

最新の坑井掘削技術（その3）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助手
長 縄 成 実

今回は、新しい掘削技術を3つ取り上げます。互いに関連の無い技術のように見えますが、泥水の圧力とケーシングによって地層を保護し、坑井を保持しながら掘削するという観点に立つと、つながりが見えてきます。紙面の制約もありますので、技術的な詳しい解説は他に譲り、本稿では、これらの新技術が従来の掘削手法とどう違うのか、なぜそのような技術が必要なのかに重点を置いて説明します。

1. 掘削泥水とケーシング^{1,2)}

この連載の第1回目に掘削泥水の役割を簡単に説明しました。泥水には、掘屑の運搬以外にも、地層からの流体の噴出を防ぎ、崩壊しないように坑井を保持するという重要な役割があります。通常は、坑井内の泥水の圧力が地層の圧力より少し大きく、かつ地層の破壊圧を超えないように、泥水の比重を調整しながら掘削します。さらに、坑井の崩壊や地層流体の噴出、逸泥などのトラブルの発生が予測される地層に対しては、適切にケーシングを設置しながら坑井の掘削を進めます。

ここでは、これらの地下の圧力に関する用語や概念、ケーシング設置計画の基本的な考え方を整理しておきます。

1.1 坑井内の圧力

いま、ある密度をもった均質な泥水が、坑井内に地表まで満たされているとします。ある深度において泥水に作用している圧力は、地表からその深度までの泥水の静水圧で表されます。

$$(\text{静水圧}) = (\text{重力加速度}) \times (\text{密度}) \times (\text{深度})$$

ここで、圧力の勾配（深度の変化に対する圧

力の変化の割合）を考えます。力を kgf（キログラム重）などの単位で表す重力単位系では、重力加速度の項が省略されるので、圧力を深度で割った圧力勾配は、密度と同じ次元になります。つまり、圧力勾配はそれに等価な泥水の密度（mud density）または比重（mud weight）で表現でき、これを等価泥水比重（equivalent mud weight）といいます。ここで、比重は無次元量ですが、単位 g/cm^3 で表した密度が比重とほぼ同じ値になるため、混乱のない範囲で、泥水密度と泥水比重は同じ意味で用いられます。

坑井内に静止している泥水に対して、循環中の泥水は、流動による摩擦圧力損失や掘削によって発生した掘屑の濃度上昇による密度の増加が生じます（図1）。これらをすべて含めた泥水循環中の圧力勾配を密度に換算したものを、等価循環泥水密度（equivalent circulating density,

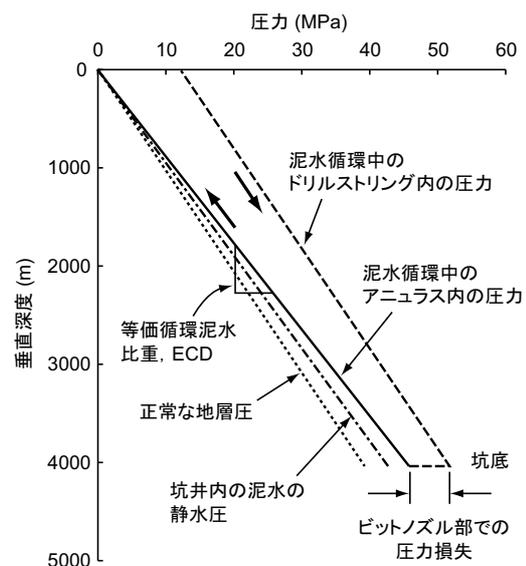


図1 坑井内の泥水の圧力分布

ECD) といひます。

現在, SI と呼ばれる国際単位系を用いることが強く推奨されていますが, アメリカを中心とする石油鉱業界ではヤード・ポンド法の単位が今もよく用いられます。SI 単位系では圧力の単位は Pa ですが, ヤード・ポンド法では, 圧力は lb/in^2 (pound-force per square inch, psi), また泥水密度は lb/gal (pound per gallon, ppg) で表されます。比重 1.0 の物質の密度は, 4°C における水の密度 $0.99997 \text{ g}/\text{cm}^3$ に等しく, これは 8.345 ppg です。石油掘削の分野では, 実用上, 21°C における水の密度 8.33 ppg を比重 1.0 とすることもあります。

