

最新の坑井掘削技術（その6）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助教
長 縄 成 実

先日、石油・天然ガスの坑井掘削技術に関する国際会議である SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition に参加する機会がありました。今回は難しい話はあまりしないことにして、その会議参加報告といった感じのお話をしたいと思います。

1. 石油工学に関する国際学会 SPE

日本国内の石油開発に関する学術団体といえば、みなさんご存知のとおり石油技術協会があります。昭和8年(1933年)に設立されて先日70周年を迎えた歴史のある学会です。一方、石油工学の国際的な学会といえば Society of Petroleum Engineers(略称 SPE)がありますが、SPE が公式に設立されたのは1957年とのことです。石油技術協会に比べてずいぶん後発のように思えますが、実はそのルーツは19世紀に遡ります。SPE や関連団体のホームページをもとにその歴史を調べてみました。

1871年にペンシルベニアの鉱山技術者のグループが American Institute of Mining Engineers(アメリカ鉱山学会、略称 AIME)という団体を設立しました。有名なドレーク井が掘削されたのは1859年ですが、この頃はまだ石油が世界の主要エネルギー資源になる前の時代です。しかし、1901年のスピンドルトップやそれに続く油田の発見によって、石油開発技術の必要性が強調されるようになり、石油や天然ガスの生産に鉱山技術を応用するための技術委員会 Oil and Gas Committee が1913年に AIME のなかに作られました。これが SPE の起源といえます。

この Oil and Gas Committee は1922年に約

900人のメンバーによる Petroleum Division に格上げとなり、1945年にはそのメンバーはおよそ2,300人にまで増えました。一方で AIME 自体は、1919年に American Institute of Metals(アメリカ冶金学会あるいは金属学会)と合併して American Institute of Mining and Metallurgical Engineers(アメリカ鉱山・冶金学会、略称 AIMME)となっていました。1948年には Mining と Metals に Petroleum が加わった3つの部門(branch)から構成されるようになりました。Petroleum Branch はその後もメンバーを増やし続け、AIMME も1956年には American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers(アメリカ鉱山・冶金・石油工学会、略称 AIMMPE)と改称されました。

その翌年の1957年には、鉱山、冶金、石油工学の3つの部門がそれぞれ3つの学会となり、Petroleum Branch からは Society of Petroleum Engineers が生まれました。以降、AIME は3つの学会の連合学会となり、したがって当時は、SPE は正式には Society of Petroleum Engineers of AIME と呼ばれていました。1985年には、SPE は他の2学会とともに AIME とは完全に独立した組織として運営されるようになりました。

このようにもともとアメリカ国内の学術団体であったため、以前はアメリカ石油工学会などと呼ばれたようですが、現在では名実ともに石油工学に関する国際学会となっています。ちなみに、SPE に対する公式な日本語訳は存在しないようで、直訳すると「石油技術者の協会」みたいな分かり難い名前になりますが、筆者はやは

り「石油工学会」あたりが適当ではないかと思っています。さて、SPEのデータによると、2007年1月現在、SPEは世界113カ国からの73,000名を超える会員で構成されています。また、地域ごとの支部 (regional section) や大学内の学生支部 (student chapter) が設置されていて、支部ごとの活動も活発に行われています。もちろん日本支部 (Japan Section) もあります。

SPEが現在発行している定期刊行物には、全会員に頒布される月刊誌 Journal of Petroleum Technology (JPT) のほかに、5種類の学術専門誌いわゆる学会誌があります。

- SPE Drilling & Completion
- SPE Production & Operations
- SPE Reservoir Evaluation & Engineering
- SPE Projects, Facilities & Construction
- SPE Journal

これらはそれぞれ年4回発行されています。最初の4誌はカバーする専門分野がそのままタイトルになっています。SPE Journalには、これら4誌に各分野の比較的事実的な論文が掲載されるのに対して、石油工学全般にわたる、より学問的な論文が多く掲載されるようです。

