

## 最新の坑井掘削技術（その2）

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

傾斜坑井について前回少し触れましたが、今回はどうやって傾斜・水平坑井を掘削するのか、その技術を詳しく取り上げます。

### 1. 傾斜掘削法の基礎

坑井掘削時に、岩石を破壊するために必要な荷重をビットに与える方法について、前回説明しました。ロータリー掘削では、ドリルストリングの自重を利用してビットに荷重をかけます。ドリルストリングを地上で押し下げているわけではなく、吊り荷重を調整することによってビット荷重をコントロールします。

しかしこの方法を傾斜坑井掘削に適用しようとしても、例えば水平坑井の水平区間では、ドリルストリングに作用する重力のうち軸方向の成分は0(ゼロ)になってしまいます。ビットに十分な荷重をかけるためには、水平区間よりも手前でドリルストリングに軸方向の力を加えてやる必要が生じます。水平坑井でなくても大偏

距坑井のように垂直からの傾斜角が $70^\circ$ を超える高傾斜区間が長く続くような場合には、ビット荷重とは逆方向に作用するドリルストリングと坑壁との間の摩擦力も加わって、ドリルストリングの自重によるビットへの荷重は期待できなくなります。

以上のような理由から、傾斜坑井掘削時には、例えば図1のような構成のドリルストリングがしばしば用いられます。ドリルストリングの重量が有効に軸力として作用する垂直区間の部分にドリルカラーやヘビーウェイトドリルパイプなどの重量の重い鋼管を配し、その先のストリングを押し込むようにして掘削します。傾斜区間以深では、鋼管の座屈に耐えられるようにヘビーウェイトドリルパイプや通常よりも径の大きいドリルパイプがしばしば用いられます。

さて、傾斜・水平坑井の軌跡（坑跡）を表現する用語には図2に示すようなものがあります。さまざまな坑跡の坑井が考えられますが、

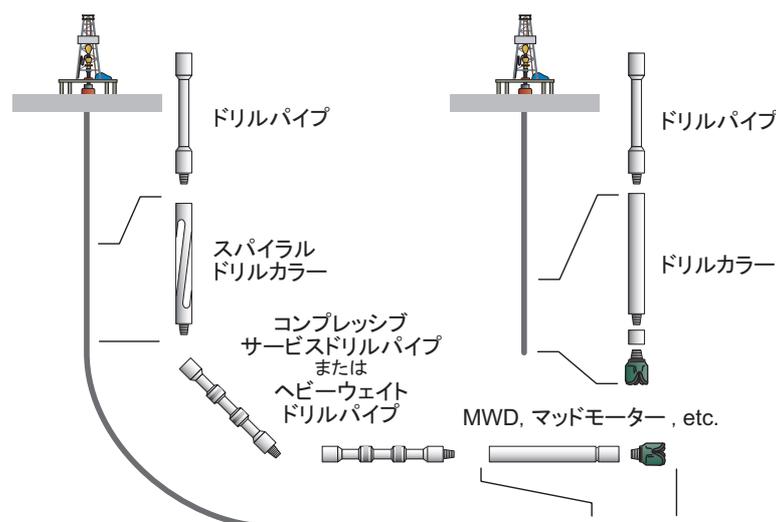


図1 垂直坑井掘削と水平坑井掘削のドリルストリングの構成の例

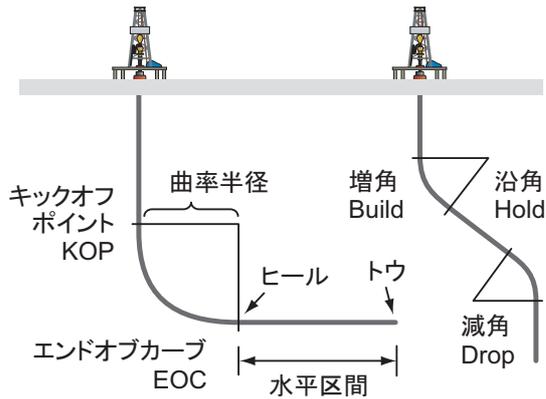


図2 傾斜・水平坑井の坑跡の表現に関する用語

いずれの場合もまず垂直に掘削した坑井をある深度から曲げる必要があります。最初に坑井を曲げ始める位置をキックオフポイント (KOP) といいます。坑井の傾斜を所定の角度になるまで増加させていくことを増角, 減少させていくことを減角, また傾斜 (および方位) を一定に維持することを沿角といえます。

