講 演
 Lecture

傾斜掘りと坑内掘削機器の技術革新*

門傳 孝^{*,†}・前原 祐樹^{**}

(Received July 5, 2017 ; accepted August 10, 2017)

Technology Innovation of Directional Drilling and Downhole Tools

Takashi Monden and Yuki Maehara

Abstract : The well trajectory in Oil & Gas industry has been getting more and more complex since rotary drilling became a common solution. In order to satisfy the industry needs to drill further and deeper wells, the various downhole tools were developed. Rotary Steerable System (RSS), Measurements While Drilling (MWD) and Logging While Drilling (LWD) are particularly innovative technology in the directional drilling application. The new technology development has been slowing down drastically due to the downturn which began in 2014, however, the technology integration and IT technology development has made another wave of technology innovation in the drilling industry today.

This paper reviews the technology transition focusing on directional drilling and the related downhole tools, and discusses the outlook of future technology in the drilling industry.

Keywords : directional drilling, downhole tools, Mud Motor, RSS, MWD, LWD, IT Technology

1. はじめに

石油・天然ガス井においてロータリー掘削が掘削手法として主流になって以降、坑内のビットに地表から掘管を通じて荷重を掛け、ビットを回転させて岩石を破壊し掘進する、という基本的な掘削手法は今日まで変わっていない。一方で、時代の変遷に伴い石油・天然ガス貯留層開発は複雑化し、単に垂直井を掘削するのみでは追いつかず、傾斜掘りの必要性が出現した。例えば図 1 に示すとおり、坑井掘削中に抑留などのトラブルでサイド・トラッキングする必要がある場合、坑口位置とターゲット貯留層の位置関係や生産効率向上を目指して傾斜・水平井を掘削する場合、また暴噴対策のためにリリーフ井を掘削する場合など、近現代の貯留層開発では傾斜掘りが必要になる場面が多い。

傾斜掘りに必要となる基本的な要素技術として以下の 3 点が挙げられる。

- ・ステアリング技術
- ・坑井方位・傾斜測定技術
- ・掘削中の貯留層評価技術

ステアリングとは掘削時にビットに指向性を与え、その後の坑跡に方向性を与える技術である。ステアリング技術の発展は、坑内に降下するステアリング機器の発展ともいえ、図 2 に示すように 1920 年ごろからホイップストックを使用した傾斜掘りが始まると、その後マッドモーター、Rotary Steerable System (RSS) とステアリング機器は発展してきた。

坑井方位・傾斜測定技術とは、坑内にて方位・傾斜を測定し、幾何学的に坑井位置を三次元座標 (X, Y, Z) で同定するための技術である。方位・傾斜測定技術はシングルショット測定に始まり、1980 年頃には掘削中に方位・傾斜を測定し、地表に結果を転送することが可能な Measurement While Drilling (MWD) と発展してきた。

最後に、掘削中の貯留層評価技術とは、貯留層の位置や地質性状を掘削と同時に評価する技術である。従来型技術としてはマッドロギングの際に行われるカッティングス調査があるが、坑井内で直接的に測定を行う機器として Logging While Drilling (LWD) が開発された。この LWD 技術を用いれば従来のワイヤーライン検層と同様の坑内測定を掘削中に実施することができるため、非常に効率的に貯留層評価を行うことが可能となる。さらには坑井位置を最適化するために特化した LWD 技術も開発された。1980 年後半に最初の LWD が開発されて以降、今日まで数々の測定種目が LWD にて取得可能となった。LWD の技術開発は現在まで継続的に行われており、発展が特に目覚ましい分野でもある。

* 平成 29 年 6 月 14 日、平成 29 年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「時代の流れと作井技術の変遷－作井技術の過去、現在、そして将来の見通し」にて講演 This paper was presented at the 2017 JAPT Drilling Symposium entitled "Evolution of drilling technologies over time - Drilling technologies in the past, present and future vision" held in Tokyo, Japan, June 14, 2017.

