

MWD 技術の現状及び超深層ボーリングへの適用

杉山 弘 訓¹⁾

1. はじめに

Measurement While Drilling (MWD)技術とは、掘削中に坑井の方位・傾斜、地層評価、掘削パラメータに関する坑底データを計測し、リアルタイムで地上へデータを伝送する技術である。従来、坑井の方位・傾斜、地層評価データは、計測のたびに掘削を中断し測定機器を投げ込むかまたはワイヤーラインにより坑内に降下して取得する必要があった。従って掘削作業時間が長くなるだけでなく、掘削編成や測定機器の坑内抑留の危険性も高かった。また、掘削パラメータは掘進しながら同時に計測されるものの地上機器により間接的に計測されるため、実際の坑底での掘削パラメータを正確に得ることは難しいと認識されている。MWD技術の出現によりこれらの課題は解消され、掘削作業時間の短縮による掘削コストの低減及び掘削作業の安全性の向上が可能となってきている。このMWD技術の発展は近年目を躍るものがあり、現在の石油開発産業における掘削技術分野での最重要課題のひとつとして、さらなる技術開発が進められている。

MWD技術に関する研究開発は1964年に米国で始まり、1970年代後半に最初のシステムが商業化された。これら初期のMWDは、計測項目も方位・傾斜に限られておりデータの伝送レートも低く、また坑内機器の信頼性も極めて低く、温度・圧力等の使用環境条件においても種々の制限があった。その後測定機器やエレクトロニクスの技術進歩にあわせてMWDは急速に発展し、方位・傾斜データのみならず地層比抵抗・自然ガンマ線・中性子・密度・温度等の地層評価に関するデータやビット荷重・トルク・圧力等の掘削パラメータに関するデータの計測項目が加わった。さらに坑底機器の信頼性

も向上し、またその適用範囲も拡大した。このMWD技術の発展によって、ワイヤーラインによる計測作業は徐々に少なくなると言われており、掘削作業の効率化及び安全性の向上をもたらす掘削作業費用の削減に有効なシステムとして石油開発業界に浸透している。

そして需要の拡大に対応して伝送能力の向上、計測種目の増加等を目指した技術開発の努力が現在も進められている。このように急速な発展を遂げているMWD技術も更に厳しい環境(高温度・高圧等)となる深層ボーリングへと適用となるとまだまだクリアしなければならない課題は多い。本稿では以下にMWD技術の現状をレビューし、深層ボーリングへの適用について考察する。

2. MWD 技術の現状

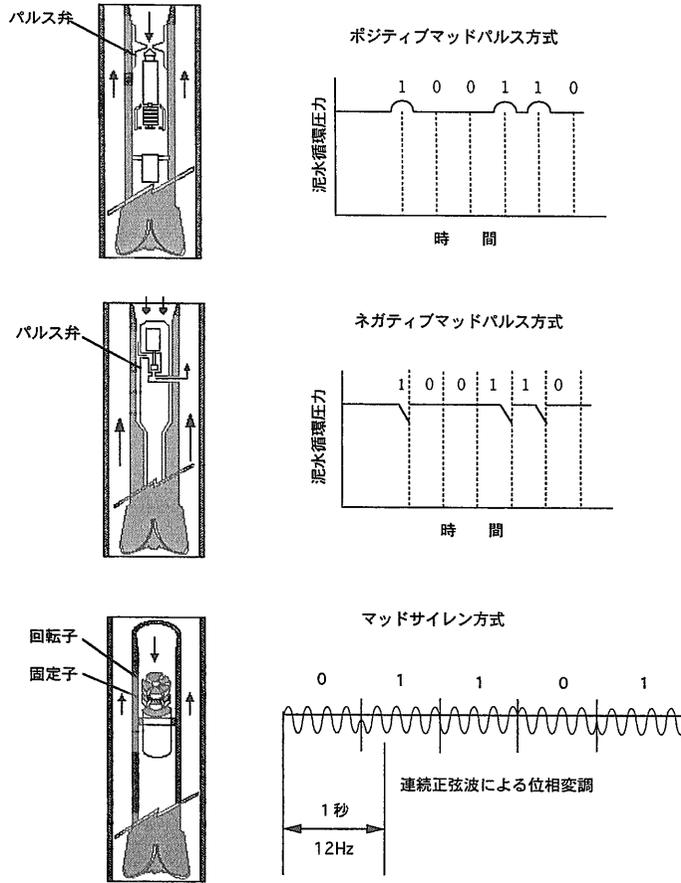
現在MWDを世界的に商業化している代表的なサービス会社として、Anadrill Schlumberger社、Baker Hughes Inteq社、Halliburton Drilling Systems社、Sperry-Sun Drilling Service社、Computalog社、Geolink社、Geoservice社等が挙げられる。ここでは商業化されているMWDの要素技術についてその現状を簡単に説明する。