## 2. 傾斜掘削技術の変遷

### 2.1 傾斜偏距具を用いた初期の傾斜掘削

ロータリー掘削による石油掘削が始まった1890年代から, 坑井曲がり問題となることがありました。鉛直下向きに真っ直ぐ坑井を掘削しようとしても坑井が自然と曲がってしまおうというものです。初期の坑井掘削では, 坑井曲がりを制御あるいは矯正しようすることに努力が払われました。

坑跡を制御しながら意図的に坑井を傾斜させる掘削は1933年に初めて行われました<sup>1</sup>。この傾斜坑井は米国カリフォルニア州ハンティントンビーチという油田で海岸線から沖合いの油層に向けて掘削されたものです。

これらの初期の傾斜坑井掘削では, 図3に示すようなホイップストックと呼ばれる特殊な坑内機器 (傾斜偏距具) を用いてビットの向きを変える (偏向する) ことが行われました。方位の修正や傾斜角度の調整などの必要に応じて, 繰返しホイップストックを用いた偏向作業を行い, 次に述べるBHAの挙動による制御法を併用し

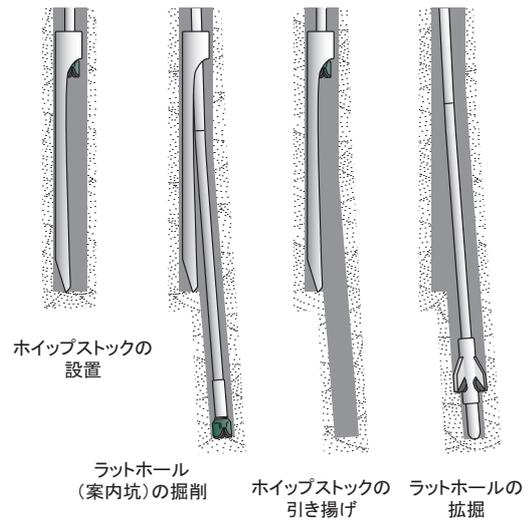


図3 ホイップストックを用いたビットの偏向作業

て坑跡を制御します。

後述のマッドモーターが実用化されてからは, 傾斜坑井掘削の主要な方法としてホイップストックを用いることはなくなりました。現在では, ケーシングをセットした坑井から枝掘り (サイドトラック) を行う際の, ケーシングに孔を開ける最初の偏向作業に用いられます。また, 非常に軟質の地層では, スパッドビットあるいはバジャービットと呼ばれるビットによって, ある方向のみの岩石を泥水噴流でえぐり, ビットを偏向させる方法も用いられていましたが, これも現在では使われていません。

### 2.2 BHA 編成による傾斜制御

BHA (bottomhole assembly) はドリルストリング最下部のドリルカラーやヘビーウェイトドリルパイプ, スタビライザーなどの部分を指します。日本語では掘削編成などといえます。最も単純な構成のBHAはスリック編成と呼ばれ, ドリルカラーのみで構成されます。1960年代以前は, スリック編成あるいはシングルスタビライザーで構成されるペンデュラム編成が主に用いられていました。

その後, BHAの編成やビット荷重, ビット回転速度, 地層の性質などとBHAの挙動やビットの偏向特性との間の関係に関する研究が行わ

れ、坑井をどのように傾斜させたいかによって、それぞれのケースに適した BHA 編成が用いられるようになりました。1960 年代以降にはマルチスタビライザー編成が用いられるようになり、スタビライザーを適切な間隔で配置することにより、坑壁との間に作用するサイドフォース(横方向の力)を調整し、増角率をコントロールします。

例えば図 4 のような編成を用いると、それぞれビットを増角、沿角、減角の傾向にコントロールすることができます。しかしながら、BHA の編成による坑跡制御法は掘進中の地層やビット荷重、ビット回転速度などのパラメータにも大きく依存し、実際のところはかなりの部分をドリラーの腕に頼っていたといえます。