1.2 地層の圧力

(1) 岩圧

地層は岩石粒子とその隙間(孔隙という)を満たしている地層流体とで構成されています。ある深度より上方に堆積している岩石およびその中に含まれる地層流体の荷重として作用している圧力を岩圧(overburden pressure) といひます。オーバーバーデン圧, 自荷重圧, 累積荷重圧などとも呼ばれます。岩圧は, 地表からその深度までの地層のかさ密度(岩石粒子と孔隙流体をあわせた全体の密度)の総和に重力加速度を掛けた形で表されます。

岩圧や次項の地層圧は, 測定によって求められますが, 測定データがない場合に, 油・ガス田の存在するような堆積岩の平均の岩圧勾配として, $0.231 \text{ (kgf}/\text{cm}^2)/\text{m}$ ($= 1.0 \text{ psi}/\text{ft}$) という値がよく用いられます。正確には, 孔隙率(すなわち地層のかさ密度)が深度に依存するため, 岩圧勾配は深度が増すと大きくなります。

(2) 地層圧

地層の孔隙を満たしている流体に作用している圧力を地層圧(formation pressure または formation pore pressure) といひます。地層圧が, 地表からその深度までの地層水の静水圧(hydrostatic pressure) に等しいような地層を正常圧層といひます。また, 地層圧が静水圧より大きい地層を異常高圧層(abnormal formation pres-

sure), 小さい地層を異常低圧層(subnormal formation pressure) といひます。

一般に, 油・ガス開発の対象となる地域の地層水の比重は, 塩分濃度によるものの, およそ $1.0 \sim 1.074 \text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲にあります。このときの地層圧勾配は $0.1 \sim 0.1074 \text{ (kgf}/\text{cm}^2)/\text{m}$ ($= 0.433 \sim 0.465 \text{ psi}/\text{ft}$) になります。

(3) 地層の破壊圧

厳密な定義ではありませんが, 地層の破壊圧(formation fracture pressure) は, 孔隙内の流体にそれ以上の圧力をかけると地層にき裂が生じてしまう圧力であるといひます。

掘削作業においては, 坑井内の泥水によって破壊圧より大きい圧力を地層にかけると, 逸泥の危険が生じます。逸泥とは, 坑井内の泥水が地層内の割れ目や空洞, 浸透性の高い地層などに失われる現象をいひます。崩壊や掘管の抑留, 噴出や暴噴などの重大な掘削障害を引き起こす原因ともなるので, 十分な対策が必要になります。掘削計画を立てる際には, あらかじめ地層の破壊圧を知っておく必要があります。

正確な破壊圧は, 坑井を掘削した後に行われる圧力試験によって求められますが, 坑井掘削の計画を立てる段階では, 地層圧と岩圧をもとに予測することが行われます。

1.3 ケーシング設置深度の選定

ケーシングの設置深度および設置数を決めるときの基本的な考え方は, 泥水比重と地層の破壊圧との関係に基づいています。これを図で表したものが図 2 です。グラフの縦軸には坑井の垂直深度を, 横軸には圧力勾配を等価泥水比重による表示と併せて示してあります。深度 $3,000 \text{ m}$ ぐらいまでの地層圧は正常圧で, それより以深は異常高圧層になっています。

いま, 深度 $4,600 \text{ m}$ に油・ガスを生産するためのプロダクションケーシングを設置して坑井を仕上げたいとしましょう。深度 $4,600 \text{ m}$ を掘削するためには, $4,600 \text{ m}$ における地層圧力勾配の値に若干の余裕をみて比重約 2.0 の泥水を使う必要があることがグラフから読み取れます。このとき, 地上から深度 $4,600 \text{ m}$ までのあいだ