a. 伝送方式

坑底データの伝送方式は、最初に商業化されたマッドパルス方式が現在もお主流であり、ポジティブ・マッドパルス(Positive Mud Pulse: 正の泥水圧力波)、ネガティブ・マッドパルス(Negative Mud Pulse: 負の泥水圧力波)、マッドサイレン(Mud Siren: 連続な正弦波)の3方式が採用されている。第1図で示すように、ポジティブ・マッドパルス方式及びネガティブ・マッドパルス方式は坑

1) 石油公団石油開発技術センター開発技術研究室:
〒261 千葉市美浜区浜田1丁目2番2

キーワード: MWD, 検層



第1図 マッドパルスによる MWD の原理

底機器の中に組み込まれている弁を瞬時に作動させて泥水圧力波を発生させる。この泥水圧力波はドリルパイプ内の泥水中を伝播して地上に届く。データ伝送レートは現状 1 ビット/秒程度であるが、最近、Anadrill Schlumberger 社はマッドサイレン方式を採用し連続正弦波による位相変調を用いて、データ伝送レートは 6 ビット/秒以上、最高で 10 ビット/秒を可能とするシステムを商品化している。

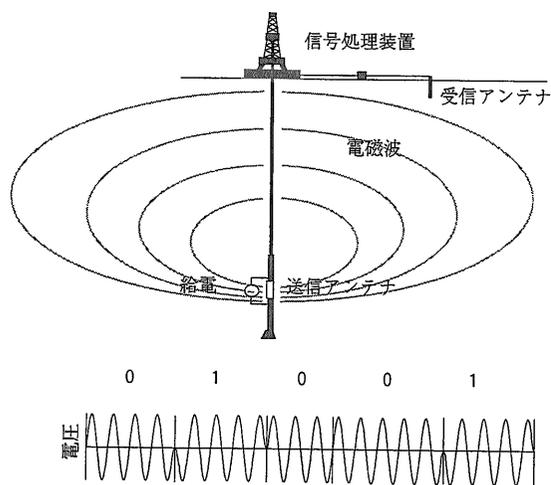
一方 Geoservices 社は、マッドパルス方式とは全く異なる電磁波 (Electromagnetic Wave) を伝送手段とした EM-MWD (Electromagnetic Measurement While Drilling) を商業化している。この方式は掘削泥水中を圧力波が伝播するマッドパルス方式に比べ、伝送中の泥水圧変動に影響されない為、マッドパルス方式よりも、適用範囲の拡大が期待できるとともに、送信機構が機械的でないことから機器の長時間の使用に対する信頼性の向上が期待できる

と考えられる。その伝送方法は第 2 図に示すように EM-MWD では坑底機器に組み込まれた送信アンテナから電磁波による信号を地中内を通して送信し、地表に設置した受信アンテナによりその信号を受信する。電磁波の送信用電源としてはリチウムバッテリーを用いており、データ伝送レートは 1 ビット/秒程度である。

b. 計測項目

(i) 坑井の方位・傾斜に関するデータ

MWD による方位・傾斜の計測には一般的に磁束計及び重力加速度計が用いられている。これら磁束計及び重力加速度計は高精度であり、且つ 3 軸方向それぞれのデータによりデジタル計算しているため、従来のシングルショットやマルチショットのようなアナログデータに比べて測定誤差もなく正確であると言える。最近では高傾斜井や水平坑井の掘削において、MWD をダウンホールモータと組み