### 2.3 マッドモーター

本格的な傾斜掘削システムが導入されたのは 1962 年になってからです。このときに登場したのが、図 5 に示すマッドモーター(あるいはダウンホールモーター)とベントサブを組み合わせたシステムです。マッドモーターは、従来のロータリー掘削のようにドリルストリングを回転させることをしないで、泥水の水力を利用してビットのみを回転させる坑内機器です。ベントサブは 1 ~ 3° 程度軸を傾斜させたツールで、マッドモーターとの組み合わせでビットをある方

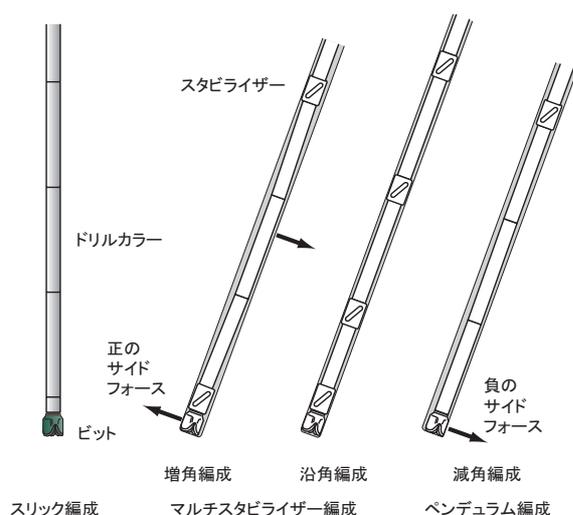


図 4 傾斜制御に用いられる代表的な BHA 編成

向に傾斜させたまま掘削ができます。

マッドモーターには、ダイナドリルという商品に代表される容積型モーター(positive displacement motor, PDM)とターボドリルに代表されるタービン型モーターがあります。

容積型モーターはモノポンプ(Moineau pump)の原理を利用した水力モーターで、らせん状に溝の切った弾性体製の筒状ステーターと、その内部のらせん状のシャフトである鋼製ローターから構成されます。モノポンプでは、ローターの回転によってローターとステーターとの間のらせん状の空間が前方に移動していき、流体が移送されます。これを逆に用いると、流体を流してやる水力によって、ローターを回転させることができます。容積型モーターは、泥水流量が一定であれば回転速度は一定で、高いトルクが得られるのが特徴です。

タービン型モーターは、羽根の付いたステーターとローターの組を数十段重ねたタービンを内蔵し、泥水の水力でローターのドライブシャフトを回転させます。タービン型は、その原理から、泥水流量が一定でも回転速度がトルクに

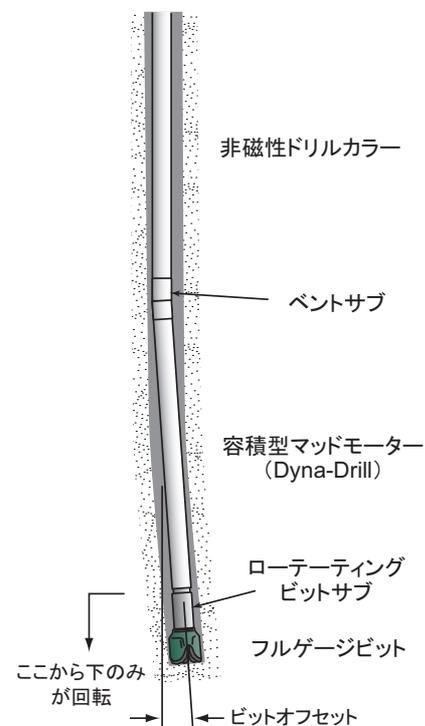


図 5 容積型マッドモーターとベントサブの組み合わせ

反比例して変化し、数百～千数百 rpm と非常に高回転の領域でのみ効率よく運転できるモーターです。タービン型モーターは当初、主にソビエトやヨーロッパで用いられました。

## 2.4 ステアラブルモーター

マッドモーターとベントサブによる傾斜掘削システムによって、傾斜制御の能力は格段に向上しました。しかし、増角率の変更を行うためには、いちいち揚管して掘削編成を組み替えなければならないという効率の悪さが欠点でした。シビアな坑跡のコントロールを行うのはなかなか大変な作業になります。