** シュルンベルジェ株式会社 Schlumberger K.K.

† Corresponding author : E-Mail : TMonden@slb.com

図1 傾斜掘りを必要とする掘削例

図2 傾斜掘りに必要な要素技術の時代変遷

本稿ではこれらの傾斜掘りに必要な技術，特に坑内掘削機器に焦点を当て，下記の5つの時代に区分し，技術の発展について解説する。

- ・ 傾斜掘りの黎明期 (1920年代～1950年代)
- ・ 傾斜掘り技術の向上 (1960年代～1980年代)
- ・ Maximum Reservoir Contact (MRC) 技術の発展 (1990年代)
- ・ 非在来型貯留層開発 (2000年代以降)
- ・ 最近の技術開発および今後の技術動向 (現在)

2. 傾斜掘りの黎明期（1920年代～1950年代）

1920年頃までロータリー掘削による石油・天然ガス開発は比較的浅部の貯留層がターゲットであり，垂直井で油・ガスを採取する，いわゆる水井戸の延長線上のものだった。その時期までの垂直井は実際の坑井位置を確認することなく掘削されていたが，実際には坑井が垂直を保てずに坑跡が屈曲していることが疑われ，坑井の方位・傾斜を測定し坑井位置を確認する必要が出てきた。その際に開発された磁気コンパスや加速度計を用いたシングルショット測定技術が後に傾斜掘りにも適用されることになる。

その当時，シングルショット測定は機器にタイマーを組

(Kothny, 1941)

図3 初期のシングルショット傾斜計

み込んでおり、測定したい深度によってタイマーを5分から55分の間にセットし、タイマーが切れるまでの時間内に測定深度まで機器を降下させ測定する仕組みであった(Kothny, 1941: 図3)。しかしながら、測定に付随するタイマーはトラブルを生むことも多く、その後タイマーが不要な測定機器が出現した。機器を測定深度まで降下後、最低1分間静止させることで落ち着き始めた振り子が、化学的に加工された用紙に円で記録した。静止時間によって記録される円の大きさが変わるので、複数の深度にて静止させることで複数の測定が可能となった。本機器の出現は当時画期的な出来事であり、タイマー由来の問題からの脱却、記録用紙を特別な加工をせずとも地表で結果を確認、一度の降下で複数点のデータの取得を可能にすることによる掘削作業時間の大幅な軽減、に成功した。

坑井方位・傾斜の計測技術が確立された後、垂直抗井ではアクセスすることが困難な貯留層の開発を目的とした傾斜井掘削が始まった。1927年にはカリフォルニア州で傾斜掘削が実施され、1933年には同地域にて本格的な高傾斜井が掘削された(Weaver, 1946)。当時の傾斜掘削は、比較的硬質な地層ではホイップストック(図4左右)、軟質な地層ではスパディングビット(図4中央)を利用して最初のキックオフを実施した。スパディングビットはくさび形で、スプーンの背のような形状であり、坑底もしくはセメントプラグ上まで降管すると、方向を合わせ2ftから4ft程度、くさび形に沿うように横にずれながら掘削した。ホイップストックを使用する場合、小坑径のビットとともに坑底あるいはセメントプラグ上まで降管し、方位を合わせてセットするとビットと掘管のみがホイップストック

(Weaver, 1964)

図4 キックオフに利用したホイップストックとスパディングビット

図5 BHA 編成による傾斜制御

クから切り離され、ビットが横にずれて掘削することになる。傾斜がついたラットホールは次の編成にてリーマーなどで拡張されていた。

キックオフが成功すると、その後は Bottom Hole Assembly (BHA) でのロータリー掘削により傾斜が制御された。BHA 内のスタビライザーのサイズと位置を調整することで、増角・沿角・減角の傾向を出し坑跡を制御した(図5)。本技術は二次元(傾斜のみ)の坑跡コントロールを可能としたが、地層条件や掘管の歪み・ねじれ、ビット荷重、回転速度、循環速度などの掘削パラメータにも依存し、傾斜の挙動が予測困難であることが課題であった。すなわち、掘削技師の知識・経験への依存度が高く、坑跡制御の精度には限界があった。