第2図 EM-MWD システムの概念図

合わせ、方位・傾斜データを測定し、掘削編成を変えることなく坑跡をコントロールしながら掘削するのが主流となっている。

(ii) 地層評価に関するデータ

地層比抵抗の計測は数年前まで16インチショートノルマル(16" Short Normal)が広く使用されていたが、最近ではワイヤーライン検層におけるメディアムインダクション(Media Induction)に相当する2 MHz 比抵抗測定機器も製品化されている。自然ガンマ線の計測にはガイガー計数管及びシンチレーション検出器が使用されている。また最近になって地層密度や中性子孔隙率の測定機器も製品化されている。これら MWD 検層データは今のところ、ケーシングセット深度やコアリング深度の決定、異常高圧層の予知、坑内への地層流体侵入の判定等に利用されているが、将来的にはワイヤーライン検層の代わりに地層評価に用いられる可能性は高い。特に MWD 検層の場合は地層掘削直後に計測されるため、坑壁への泥水浸透が殆どない状態でのデータが取得できるという利点がある。

(iii) 掘削パラメータに関するデータ

坑底でのビット荷重、トルク、圧力については MWD 管体に接着された歪みゲージにより計測され、温度及び圧力補正とデータの平均化処理がなされた後に地上へ伝送される。傾斜掘では地上で計測されたビット荷重及びトルクに対して MWD により計測されたビット荷重及びトルクを比較することにより坑内状況を推定することが可能となった。ま

た、ドリルストリングの影響の少ない坑底でのビット荷重とトルクを知ることにより、ビットに適切な荷重やトルクを与えることが可能となり掘進率の向上が図れる。さらに Anadrill Schlumberger 社ではビット荷重とトルクのデータに基づき、ソースビット(Tooth Bit)の歯先摩耗やベアリング破損状況の情報もユーザーに提供している。その他振動や坑径のデータも計測できる MWD 用測定機器が最近になって製品化されている。

c. 坑内機器の仕様

ドリルカラーに直接各測定機器が実装された通常の MWD 機器は、外径 4-3/4 インチから 9-1/2 インチまでの各サイズが幅広く製品化されている。最高仕様温度は数年前まで 125°C 程度であったが、現状 150°C まで使用できる MWD 機器が多くなった。最高使用圧力は 15,000 psi から 20,000 psi である。泥水循環量に関する仕様については MWD 機器の外径により異なるが、外径 4-3/4 インチ程度のもので 150~350 gal/min、外径 6-1/2 インチ程度のもので 200~900 gal/min、外径 8~9-1/2 インチのもので 350~1,500 gal/min というのが一般的である。また泥水の組成に関する制限は殆どないと言えるが、タービン発電機からの制約により逸泥防止剤の使用についてはメディアムナッツプラグ(Media Nut Plug: 最大 4 mm 径)を最大限界としているものが一般的である。なお現在各サービス会社で使われている MWD 機器仕様の比較を第 1 表に示す。

3. 我が国における MWD 技術の研究開発

ここでは MWD 技術に関する我が国の研究開発プロジェクトについて簡単に述べる。

a. 社団法人 日本海洋開発産業協会(JOIA)

JOIA では、「海洋石油開発高能率掘進技術開発調査」の一環として 1984 年度よりマッドパルスによる MWD 技術を中心とする自動計測システムの調査研究を開始した。1988 年 3 月には、基礎試錐「仁賀保」に於いて 9-5/8 インチケーシング管内の深度 1,000 m に試作機を降ろして伝送実験を行い、その基本的機能を確認した。そして 1989 年に、この伝送実験結果をもとにマッドパルスによる MWD システムに対する取り組み方をまとめ、こ