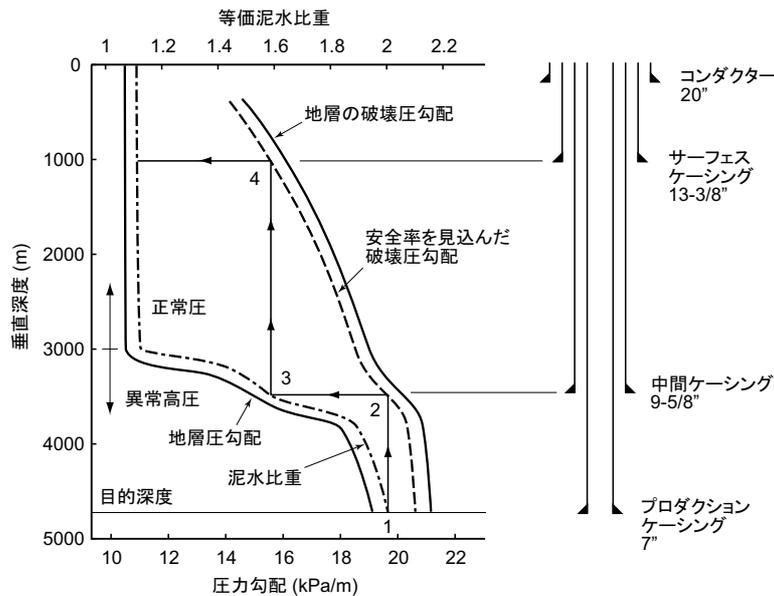


図2 ケーシング設置深度の選定の図式解法

の坑井内はすべて比重 2.0 の泥水が満たされていて、これは点 1 から垂直に立ち上げた直線 (1 2 をさらに上方に延長した直線) によって表されます。すると、破壊圧勾配曲線の交点 (点 2) である深度 3,500 m より浅いところでは、泥水圧が破壊圧を超えてしまうことが分かります。したがって、深度 4,600 m を比重 2.0 で掘削するためには、深度 3,500 m 以浅をケーシングで保護しておく必要があります。

このような手順を、目標深度から地上方向に向かって 1 2 3 4 と繰返していくことで、必要なケーシングの本数と深度を決定することができます。実際には、図に示したように破壊圧勾配にも余裕を持たせて設計します。

2. アンダーバランス掘削 3-6)

2.1 アンダーバランス掘削とは？

坑井内の圧力を地層圧より高くして流体の噴出を抑えながら掘削する通常の方法を、オーバーバランス掘削と呼ぶことがあります。これに対して、泥水の比重を小さくして、坑井内の圧力を地層圧より小さく保ちながら掘削する方法をアンダーバランス掘削 (underbalanced drilling, UBD) といいます。

オーバーバランス掘削では、地層圧よりも坑井内の泥水の圧力の方が大きいため、地層の孔

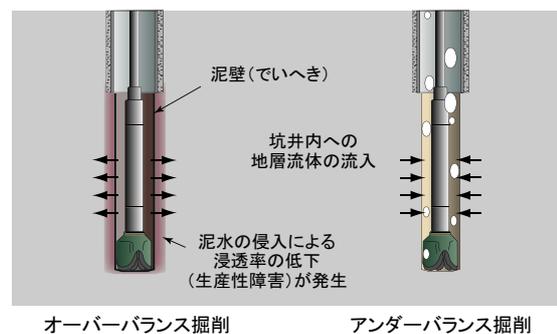


図3 通常の掘削とアンダーバランス掘削の違い

隙の中に泥水が侵入していきます。このとき、泥水の成分である粘土鉱物が坑井の内壁 (坑壁) の表面に一種のろ過膜を形成します。この膜を泥壁と呼びます。泥壁は坑壁を安定に保って崩壊を防いだり、ドリルストリングとの摩擦を小さくするなどの重要な役割を持っています。しかしその一方で、坑井近傍の地層の孔隙を目詰まりさせて、油やガスの生産能力を低下させる副作用もあります (図 3)。これを生産性障害または油層障害といいます。

アンダーバランス掘削は、坑井内の圧力の方が小さいために、逆に、地層から坑井内への流体の流入を許しながら掘削することになります。泥水が地層へ侵入することがないため、生産性障害や逸泥、掘管の抑留などのトラブルを減ら