このような欠点を克服したマッドモーターが、1980年代中ごろに開発されたステアラブルモーターです。初期のマッドモーターは、その構造上、図5に示したようにモーター上部の坑底から離れた位置にベントサブを組み込んで用いるため、ビットのオフセットが大きくなります。これに対して、ステアラブルモーターは、マッドモーターのハウジング（外筒）下部が屈曲したベントハウジングの構造になったもので、ベントサブとの組み合わせよりもオフセットを小さくできるようになりました。さらに、ダブルチルトユニバーサルジョイントと呼ばれる逆向きに2段に屈曲したベントハウジングを有した、よりオフセットの小さいマッドモーターも開発されました。

ビットオフセットを小さくしたことによって、ドリルストリングを回転しながら掘削することが可能になりました。図6に示すようにドリルストリングを回転しない掘削をスライド（あるいはスライディング）モード、回転させる掘削モードをロータリー（あるいはローテーティング）モードと呼びます。ロータリーモードでは、マッドモーター部分はいわゆる振れ回りのような状態で回転し、全体としてはほぼ真っ直ぐに掘進していきます。揚降管して編成を組み替えることなく、これら2つのモードを切り替えながら、より柔軟に坑跡を制御することが可能となりました。

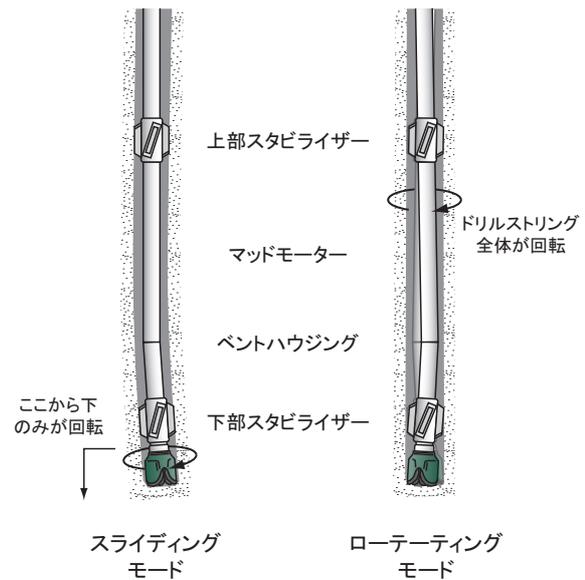


図6 ステアラブルモーターを用いた2つのモードによる掘進

## 3. 最新の傾斜掘削技術

### 3.1 ロータリーステアラブルシステム<sup>2,3</sup>

ステアラブルモーターによって傾斜掘削技術は一つの完成形に達したといえますが、やはり欠点がありました。ステアラブルモーターを用いてスライドモードとロータリーモードを繰り返すことにより、坑跡に屈曲あるいはねじれが生じ易く、またスライドモード時にホールクリーニング（掘屑の運搬）が十分に行えないなどの問題が生じました。とくに、大偏距掘削のように長い沿角区間を安全に掘り抜くためには、これらは重大な問題になります。

スライドモードを用いないで常にドリルストリングを回転させながら、なおかつ傾斜制御掘削が可能なシステムがロータリーステアラブルシステムと呼ばれるものです。ロータリーステアラブルシステムが実用化されたのは1996年になってからですが、その概念は、実はPDMが開発されるよりも前に考えられていました。1950年代には既に、回転しないハウジングに取り付けたガイドシューを泥水の水力によって作動させてビットを偏向させる装置や同様の手法

に関する特許が複数出願されています<sup>4</sup>。

ロータリーステアラブルツールは、ドリルストリングを回転させたまま一定の方向へビットを偏向させるために、回転しないハウジング部に偏向機構が内蔵されています。いくつかの種類がありますが、ビットを偏向させる機構は図7に示すような2つの方式に大別できます。

ひとつは偏向ユニットによってドリルストリングをある一方向の坑壁側へ押し付け、サイドフォースを発生させてビットを偏向させる方式です。この方式と同様のツールとしては、1970年代にラバースプリングデフレクションツールと呼ばれる偏向機器が、ベントサブに代わってマッドモーターとともに使われていたことがあります。偏向の原理は同じですが、ロータリーステアラブルシステムは、偏向ユニットの中に回転シャフトを通したことで、ドリルストリングの回転によってビットを回転させることを可能にしました。