SPEは、年1回の定例会議 (Annual Technical Conference) のほかに、分野ごとあるいは地域ごとに年間50を超える数の国際会議やワークショップを開催しています。SPEの会議の特徴として、会議で口頭発表を行うには、通常の学会誌に掲載されるようなボリュームと内容の論文いわゆるフルペーパーの提出が義務付けられています。会議で発表された論文のなかから査読を経た論文が上に挙げた学会誌に掲載されるというシステムになっています。

坑井掘削技術に関するSPEの国際会議は、掘削請負業者 (ドリリングコントラクター) の国際的な業界団体であるIADC (International Association of Drilling Contractors) との共催で開催されています。現在は、主なものとして、毎年春先に開催される国際会議 Drilling Conference and Exhibition と、アジア太平洋地区と中東地区とで交代でそれぞれ隔年で開催される Asia Pacific Drilling Technology Conference

and Exhibition および Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition の3つがあります。

2006年度は、Asia Pacific Drilling Technology が開催される年にあたり、2006年11月13～15日にタイのバンコクで、それから Drilling Conference が2007年2月20～22日にオランダのアムステルダムで開催されました。Asia Pacificの会議には筆者も論文発表をしたものの、都合により会議自体には出席しませんでした。Drilling Conference に出席することができましたのでこちらの会議の様子を紹介します。

2. 2007 SPE/IADC Drilling Conference

毎年開催される Drilling Conference は、1年おきにアメリカ国内 (ニューオーリンズやフロリダ、テキサス周辺など) とオランダのアムステルダムとが交代で会場となり、今年アムステルダムで開催される番でした。

アムステルダムは、アムステル川の旧河口付近に位置するアムステルダム中央駅を中心に張り巡らされた運河の街です。市内にはトラムと呼ばれる低床式の路面電車が走り、ヨーロッパの古い街並みに不思議と馴染んでいました (図1～図3)。また、街なかには自転車専用レーンがよく整備されていて、子供から年配の方まで、2月の冷たい雨の中を傘も差さず手袋もせずかなりのスピードで走っていく姿があちこちで見られました。

さて、Drilling Conference の会場となったのは、アムステルダムの市街地から少し外れた南地



図1 トラム (路面電車) の走るアムステルダムの街並み



図2 ホテル近くの運河



図3 街なかの花屋の店先のチューリップ

区にある RAI Congress Centre という国際会議場です(図4)。会議のプログラムに掲載されていた会場の平面図を図5に示しますが、1,000人以上を収容できる大講堂(Auditorium)と200人以上収容の2つのセッションルームの合わせて3つの会場に分かれて、3日間の間に合計100を超える論文の発表がありました。論文発表と同時に、会場の1階と2階のロビースペースでは、56の石油開発関連企業がブースを出して最新の製品や技術の展示を行い、さながら見本市