すことが期待できます。

アンダーバランス掘削の利点と欠点は、以下のようにまとめられます。

利点

- 生産性障害の低減
- 逸泥の防止
- 差圧抑留の防止
- 掘進率の向上
- 掘削しながら生産層の評価が可能

欠点

- 特殊な装置が必要であり高コスト
- ドリルストリングの損傷が起き易い
- 坑壁が不安定になる
- 掘屑の運搬が難しい
- MWD 機器の使用に制約がある
- 不十分な計画により重大な生産性障害

アンダーバランス掘削は、生産性障害の低減のほかにも多くの利点がある反面、特殊な装置にコストがかかる、作業が難しいなどの欠点もあります。しかし、既に大部分の油やガスの生産を終えて油層内の圧力が低下した、いわゆる枯渇油・ガス田から、残された油・ガスを生産するための坑井を掘削する場合には、生産性障害や逸泥などのトラブルが大きな問題になります。アンダーバランス掘削は、このような油・ガス田では大変有効な掘削手法です。

ただし、十分な計画のもとに的確な作業を実施しないと、かえって重大な生産性障害を招く結果となり得る点には注意が必要です。また、坑口から仕上げ層の掘削まですべての区間をアンダーバランスで掘削する必要は無いので、従来のオーバーバランス掘削にとって代わる技術という位置付けには今のところありません。

2.2 アンダーバランス掘削の方法と装置

通常アンダーバランス掘削では、泥水比重を水よりも小さくする必要があります。掘削流体には、最も多く用いられる水をベースとしたもの以外にも、図4に示すような種類のものがあります。このうち、空気混合泥水やフォーム

(泡)などがアンダーバランス掘削に用いられます。広義には、空気掘削やミスト掘削もアンダーバランス掘削の一手法といえます。空気混合泥水で泥水中に混入される気体には、窒素や空気、天然ガスが用いられます。ただ、酸素が含まれると腐食性が高まることや、酸素濃度によっては坑内火災の危険があるため、窒素を用いることが多いようです。

一般的なアンダーバランス掘削装置の概略を図5に示します。アンダーバランス掘削では、(1) 空気混合泥水などの特殊な泥水を供給するための装置、(2) 坑井の圧力を制御するための装置、(3) 地層から産出する流体が混入した泥水を処理する装置の大きく3つの特殊な装置を必要とします。

坑井の圧力を制御する装置として、通常の暴噴防止装置(BOP)に加えて、ローテーティングBOP(rotating blowout preventer ,RBOP)またはローテーティングヘッドと呼ばれる、坑口を密閉した状態でドリルストリングを回転あるいは上下動かすことのできる暴噴防止装置の使用が必須となります。また、坑井から戻ってきた泥水は、通常は大気圧中に開放されて掘屑をふるい分けるシェールシェーカーに送られますが、アンダーバランス掘削では、掘屑、泥水、油、ガスの4相を分離するために、4相セパレータが