もう一つの方式は、ドライブシャフトをハウジングの中で偏心させることによってビットを傾けて偏向させるものです。石油公団(現在の石油天然ガス・金属鉱物資源機構)と米国のSperry-Sun社が共同で開発したGeo-Pilotと呼ばれるロータリーステアラブルシステムには、この機構が用いられています。

ビットのみを回転させるマッドモーターは画期的な装置であったことには間違いありません。近い将来モグラのように地中を自由に掘り進む時代が到来することをイメージさせるに十分なシステムでした。しかし不思議なことに、最新

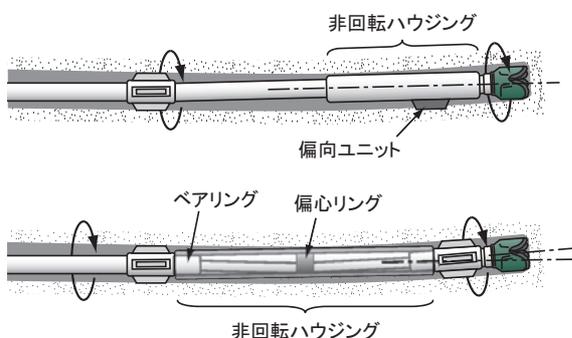


図7 ロータリーステアラブルシステムの代表的なメカニズム

の傾斜掘削技術は、ロータリー掘削技術が開発された当初と同じく、地上でドリルストリングを回転させる方式へと回帰しています。

### 3.2 傾斜測定とMWD技術

傾斜掘削においては、坑井が計画した軌跡どおりに掘削されているのか、あるいは適切な偏向作業を行うためにベントサブやベントハウジングなどの偏向機器がどの方向を向いているのかなどを常に把握する必要があります。

坑井の軌跡を求めるためには、図8に示したような

- (1) 掘削深度
- (2) 傾斜角(垂直からの角度で表す)
- (3) 方位角(北から時計回りに計り、 $0 \sim 360^\circ$ で表す)

の3種類のデータを、一定の掘削深度間隔で測定します。この測定データをもとに、最小曲率法(minimum curvature method)と呼ばれる計算法によって坑井の軌跡を計算します。

従来は、傾斜・方位の測定には、振子式の傾斜計と磁気コンパス式の方位計が内蔵された坑芯測定器と呼ばれるツールが用いられました。ワイヤーラインで坑芯測定器をドリルストリング内に降下して計測を行います。当初は、数メートル掘進するごとに作業を中断して測定器を降下・計測し、回収して作業を再開するという手順で行うシングルショットと呼ばれる方式で測定が行われました。

その後、坑井内の測定器と地上とを信号ケーブルで結び、測定器を回収しないで連続的に測定

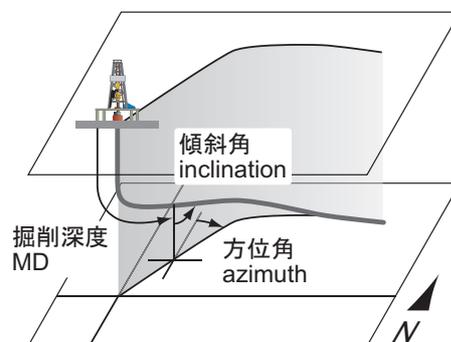


図8 坑跡計算のための傾斜・方位測定

できるステアリングツールと呼ばれるシステムが開発されました。しかし、ステアリングツールの信号ケーブルは掘削作業時には邪魔な存在であり、これに代わる新しい計測システムであるMWD (measurement while drilling) の開発が進められました。

MWDは各種計測センサーを組み込んだ坑内ツールをBHAの編成に組み込み、測定したデータをリアルタイムに地上に伝送する技術です。1978年に初めて、泥水圧力波を利用したデータ伝送方式のMWDシステムが商用化されました。泥水圧力波によるデータ伝送は、坑井内を循環する泥水に圧力波を発生させ、それにデジタル変換した計測信号を乗せる方式です。この方式は開発されてから既に20年以上経つわけですが、伝送レートはあまり向上せず、最大16 bps程度というのが現状です。大容量のデータを地上へ送ったり、双方向の通信を実現するには、この伝送レートはあまりにも小さすぎます。また、泡や気体を混合した泥水などを用いた場合には、伝送媒体が不連続になるために泥水圧力波による方式は使えなくなります。そのため、電磁波を用いた方式など泥水によらない方法の開発も進められています。