第1表 商業化されている既存 MWD の仕様

サービス会社	Anadrill-Schlumberger		Baker Hughes Inteq		Halliburton		Sperry-Sun Drilling		Geoservice
MWD商品名	SLIM-1	LWD	ACCUTRAK	TRIPLE COMBO	DATA DRILL	LWD	MPT	DWD	EM-MWD
外径	1-3/4", 3-1/16"	6-1/2", 6-3/4", 8" 8-1/4", 9-1/2"	6-3/4", 7-3/4" 8", 9", 9-1/2"	6-3/4", 8-1/4"	4-3/4", 6-3/4" 7-3/4", 8", 9-1/2"	6-3/4", 8", 9-1/2"	6-3/4", 8", 9-1/2"	3-3/8", 4-3/4", 8" 6-3/4", 9-1/2"	3-1/2", 4-3/4", 8" 6-3/4", 9-1/2"
長さ：傾斜のみ	28'	-	18'	-	18.5', 20.5'	-	25.6', 25.7', 26.7'	21', 26'	29.9', 30.2', 32'
長さ：傾斜+各センサー	-	59', 60', 89', 91'	-	72', 71'	-	42.4', 68.8'	30.2', 42.2', 56.7'	36', 52'	-
最高使用温度	150 ℃	150 ℃	125 ℃	125 ℃	150 ℃	150 ℃	140 ℃	140 ℃	125 ℃
電源 (使用時間)	リチウムバッテリー (800時間)	タービン発電機	リチウムバッテリー (500時間)	タービン発電機	リチウムバッテリー (400時間)	リチウムバッテリー (200時間)	リチウムバッテリー (250時間)	タービン発電機 リチウムバッテリー	リチウムバッテリー (240時間)
最高使用圧力	15,000 psi	18,000 psi	20,000 psi	20,000 psi	20,000 psi	18,000 psi	18,000 psi	15,000 psi	15,000 psi
データ伝送方式	ホジテイク マッドパルス	マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	ホジテイク マッドパルス	電磁波
データ記録	坑内メモリ	坑内メモリ	-	坑内メモリ	-	-	坑内メモリ	-	-
逸泥防止剤	ミディアムナックラック	ミディアムナックラック	制限無し	ミディアムナックラック	制限無し	フライングアイム ナックラック	ミディアムナックラック	ミディアムナックラック フライングアイム	制限無し
測定項目 (オプション含む)	傾斜掘り γ線 坑内温度 振動	傾斜掘り γ線 比抵抗 密度 中性子 ビット荷重 ビットトルク 坑内温度 振動 坑径	傾斜掘り γ線温度	傾斜掘り γ線 比抵抗 密度 中性子 ビット荷重 ビットトルク γ線温度	傾斜掘り γ線 γ線温度	傾斜掘り γ線 比抵抗 密度 中性子 ドリルビット温度 振動 坑径	傾斜掘り γ線 比抵抗 密度 中性子 γ線温度 振動	傾斜掘り γ線 比抵抗 密度 中性子 γ線温度 タービン回転数 振動	傾斜掘り γ線 γ線温度

の研究を終了した。

b. 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

NEDO では、日本海洋開発産業協会 (JOIA) での研究成果を踏まえ、1990年度に「高効率耐熱型 MWD システムに関する調査」を実施した。これに基づき、1991年度より「地熱井掘削時坑底情報検知システムの開発」の一環として、マッドパルス方式を用いた地熱井用 MWD システムの研究開発を開始している。1997年度のシステム完成を目指し、現在坑内温度200℃以上の環境下で使用可能な坑底機器の開発に取り組んでいる。

c. 石油公団 石油開発技術センター (TRC)

TRC では、大型研究「リアルタイム掘削制御技術」の一環として、1986年度より7年間にわたり EM-MWD (電磁波方式) の研究開発を実施した。最終年度の1992年には掘削坑径12-1/4インチに適用可能な外径8インチの EM-MWD 坑底機器及び地上システムを基礎試錐での掘削実験で検証した。この掘削検証実験では、3,300 m からのデータ伝送を確認し、掘削時間もトラブルなく200時間以上を達成した。この結果を受け、EM-MWD の実用化を目指し、1993年度より特別研究「EM-MWD シス

テム実用化技術」を開始し、掘削坑径8-1/2インチに適用可能な外径6-3/4インチの EM-MWD 坑底機器の開発、高傾斜・水平坑井への適用、海洋掘削への適用等、EM-MWD システムの実用性向上を図るための技術開発に取り組んでいる。