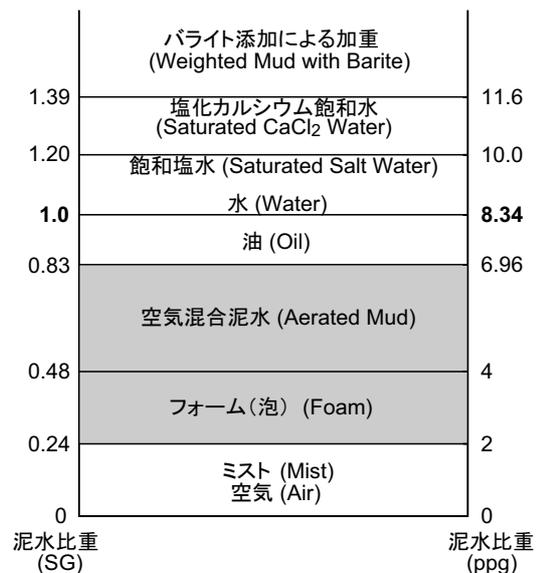


図4 泥水の種類と泥水比重の関係

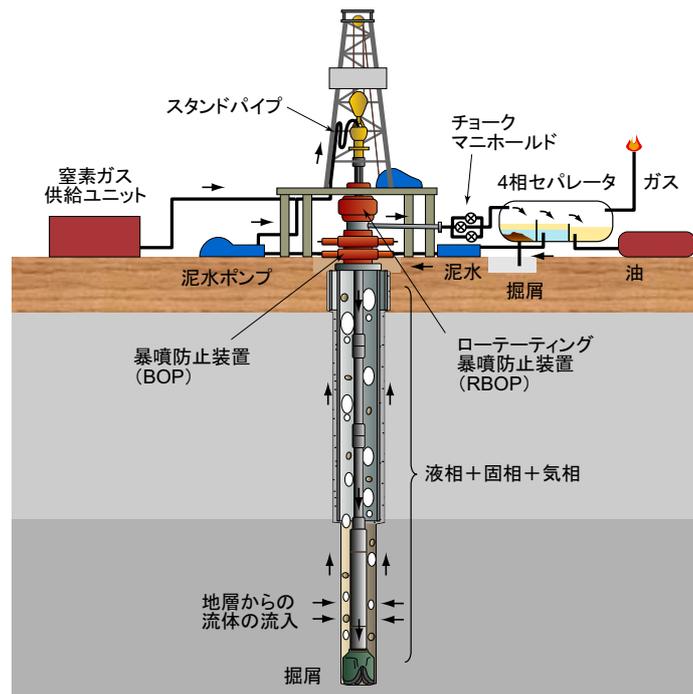


図5 アンダーバランス掘削装置の概念図
(スタンドパイプ注入方式, クローズドシステム)

用いられます。

アンダーバランス掘削では、常にアンダーバランス状態を保つことが重要であるため、これらの地上設備のほかに、揚降管時などに坑井内を低圧に保つためのダウンホールバルブや、坑底圧力をリアルタイムに計測・監視するためのPWD (pressure while drilling) 機器も使用されます。空気混合泥水のように泥水が連続相にならないアンダーバランス掘削では、泥水圧力波を利用したMWDは使用できず、電磁波によるデータ伝送方式のMWDが用いられます。

3. エクспанダブルチューブラー技術 7-9)

3.1 エクспанダブルチューブラー技術とは？

エクспанダブルチューブラー技術は、一言でいえば、ケーシングや坑井仕上げ用の鋼管を坑井内の所定の位置に降下した後に、膨張・伸延させて管径を大きくする技術です。現在、商業的に実用化されているエクспанダブルチューブラーには、次の2つの種類があります。

- ソリッドエクспанダブルチューブラー

- エクспанダブルスクリーン

では、なぜ鋼管を膨らます必要があるのか、エクспанダブルチューブラー技術によって何が可能になるのかを見てみましょう。

3.2 ソリッドエクспанダブルチューブラー

異常高圧層や逸泥層、予想されるトラブルに応じて、複数のケーシングを坑井内に設置する必要があることを説明しました。通常は、ケーシングを設置するたびに坑井の直径(坑径)が小さくなっていきます。次に掘削するビットなどの掘削編成は、必ず既に設置したケーシングの中を降ろさなければならないからです。ケーシングの本数が増えると、非常に大きな坑径で掘り始めなければならないか、あるいはケーシングとケーシングの間隙を非常に小さくしなければならないという問題が生じます。

エクспанダブルチューブラー技術を用いると、既に設置されているケーシングとほぼ同径のケーシングをその下に設置できます。図6にその様子を示します。この方式では、エクスパ

ンダブルケーシングを予定深度まで降下した後、セメントを注入し、セメントの硬化が進む間に、内部を加圧しながらエクspansionコロンを引き上げることでケーシングを押し拡げます。Enventure Global Technology 社の Web サイト (<http://www.enventuregt.com/>) にエクspansionの機構がよく分かる動画があります。これとは逆に、上から下に向かってケーシングを拡げる方式もあります。

