある温度になると分散剤・脱水調整剤の機能低下に

より粘性・脱水量が急増して劣化するため、その温度が泥水の使用限界温度である。

高温の問題のほか、掘削深度が増大すると掘削の困難さも増加する。一般に坑井が深くなると地層が硬くなって掘りにくくなり、坑壁の不安定さ、異常に高いまたは低い地層圧力勾配等の問題も厳しくなり、坑井のコントロールが難しくなる。

6. 海洋掘削

6.1 海洋掘削装置

海洋では、坑井を掘削している間、リグはその位置を変えないことが必要である。水深が浅いところでは栈橋を組んだり、移動・着底式のジャッキアップ型のリグを使って、脚を降ろし掘削する。より深い水域では、移動・浮遊式のセミサブマージブル型のリグ（以下セミサブ）またはドリルシップが使用される（図-3）。リグの船位保持方式としては、アンカーによって固定できるのは水深1000m程度が技術的に限界であり、海象条件の比較的穏やかな海域では、水深600m以上になるとDPS（ダイナミックポジショニングシステム）方式のドリルシップが採用される。DPS方式は海底に設置されたビーコンとリグのハイドロフォンにより常時リグの動きを検知し、ずれが生じた場合には自動的に補正するシステムである。

6.2 陸上掘削との相違点

海洋掘削の場合、作業現場が海上に孤立しているので、人員や資材の輸送に船やヘリコプター、その基地として港やヘリポートが必要となる。

ジャッキアップの様な固定式海洋掘削装置では、BOPもリグ上にセットされるのでリグと海底を結ぶコンダクターパイプが必要になる。また、シャローガス対策を施している等特殊な問題があるが、陸上の掘削方法に似ている。

しかし、セミサブ等の浮遊式海洋掘削装置は、波浪や潮流等の外力によって船体が動揺する。特に、船体の上下動による影響を緩和するために各種の装置が搭載されている。また、BOPは海底に設置され、リグまではライザーパイプという導管で連結される。台風等の緊急事態には海底BOPを閉め、ライザーパイプを回収して避難する。海洋掘削では、試掘井で油・ガス層が発見されても廃坑し、何本か

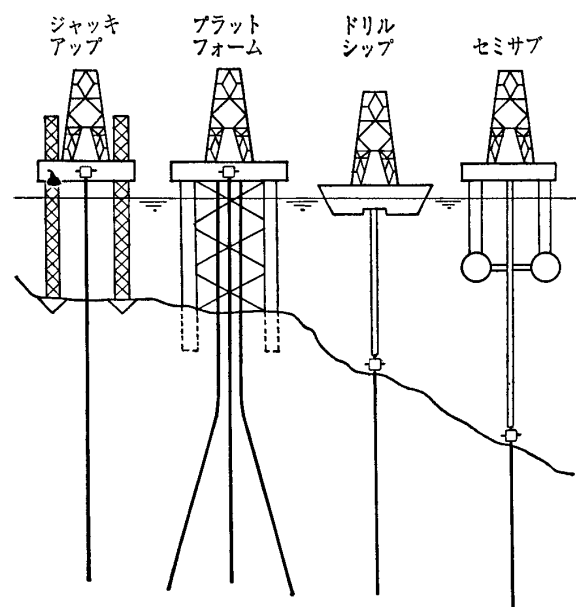


図-3 海洋掘削装置

の探掘井を掘削した後に採算性が立証されてから固定式プラットフォームを建設／設置し、探掘井を掘削することが多かった。

しかし、水深の増大に伴い1坑当たりの掘削コストや固定式プラットフォームの建設コストが上昇したため、移動式海洋掘削装置で掘削し、海底仕上げを実施し、海底パイプラインで既存の固定式プラットフォームや陸上生産基地に集油・ガスしたり、海底仕上げ実施後も移動式掘削装置をそのままプラットフォームとして利用する方法も用いられている。

氷海地域では従来の海洋掘削装置では氷の運動エネルギーに耐えられないため、盛土や氷で固めた人工島から掘削されることもある。

また、水深1000m以深の油・ガス田の開発は余程巨大な油・ガス田でなければ、経済的に採算が取れないとも言われ、現在探鉱活動が行われているのは水深2000m以浅の大陸棚とその周辺の海域（海洋面積の15.1%）にすぎず、海洋面積の59.4%を占める水深2000～5000mの海域はほとんど手付かずの状態である。日本での最大稼働水深記録は1983年の国の基礎試錐「御前崎沖」（石油資源開発㈱）の水深469mである。今後はますます深い海域へ探鉱

活動が広がることが予想される。

7. おわりに

1859年にアメリカのドレークが機械掘りで地下の石油を取り出すことに成功して以来、探鉱技術、掘削技術には目ざましい進歩があった。

しかしながら、石油を採取するためにはその深度まで坑井を掘削することが不可欠であり、坑井掘削技術の限界が油・ガスの探鉱活動の限界になっている。

今後の石油開発は僻地、極地、氷海、深海などのフロンティア地域に広がると同時に、より深部の地層を対象としたものになると考えられる。掘削深度が増大すると目的深度に到達する日数が飛躍的に増大する。日本の陸上で5000m級の坑井を掘削するには1坑当たり30億円以上の掘削費が必要である。探鉱開発費全体の25～50%を占める掘削費を軽減するには様々な新技術を導入することによって、作業効率を向上させ、掘削作業時間を圧縮することが望まれている。

（原稿受理 1993.5.7）