図6 マッドモーターを利用した傾斜制御の模式図

3. 傾斜掘り技術の向上（1960年代～1980年代）

1960年代に入ると泥水循環のエネルギーをローターに介して、ビットの回転エネルギーに変換する Positive Displacement Motor (PDM: 通称マッドモーター) が開発された (Makohl and Jurgens, 1986)。開発当初はビットの回転速度を増加することによる掘進速度の向上が目的であったが、PDM 直上にベントサブを挿入することでよりビットに指向性を持たせて、傾斜・方位の制御が可能となった。初期のベントサブはその角度が一定でありモーターの直上に設置されていたが、その後モーター内にベント角を調整可能な機構が設けられた。それにより、沿角区間では掘管全体を回転させることでそれ以後の方位・傾斜を保ちながら掘削を行い、増角・減角区間では掘管の回転を停止し泥水循環によりビットのみに回転を与え、ツールフェイス（ベント角の方向）を予定傾斜方向に向けることで坑井

を曲げていく、というように三次元での傾斜コントロールが可能となった。マッドモーターとシングルショットなどの方位・傾斜測定を併用することで BHA の挙動に依存しない傾斜掘りが可能となり (図 6)、後述する MWD と併用することで、今日でも一般的に使用されるマッドモーターを用いた掘削中の傾斜制御技術の基礎ができた。

マッドモーターを利用した傾斜掘り技術が出現したことで、より高精度での坑跡制御が可能になり、傾斜形状に多様性が生まれ、傾斜掘りは非常に盛んになった。その 1 つの例としてマルチ・ラテラル坑井がある。マルチ・ラテラル坑井は、1 本の坑井の途中からサイドトラックにより新たなブランチ坑を掘削する手法である。その例を図 7 に紹介する (Maurer, 1995)。図 7 左は 1950 年代にターボドリルを使用したソビエトにおけるマルチ・ラテラル坑井 (10 本のラテラル坑) であり、17 倍の生産量を達成した。図 7 右は同ソビエトで 1968 年に掘削されたデュアル・ラテラル坑であり、1.23 倍の掘削費用を要したが 10.5 倍の生産量を達成した。

一方で坑井方位・傾斜測定技術は 1969 年から 1971 年にかけてマッドパルス転送技術が進化し、1978 年には初の MWD が Teleco Oilfield Services Inc. より商業化された (Spinnler ほか, 1978)。図 8 は当時の MWD 概念図を示しており、すでに傾斜・方位測定、データ転送、パワージェネレーションの MWD 三要素は確立されている。マッドパルスは正成分パルスの組み合わせ (図 8 右上) を信号として泥水内を通じて転送され、地表圧力センサーにてパルスを検出し、方位・傾斜データの取得を掘削中に可能とした。当時の MWD の測定精度は、ジャイロによる測定結果およびシングルショットを用いた測定結果と比較することで確認されている (図 8 右下)。今日使用されているマッドパルス式 MWD の基本技術は上述した方式と同様のものであるが、データ転送のスピードは当初の 0.5 bps から最大 24 bps 程度まで進歩している。またその後、泥水圧に依存しない電磁波によりデータ伝送を行う MWD も開

図7 マルチ・ラテラル坑井掘削の例

(Spinnler ほか, 1978)

図8 初の商業化された MWD

発されており、掘削状況により使い分けが行われている。

4. Maximum Reservoir Contact (MRC) 技術の発展 (1990 年代)

1990 年代に入ると、油・ガス需要が高まるとともにマルチ・ラテラル仕上げ技術などが確立し、Extended Reach Drilling (ERD：大偏距井) や Fishbone 型の坑井を用いた Maximum Reservoir Contact (MRC) の概念が広まった。そのため、より長い水平区間を安全に早く掘削することが傾斜掘りに要求された。従来のマッドモーターによる傾斜掘りでは、坑跡コントロールのため一定区間を掘管の回転を停止して、ビットの回転のみで掘進する必要がある。その際、坑跡の水平区間が長い ERD 井では掘管と坑壁間の摩擦が大きくなり、ビットに荷重が作用しない状況が生じ得る。それを克服すべく、掘管の回転を止めずに坑跡をコ