このようなソリッドエクspandダブルチュー

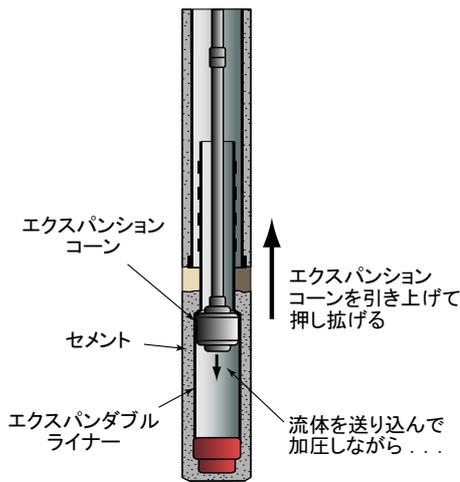


図6 ソリッドエクspandダブルチューブラー技術（上方へ引き上げる方式）

ブラー技術を用いることで、次のようなことが可能になります。

- 坑井のスリム化（究極は単一坑径の坑井）
- 腐食などの損傷したケーシングの補修
- 補修ケーシングによる水層の分離

図7に例を示します。掘削の途中に遭遇するであろう異常高圧層や逸泥層などから坑井を保護するのに必要な数だけのケーシングを設置するには、従来のケーシング設計法では、仕上げ用に7インチ径のケーシングを用いた場合、26インチ径のケーシングから掘削を始めなければなりません。これに対して、エクspandダブルチューブラー技術を用いれば、途中のいくつかのケーシングをその上段のケーシングと同径にできるので、中央の図のように最大径のケーシングを16インチにまでスリム化することができます。さらに究極的には、単一坑径の坑井（monodiameter well）を掘削することも可能になるかもしれません。

図6には、既に設置されたケーシングの下にライナーの形でケーシングを追加する様子を描いていますが、様々な応用が考えられます。ケーシングの損傷部分や油・ガスの生産用に空けたケーシングの孔（パーフォレーション孔）を塞

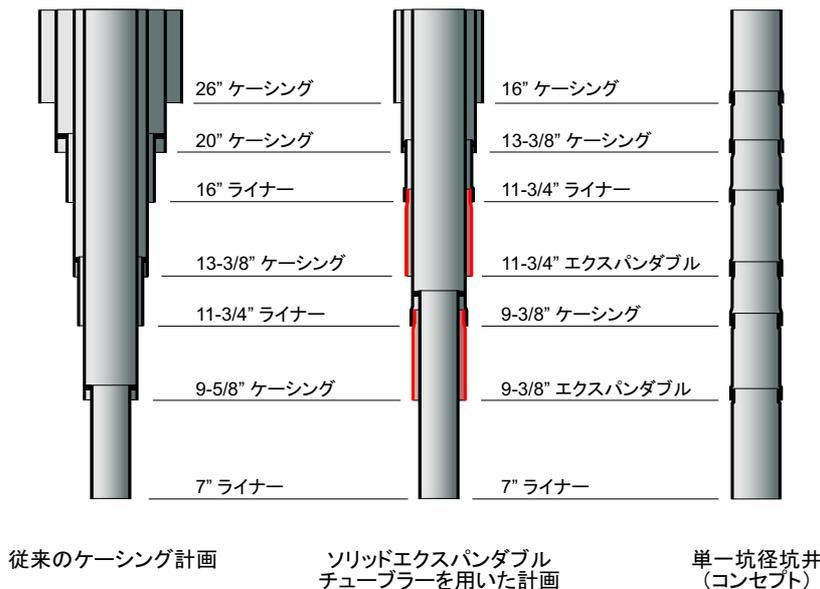


図7 エクspandダブルチューブラー技術によるケーシングのスリム化の例

きたい場合、あるいはもともとケーシングの無い裸坑部分にも、坑井の内側からバッチを当てるようにしてソリッドエクスパンドブルチューブラーを適用することができます。

3.3 エクスパンドブルスクリーン

水平坑井では比較的高い生産性の得られる方法として、油層内を水平に掘削した裸坑区間に、サンドスクリーンと呼ばれる網のように多数の孔の開いた鋼管を設置して坑井を仕上げる方法がしばしばとられます。スクリーンは、地層から坑井内に砂粒子が流入する（出砂障害という）ことを防ぐことができます。

既に設置したケーシングの先にそれより径の小さいスクリーンを降下して設置するため、従来の方法では、掘削した坑井とスクリーンの間に隙間が生じます。そのため、地層の応力状態の変化によって坑井が潰れたり、出砂障害を防ぐためにこの隙間にグラベルと呼ばれる砂利を詰める処理（グラベルパックという）を行う必要が生じたりします。