1970年代後半には、Shell Development社によって電気信号ケーブルを管体内に内蔵した特殊なドリルパイプを用いた有線遠隔計測システムの開発が行われていました。有線方式は大容量、高レートのデータ送信が可能ですが、ドリルパイプを連結するジョイント部分で信号ケーブルをどのようにして接続するかがひとつの大きな技術課題でした。現場での取り扱いや保守作業が難しいこともネックとなって、当時は実用化には至りませんでした。

現在、米国エネルギー省のサポートのもとに開発が進められているIntelliPipeと呼ばれる同様の信号ケーブルを内蔵したドリルパイプは、ジョイント部分での信号ケーブルの接続を非接触で行うもので、これまでの課題を克服できるものと期待されています<sup>5</sup>。実用化に向けてさまざまなテストが行われているようで、今後の動向に注目したいところです。

## 4. 傾斜掘削技術を利用した坑井

### 4.1 水平坑井

水平坑井は、油層の長い区間を掘り抜いて生産性を向上させることを目的としたものです。1929年に米国テキサス州で掘削されたのが最初であるといわれています。その後ソビエトや各地で水平坑井の掘削がいくつも試みられていますが、本格的に水平坑井による開発が行われるようになったのは1980年頃からです。1995年に水平区間長が5,002 mという水平坑井がカタールで掘削された記録があります。日本国内では、石油資源開発株式会社が1997年に北海道苫小牧市で掘削した1,260 mの水平区間長が最長記録になっています。

水平坑井は、垂直に掘り始めた坑井を徐々に曲げていき、最終的に水平になるまで傾斜させます。水平坑井は、KOPから傾斜角が90°になるEOCまでの増角区間の曲率半径(図2参照)によって、ロングラディアス(大半径)、ミディアムラディアス(中半径)、ショートラディアス(小半径)の3つに分類されます。ロングラディアスは半径3,000 ~ 1,000 ftで、増角率に直すと2 ~ 6°/100ft、つまり約4,500 ~ 1,500 ft掘り進むと坑井の傾斜が垂直から水平になります。増角率は単位掘進距離あたりの傾斜角の増分で表します。ミディアムラディアスの半径は700 ~ 300 ft、増角率は8 ~ 50°/100ft、ショートラディアスの半径は40 ~ 20 ft、増角率は150 ~ 300°/100ftと定義されています。

半径が大きいほど、掘削作業時の僅かな増角率の誤差が水平区間に到達したときの垂直深度に大きく影響します。同様に、傾斜測定データの誤差も大きく影響します。一般的に半径が小さく増角率が大きいほど技術的には難しくなりますが、垂直深度の誤差を最小限に抑えるために、できるだけ小さい半径で掘削を行う傾向にあります。

### 4.2 マルチラテラル坑井

1本の坑井から水平坑井と同様な枝となる坑井を複数掘削し、複数の油層に同時にアクセスして生産性の向上を図ることを目的とした坑井

がマルチラテラル坑井です。最初のマルチラテラル坑井は1953年にターボドリルを用いてソビエトで掘削されました。この最初の坑井は主坑井から9つの枝坑が掘られ、従来坑井の1.5倍のコストで17倍の生産量が得られたと報告されています<sup>6</sup>。

坑井が枝分かれする部分をジャンクションと呼びます。ジャンクションは、その構造によって表1に示すようにレベル1～6に分類されています。レベル2以上のジャンクションでは、多くの場合、図9に示すようにパッカータイプのホイップストックを用いてケーシングに孔を開けてサイドトラックを行います。図3に示した初期の傾斜掘削に用いられたホイップストックとは少し形状が異なりますが、全く同じ原理でビットを偏向させてサイドトラック坑を掘削します。

レベル2以上では、サイドトラック坑の中にライナー管と呼ばれるケーシングを降下して設置します。さらに、主坑井のケーシングと接続したり、セメンチングを行ったりして、レベル3,4,5のジャンクションとして仕上げます。また最近では、レベル6に相当するジャンクションとして、坑井内に設置した後に二股に広がる機構を持ったジャンクション機器が用られるようになってきました。文献7にさまざまなタイプのジャンクションを用いたマルチラテラル坑井の仕上げ事例が紹介されています。