ントロールする Rotary Steerable System (RSS) が開発された。

図9に示すとおり、RSSは“Push the Bit”と“Point the Bit”の大きく2タイプに分けることができる。“Push the Bit”RSSは傾斜する方向と逆側の地層を機器に搭載されたパッドで叩き、その際に発生するサイドフォースで傾斜制御する。この一連の動作はRSSに搭載されたマイクロコンピュータが制御するため、掘管の回転を止めることなく傾斜制御することができる。しかしながら、軟弱地層ではサイドフォースが効果的に発生せず不十分な傾斜制御が課題となった。一方で“Point the Bit”RSSはカラー内のドライブシャフトを傾けることで、ビットを傾斜する方向に固定して掘削する技術である。機器内の制御システムがカラーに対し逆方向に、同回転数で偏心したドライブシャフトを回転させ、掘管を回転中でも地層に対してツールフェイスを一定に保つことができる。“Point the Bit”RSSにより、軟弱地層でも掘管の回転を止めずに傾斜制御が可能となった。RSSツールによる傾斜掘りの方位・傾斜制御は、泥水流量を一定時間以内に既定の手順で増減させる手法(ダウンリンクと呼ばれる)により地表から坑底のRSSツールに信号を送り、ツール自体のセッティングを変えることでステアリングの方向を制御する。

従来のマッドモーターを用いた傾斜掘りでは、マイクロドグレッグと呼ばれる短い区間での方位・傾斜の大きな変化の克服が1つの技術課題であった。図10左はマッドモーターを用いた際、掘管接続時に定常測定した方位・傾斜と、掘削中に連続測定した方位・傾斜を比較している。

図9 Rotary Steerable System (RSS) の概念図

(Griffiths, 2009)

図 10 マッドモーター（左）と RSS（右）による坑井屈曲の比較

マッドモータで傾斜制御した場合、連続測定と定常測定の差から、マイクロドグレッグの発生が示唆されるが、RSS を用いた場合（図 10 右）はそれらの差が小さく、マイクロドグレッグは発生していない。そのほか、マッドモータを用いた傾斜掘りでは、坑径拡大、ステアリング時のカッティングングスベッドに起因する不十分なホールクリーニングなど数々の技術課題も浮き彫りになった。これらの課題が RSS の出現により解決したことで、今日では一般的なマルチ・ラテラル井や大偏距井がより安全に、遠方・深部の貯留層をターゲットとして掘削されるようになった。これら多くの貢献を鑑みると、RSS の開発は傾斜掘りを根本から変える大きな技術革新であったと言える。

同じ頃、ワイヤーライン検層の技術を応用し、掘削と同時に検層を行う LWD の技術が開発された。1990 年代初頭には、従来の物理検層種目である自然ガンマ線、比抵抗、密度、中性子検層が LWD で可能となった。取得したデータは MWD を通じて地表に転送され、掘削中に検層データを確認することができるようになったため、オフセット坑との地層対比解釈や貯留層解析をリアルタイムで行うことが可能になり、さらには生産井の寿命拡大や生産性向上を目的に、坑井位置を貯留層のベストスポットに設置するための GeoSteering 技術も発展した。その後、坑壁画像ログも LWD で取得可能となったことから、掘削中に地層の走向・傾斜も推定できるようになった。こういった GeoSteering 技術や LWD 技術の発達により、正確・詳細に貯留層の状況を理解することが可能になり、従来よりも油ガスの生産効率を上げることに貢献した。

5. 非在来型貯留層開発（2000 年代）

2000 年頃から盛んになり始めたシェールガス開発では、仕上げ区間長を最大にするために、高 Dog Leg Severity (DLS) で増角区間を掘り抜き、より早く水平区間に到達する必要がある。そのため、高 DLS 掘削を可能にする新たな RSS が開発された (Bryan ほか, 2009)。新たな RSS はカラー内のシャフトに付随するパッドがステアリ

(Hawkins ほか, 2013)