エクスパンドブルスクリーン技術を用いると、スクリーンの径を拡げて坑井との間の隙間を小さくし、安定したスクリーンの設置ができます。それによって、上述のような水平坑井仕上げにおける問題が解決され、生産性を向上させることが可能となります。

4. ケーシング/ライナー掘削 10)

4.1 ケーシング掘削とは？

ケーシングを設置するためには、通常は坑井内を循環していた泥水の流れを停止し、それまで掘削に使用していたドリルストリングをいったん地上に回収（揚管）します。そして、ケーシングパイプを坑井内の所定の深度まで降下し、ケーシングパイプと坑井との間の隙間にセメントを送り込んで固定します。

ケーシング掘削あるいはライナー掘削は、掘管にケーシングパイプを使用して掘進し、目的深度に達した後にそのままケーシングとして設置する手法です。ライナーとは、通常のケーシングが地上から目的深度まですべての深度にわ

たって鋼管を設置するのに対して、既設置のケーシングの下にぶら下がるようにして部分的に設置するケーシングを指します。

ケーシング設置に伴うドリルストリングの揚降管作業が不要であり、掘削終了後、速やかにケーシングの設置ができることから、ケーシング掘削を行うことによる利点として

- 掘削作業時間の短縮とコストの削減
- 泥水循環の停止や揚降管により生じる坑内状況の悪化を防止
- 逸泥によるトラブルを劇的に減少
- 逸泥対策のために必要であったケーシングを1本削減可能

などが挙げられます。

ケーシング掘削の概念自体は新しいものではありません。すでに1950年代頃には、生産用のケーシングパイプを掘管として用いて目標とする油層を掘削し、先端に取り付けられたビットはそのままにしてセメントで固定し、坑井を仕上げるのがよく行われました。後述のような新しい機器の開発が進み、1999年に本格的なケーシング掘削システムが商業化されました。

4.2 ケーシング掘削の方法

現在実用化されているケーシング掘削システムは、ケーシングをセメンチングして固定する前に、掘削編成（BHA）を回収するか、しないかによって2つに大別できます（図8）。

回収可能なBHAを持ったシステムでは、専用の機器を用いてワイヤーでBHAを地上に引き揚げて回収します（ワイヤーライン方式という）。回収可能システムは、BHAに組み込んだビットやツールにトラブルが発生した場合に、ケーシングはそのままにしてBHAのみを揚管し、トラブルに対処できる点が有利です。このタイプのシステムを用いているTESCO社のWebサイト（<http://www.tescocorp.com/>）には、ケーシング掘削を説明した大変分かりやすい動画がありますので参考にしてください。

一方、BHAを回収しないシステムでは、掘

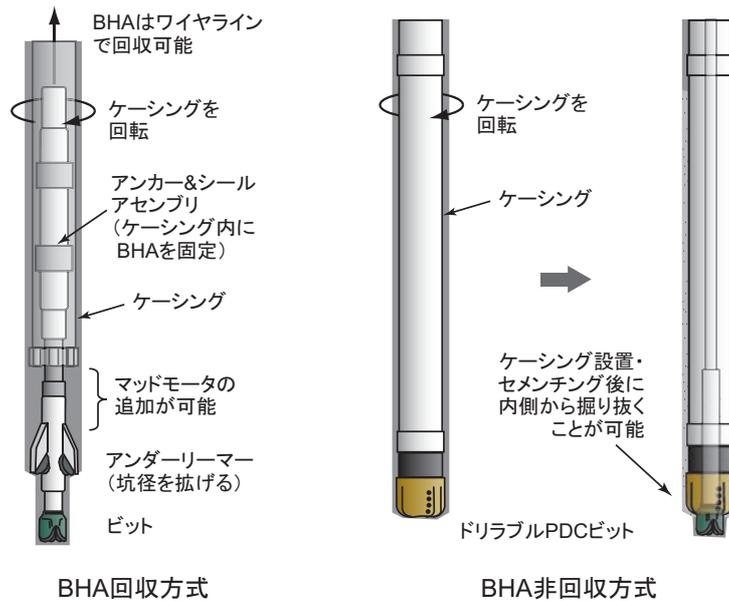


図8 2つのタイプのケーシング掘削の概念図

管として用いるケーシングの先端にドリラブルビット(掘削可能なビット)と呼ばれるビットを取り付けて掘削します。そして目的深度まで掘削した後、そのままセメンチングによってケーシングを固定します。続けてその先を掘り進むために、ドリラブルビットは、次のビットによってケーシングの内側から掘り抜くことが可能なように作られています。