4. 超深層ボーリングへの適用

超深層ボーリングにおける MWD システムの適用例として代表的なものは、ドイツ大陸深部掘削計画 (KTB: Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland) の自動垂直掘削システム (Automatic Vertical Drilling System: V.D.S.) が挙げられる。大深度掘削の成功の鍵を握る要素のひとつに坑井を如何に垂直に掘れるかがある。すなわち坑井内の曲がりやスパイラルにより生じる力がケーシングやドリルストリングスにトルクやドラッグを発生させ、大深度掘削の限界を定めてしまうからである。これを防ぐ為に KTB プロジェクトで開発されたのが自動垂直掘削システムである。このシステムの中にマッドパルス方式による MWD システムが組み込まれている。自動垂直掘削システムは新しい傾斜掘り機器としてビットの直上に付けられ、

センサーで検知された傾斜に応じて、装置外部のスタビライザーのリブが油圧により押し出され角度修正ができるよう設計されている。そしてセンサーで測定された傾斜、温度データ及び自動垂直掘削システムの作動状況が同時にマッドパルスにより地上に伝送される。このシステムの開発に際しては坑底機器の耐熱温度を向上させる必要があり、現在のシステムは耐熱200°Cまで可能となった。しかしこれ以上の温度が予想される深度では使用出来ず、また6,000 m以深ではマッドパルスの減衰が激しくなり泥水の性状によっては信号が地表に到達しにくいという問題も起きた。超深層ボーリング(深度:10,000 m, 温度:300°C)を成功裡に進めていく上で必要な掘削技術のひとつとして深部でも高い信頼性を発揮できるMWDシステムの開発は不可欠である。超深層ボーリングへのMWDシステムの適用に当たっての課題として以下が挙げられる。

- a. 高温用MWD機器の開発(高温用電子機器, 冷却システム他の開発)
- b. 高感度の傾斜測定装置及び坑内傾斜制御装置の開発
- c. 地層温度, 圧力を測定し地温勾配等を予測する方位の確立
- d. 大深度での信頼できる伝送システム
- e. 大深度にともなう坑底機器の小径化

5. 今後のMWD技術

MWDは最近10年間に格段の技術進歩を遂げ、掘削作業の効率向上に有効なシステムとして多くの石油開発会社で広く使用されるようになり、今後の大深度掘削や水平坑井掘削等での使用も含めますま

すMWDへの期待が高くなっている。

そしてMWD技術に関する研究開発は現在でも極めて活発であり、MWDシステムの信頼性向上や適用範囲の拡大についての研究開発に多くの企業に取り組んでいる。その研究開発の主な内容は超深層ボーリングに代表される過酷な掘削条件下(高温, 高圧等)への対応, スリムホール掘削に代表される機器の短尺化・小型化そして数多くの新規測定機器の導入及びそれに伴う情報伝送量の飛躍的な拡大である。主に検層技術サービス会社は将来的に現在のワイヤーライン検層を越える測定能力の向上を目指し研究開発を進めている。さらに坑底と地上の間での双方向通信に関する研究も行われており、この技術が確立されれば坑底機器について地上からの制御も可能となる。このような新しいMWDシステムの実用化により掘削作業の効率化及び安全化が飛躍的に進み、掘削コストの低減に大きく貢献していくものと期待される。

参考文献

- 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成5年度熱水利用発電プラント等開発—地熱井掘削時坑底情報検知システムの開発—。
- 手塚 登, 横井弘明, 脇谷 豊(1990)：掘削技術に関する研究開発の現状と展望, 石技誌, 55 (2), 153-167.
- Clous Chur and Joachim Oppelt: Vertical Drilling Technology, A Milestone in Directional Drilling, SPE/IADC 25759.
- Staff Report(1992): Parameters Measured While Drilling Grow In Number And Quality, Petroleum Engineer International, May, 37-45.
- 1994 MWD Comparison Tables: Petroleum Engineering International, May 1994.

SUGIYAMA Hironori (1995): MWD Technology and apply for Ultra Deep Drilling.

〈受付：1994年10月31日〉