図 11 ハイブリッド RSS の概念図

ングスリーブ内側を傾斜する方向と逆方向に叩き (“Push the Bit” RSS のパッドが地層を叩く機構に類似)、ステアリングスリーブを自在継手（ユニバーサルジョイント）を支点に傾けて (“Point the Bit” RSS のペント点を支点にしてドライブシャフトを傾ける機構に類似)、坑跡を制御する機構になっている（図 11）。したがって、先述の “Push the Bit” と “Point the Bit” を組み合わせたような機構となっていることから、ハイブリッドの RSS とも称される。ハイブリッド RSS はステアリングスリーブを傾ける際の支点が従来の “Push the Bit” RSS よりもビットに近いことで、より高 DLS の掘削を可能とし、従来の RSS で掘削可能な DLS は最大 8 deg/100 ft 程度であったものが、15 deg/100 ft まで向上した。

一方、LWD はこの時代にめざましく発展し、音波検層や核磁気共鳴検層、ガンマ線スペクトル検層、坑井地震探査、地層圧測定など数多くの物理検層種目が LWD でも測定可能となった。また、常時回転して測定ができる LWD の利点を生かして、ワイヤーライン検層では必要とされないものの、前述した GeoSteering に有用な検層、“Remote Boundary Detection 技術” が出現した。図 12 では最新の Remote Boundary Detection 検層の例を示しており、図 12 中央の白線が坑跡である。本技術では、30 m を越える範

図 12 LWD による最新の Remote Boundary Detection の例

図 13 リリーフ井によるキルウェルシミュレーション

囲で、坑井周辺を地層比抵抗値の違いを用いてマッピングする。この技術を使用することで、掘削中に貯留層の上面や下面を捉えることができ、より正確な GeoSteering が可能となることに加え、貯留層掘削前に上面を捉え、貯留層内にランディングすることも可能となった。これにより、従来はパイロット坑を掘削して貯留層の位置を確認し、その後のサイドトラックによってターゲット貯留層に向けてメイン坑を掘削していたが、パイロット坑を掘削せずともメイン坑を適した位置に掘削することができるようになったため、掘削作業時間の大幅な削減に貢献している。

また、この時代以前から、掘削計画段階で種々の掘削パラメータをシミュレーションすることが一般的になった。シミュレーションの代表的なものにはトルク・ドラッグやハイドロリクス計算があるが、2000 年以降の電算機の大幅な発達により手軽にシミュレーションが行われ、掘削工程の効率化や安全性向上に貢献した。さらには、2010 年のメキシコ湾原油流出事故を受け、掘削計画段階で具体的な暴噴対策を検討する必要性が出てきた。その内の 1 つに多相流体ダイナミックシミュレーターを使ったリリーフ井のシミュレーションがある。以前は、多層流体ダイナミックシミュレーションは計算スピードとアルゴリズム

の観点から計算が難しかったが、コンピュータの発達により容易に行われるようになった。図 13 はリリーフ井による一般的なキルウェルシミュレーションの例を示しており、リリーフ井のポンプスケジュールを仮定し、その際の暴噴井への貯留層流体インフラックスや暴噴井のケーシングシュールを計算することにより、安全にキルウェル可能かどうかをソフトウェア上でシミュレーションする。キルウェルの手順を事前にシミュレーターを用いて確認することで有事に備えることができる。暴噴時対応計画に関する考え方は地域や会社ごとに異なるが、特に大水深掘削では事前に同計画を提出することが義務化されている地域もあり、この暴噴時対応計画を立てる上でシミュレーターは活躍している。

6. 最近の技術開発および今後の技術動向

2014 年から始まった油価の低迷により、新技術の商業化はこれまでよりも落ち着いた傾向にあるが、さらなる技術開発は継続して行われている。ステアリング技術は、垂直掘削に特化した RSS や、従来の RSS にマッドモーターを付与してより高トルク・高掘進率を実現した RSS、200℃まで耐え得る高温環境対応の RSS など、従来の RSS

図 14 現場作業の監視システムと遠隔オペレーションのシステム概念図

を必要な場面に応用した新たなサービスの出現はあるが、抜本的な技術革新は今後に期待される。一方で LWD の発展は続いており、最近では地層流体のサンプリングならびに坑内流体分析も LWD でできるようになった。