4.3 最近の動向

アンダーバランス掘削との併用によって、ケーシング掘削で大きな成果が得られた事例があります(11)。枯渇して低圧になった層と異常高圧層とが交互に混在する南テキサスのガス田で、深刻な逸泥トラブルが発生したため、逸泥層をアンダーバランスで掘削して対処しようとしていました。ところが、アンダーバランス状態を維持したまま、通常の方法でドリルストリングを揚管してケーシングを降下することは非常に困難です。そこで、アンダーバランス状態で目的深度までケーシング掘削した後に、速やかにケーシングを設置する方法が実施されました。結果として、それまで逸泥層対策のために設置していたライナーケーシングを1本減らすことができ、掘削コストを30%削減することができたこ

とが報告されています。

ケーシング掘削による傾斜掘削も行われています。マッドモータを用いた傾斜制御のほかに、最近では、ロータリーステアラブルシステム(RSS)を用いてケーシングによる傾斜掘削を試みた事例の報告もあります(12)。図8の回収可能BHAの「マッドモータの追加が可能」と記した部分に、RSSを組み込みます。

ケーシング掘削技術には、ケーシングを掘管として用いることによる機械的強度に関する問題や掘削中のアニュラスの隙間が狭いことによるハイドロリクスの問題など、なお幾つかの課題が残されています。しかし、通常のケーシング設置作業では重大なトラブルの発生が予想されるような状況では、非常に有効な掘削手法であると考えられるようになってきました。

文献

- 1) 掘進率解析小委員会, 1977: 物理検層および掘進率による地層圧と地層の破壊圧の推定法とその応用, 作井技術資料2, 石油技術協会.
- 2) Bourgoyne, A. T., Jr., Millheim, K. K., Chenevert, M. E. and Young, F. S., Jr., 1991: *Applied Drilling Engineering*, Second Printing, Society of Petroleum Engi-

- neers, pp. 362–366.
- 3) McLennan, J., Carden, R. S., Curry, D., Stone, C. R. and Wyman, R. E., 1997: *Underbalanced Drilling Manual*, Gas Research Institute.
 - 4) 西野卓也, 1997: アンダーバランス掘削技術 (1). 石油技術協会誌, 第62巻, 第2号, pp. 165–171.
 - 5) 西野卓也, 1997: アンダーバランス掘削技術 (2). 石油技術協会誌, 第62巻, 第5号, pp. 451–458.
 - 6) 稲田徳弘・大備勝洋, 2004: 埋蔵量を増加させるもう一つの技術革新 - アンダーバランス掘削技術について -. 石油/天然ガスレビュー, Vol. 37, No. 1-2, pp. 39–52.
 - 7) Snyder, R. E. and Fischer, P. A., 2003: Expandable technology growth is changing drilling practices. *World Oil*, Vol. 224, No. 7, pp. 62–74.
 - 8) Fischer, P. A. and Snyder, R. E., 2004: Expandable technology and application growth continues. *World Oil*, Vol. 225, No. 7, pp. 57–61.
 - 9) Fischer, P. A. and Snyder, R. E., 2005: Expandable technology developments zero in on practical applications. *World Oil*, Vol. 226, No. 7, pp. 63–67.
 - 10) Tarr, B. and Sukup, R., 1999: Casing-while-drilling: The next step change in well construction. *World Oil*, Vol. 220, No. 10, pp. 34–40.
 - 11) Gordon, D., Bila, R., Weissman, M. and How, F., 2005: Underbalanced Drilling With Casing Evolution in the South Texas Vicksburg. *SPE Drilling & Completion*, Vol. 20, No. 2, pp. 86–93.
 - 12) Strickler, R., Mushovic, T., Warren, T. and Lesso, B., 2005: Casing Directional Drilling Using a Rotary Steerable System. paper SPE/IADC 92195 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, February 23–25, Amsterdam, The Netherlands.