#### 4.3 大偏距坑井

大偏距坑井は水平方向に遠くはなれたターゲットに向かって掘削することが目的の坑井であ

るため、70°を超える傾斜を持った非常に長い沿角区間を掘削しなければなりません。このため大偏距掘削では、坑井とその中に降下する鋼管類との間の相互作用に関わる部分を中心とした次のような技術課題があります。

- 高トルクおよび高ドラッグ
- ホールクリーニングおよびハイドロリクス
- 坑壁安定性
- ケーシングの降下・設置

さらに、これらを十分考慮して坑跡の最適化、掘削装置やドリルストリングの設計を行う必要があります。大偏距掘削における技術課題については文献8が参考になります。

ここでは最後に、筆者が現在行っている大偏

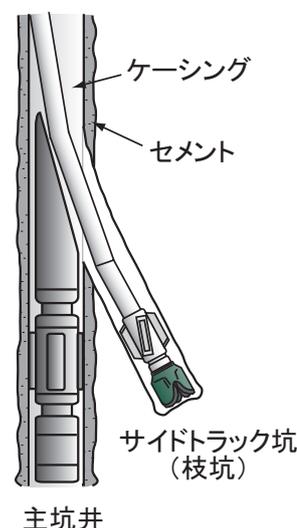


図9 マルチラテラル坑井のジャンクション部の掘削

表1 マルチラテラル坑井のジャンクションの分類

Level	主坑井	枝坑	圧力の完全性
1	裸坑	裸坑	×
2	ケーシングおよびセメンチング	裸坑または未接続のケーシング	×
3	ケーシングおよびセメンチング	ケーシングのみ	×
4	ケーシングおよびセメンチング	ケーシングおよびセメンチング	×
5	ケーシングおよびセメンチング	ケーシング/セメンチング	追加の仕上機器によって確保
6	ケーシングおよびセメンチング	ケーシング/セメンチング	追加の機器によらず確保

距坑井掘削技術に関連する研究について紹介しておきます。ここ数年来、東京大学と石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC、旧石油公団）との間で、傾斜坑井掘削時のカッティングストランスポートに関する共同研究を実施しています。これまで、JOGMECの実証実験施設である柏崎テストフィールドに設置された大型フローループ実験装置（Cuttings Transport Flow Loop System, CTFLS）において実験を行ってきました。

この実験装置では、通常の石油坑井よりひとまわり小さい5インチ径の坑井の中の、泥水によるカッティングス（掘屑）の運搬挙動を調べる実験ができます。実際の坑井ではその内部を運搬されるカッティングスの挙動を直接見ることはできませんが、図10に示すように傾斜坑井においてカッティングスが堆積したり、運搬されていく様子を実験で観察することができます。また現在、大偏距坑井内のカッティングスの堆積挙動変化を計算できるシミュレーションツールの開発も行っています。

文献

1) Brantly, J. E., 1971: *History of Oil Well Drilling*, Gulf Publishing, pp. 1473–1474.

2) Williams, M., 2004: Better Turns for Rotary Steerable Drilling. *Oilfield Review*, Vol. 16, No. 1, pp. 4–9.

3) Downton, G., Klausen T. S., Hendricks, A. and Pafitis, D., 2000: New Directions in Rotary Steerable Drilling. *Oilfield Review*, Vol. 12, No. 1, pp. 18–29.

4) Warren, T., 1998: Rotary-Steerable Technology—Part 1: Technology Gains Momentum, *Oil & Gas Journal*, Vol. 96, December 21, pp. 101–105.

5) Fischer, P. and Wigginton, K. L., 2005: Drillstring Telemetry evolves toward Full Commercialization, *World Oil*, Vol. 226, No. 7, pp. 51–52

6) Bosworth, S. *et al.*, 1998: Key Issues in Multilateral Technology, *Oilfield Review*, Vol. 10, No. 4, pp. 14–28.

7) Fraija, J. *et al.*, 2002: New Aspects of Multilateral Well Construction, *Oilfield Review*, Vol. 14, No. 3, pp. 52–69.

8) 大備勝洋, 2005: 大幅コストダウンと環境保護に威力: 大偏距掘削(ERD)技術, 石油・天然ガスレビュー, Vol. 39, No. 4, pp.23–35.



図10 傾斜坑井のカッティングス運搬挙動