また昨今の IT 技術の発展、特にデータ通信技術の発達により、リモートロケーションの現場作業状況や取得データを即時各国の本社などにある管制室（オペレーションサポートセンター）に転送し、経験豊富なエンジニアが複数の現場作業を遠隔地から監視することが一般的になった（Gorgone ほか，2008）。さらに本システムを発展させ、作業自体を管制室より遠隔操作で実施する取り組みも行われている。図 14 はリモート監視システムと遠隔操作システムの概念図を示す。従来の傾斜掘りサービスは、MWD エンジニア 2 名と傾斜掘りエンジニア 2 名の計 4 名程度にて実施されている。しかし、本遠隔操作システムの活用により現場での作業負担を軽減し、その結果現場エンジニアの人員削減が可能となる。この取り組みは結果として、オペレータが負担する掘削に掛ける費用や HSE リスクの低減につながる。また、経験豊富なエンジニアに限りがある傾斜掘り分野では、経験豊富なエンジニアが管制室から複数の現場作業を遠隔操作することで、結果として掘削パフォーマンスやサービスクオリティの向上も見込まれる。

今後の技術動向としては、技術の集約・統合化が着目される。シュルンベルジェ社ではこれまで培ってきた掘削に関わるおのこの技術（掘削リグ・泥水・マッドロギング・坑内掘削機器・掘削制御システム）や知見を統合し、包括的な掘削サービスの提供を計画している。具体的には従来より個別のサービス会社として提供してきた掘削に関わる技術を統合・集約し、掘削リグから泥水管理、坑内掘削機器、ビットまで、包括的な掘削サービスの提供を実現することで、従来よりも効率化かつ高クオリティの掘削サービスを目指す。さらには大手の IT 企業と協業し、昨今発展が目覚ましい AI や IoT 技術を導入し、ソフトおよびハードの両面から掘削作業全般の自動化も目指してい

る（Kibsgaard, 2017）。

7. おわりに

ロータリー掘削が石油・天然ガス開発分野において主流になって以降、1930 年代初頭より本格的な傾斜掘りが実施されてきた。ステアリング技術はホイップストック、マッドモーター、RSS と発展してきた。坑井方位・傾斜測定はシングルショット測定、MWD と発展してきたが、1970 年代後半に開発された MWD 以降、基本的な方位・傾斜測定技術は同じものである。LWD 技術は登場が 1980 年後半であったこともあり、現在まで新たな技術開発は目覚ましいものがある。今後は、岩石破壊技術を含めた掘削ビットに変わる新たな掘削システムの出現や、坑井位置の新たな測定手法の開発が期待される。また最近では IT 技術を最大限生かして、作業の効率化や安全性向上を目指した技術発展が行われており、今後も進化し続ける IT 技術を用いた掘削作業の自動化などの技術開発は継続することが見込まれる。

参考文献

- Bryan, H. H., Cox, J., Blackwell, D., Slayden, F. W. and Naganathan, S. 2009 : High-Dogleg Rotary-Steerable Systems: A Step Change in Drilling Process. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/124498-MS.
- Gorgone, I. A., Gomez, J. E. and Uddenberg, G. 2008 : Remote Operations, The Future of Drilling: Directional Drilling Remote Control. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/112599-MS.
- Griffiths, R. 2009 : Well Placement Fundamentals. Schlumberger.
- Hawkins, R., Jones, S., O'Connor, J. and Sugiura, J. 2013 : Design, Development and Field Testing of a High Dogleg Slim-Hole Rotary Steerable System. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/163472-MS.

- Kibsgaard, P., 2017 : Kibsgaard Speaks. Scotia Howard Weil 2017 Energy Conference.
- Kothny, G. L., 1941 : Underground Well Surveying, Directed Drilling, Side-Wall Sampling, And Polar Core Orientation. American Petroleum Institute.
- Makohl, F. and Jurgens, R. 1986 : Evolution and Differences of Directional and High-Performance Downhole Motors. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/14742-MS.
- Maurer, W. C. 1995 : Recent Advances In Horizontal Drilling. Petroleum Society of Canada. doi:10.2118/95-09-02.
- Spinnler, R. F. and Stone, F. A., 1978 : Mud pulse logging while drilling telemetry system: design, development and demonstration. Presented at the IADC Drilling Technology Conference, Houston, 7-9 March.
- Weaver, D. K. 1946 : Practical Aspects Of Directional Drilling. American Petroleum Institute.