図4 会場となった RAI Congress Centre のエントランス

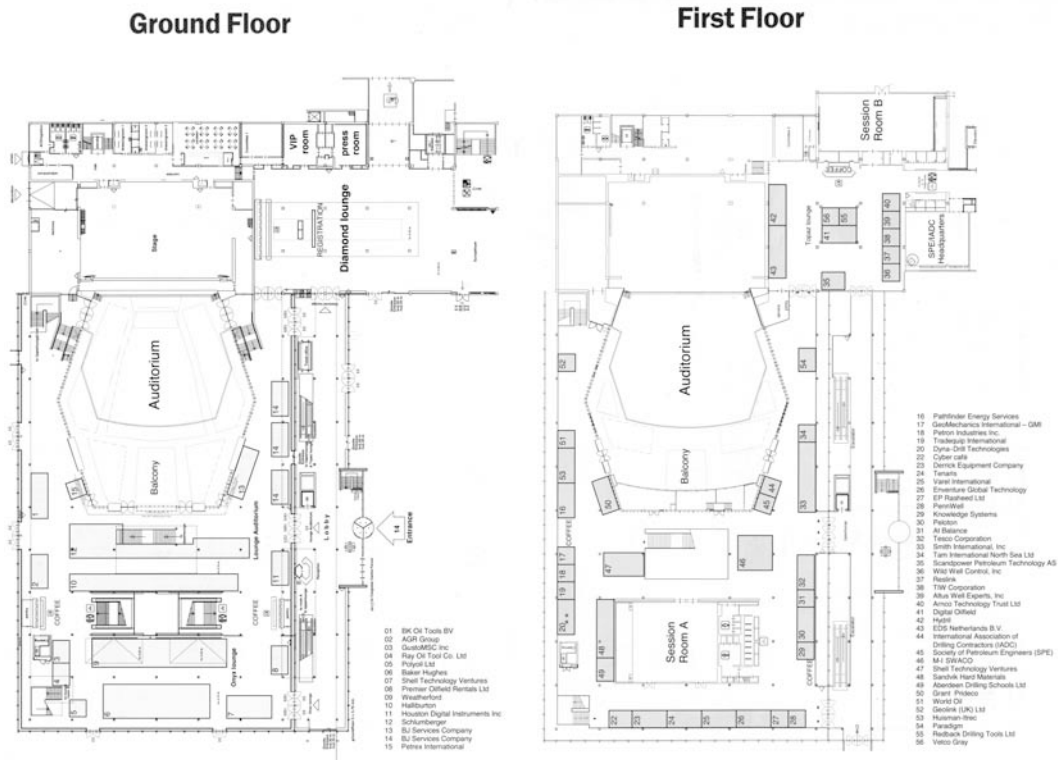


図5 2007 SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition 会場平面図

のようでした。以前に参加した Asia Pacific の会議に比べても、参加人数、会場の大きさ、発表論文数、展示ブースの数など、いずれをとっても大変規模の大きな会議です（図6～図8）。

論文発表が行われるセッションのスケジュールは表1のとおりでした。午前は各セッション4件ずつ、午後は休憩をはさんで各セッション6件ずつの発表がありました。また、午前のセッションと昼食の間には Plenary Session と称したパネルディスカッションのような全体セッションが大講堂で行われました。

プログラムには、坑井掘削に関する普遍的な技術課題である掘削流体や鋼管、ビット技術、大水深技術、セメンチングなどをテーマとした、いわゆるレギュラーセッション（と勝手に名付けますが）のほかに、大偏距掘削（ERD）やケーシング掘削、MPD（managed pressure drilling）などの最近の新しい技術に関するセッションが組まれています。これまでの本連載のなかでも

新しい技術の解説を行ってきましたが、それらも振り返りながら発表論文をいくつか紹介します。

2.1 セッション5「大偏距掘削（ERD）」

大偏距掘削（Extended Reach Drilling, ERD）における多くの技術課題は、長い高傾斜部において重力によって発生する鋼管と坑壁との接触に起因します。

鋼管と坑壁との間の回転方向および坑井深度方向の摩擦力いわゆるトルクとドラッグフォースの計算に用いられる理論モデル式の検討を行った論文が2件ありました。以下、発表論文のタイトルとその後続くカッコ内に SPE の論文番号（paper number）を示します。この論文番号で照会すれば、SPE の Web サイトからオンラインで論文を購入することができます。

- How Good is the Torque-Drag Model? (105068)
- Step Changes Needed To Modernize T&D Software (104609)



図6 Auditorium での全体セッション

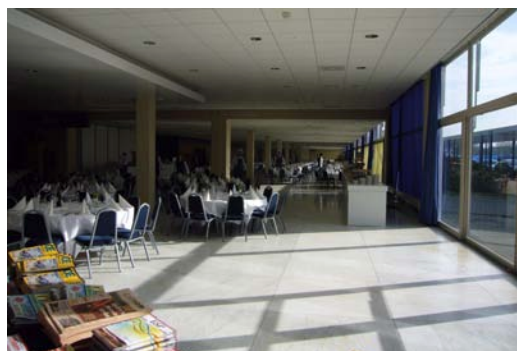


図7 800人以上? 収容可能な昼食会場



図8 ロビーでの各社の展示の様子（2日目になって少し落ち着いたところ）



表 1 2007 SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition のセッション一覧

2/20	8:30-10:30	1	Mature Fields (成熟した油ガス田)
		2	Drilling Fluids (掘削流体)
		3	Downhole Drilling Technology (坑井内掘削技術)
	14:00-17:30	4	Drilling Optimisation (掘削の最適化)
		5	Well Planning & ERD (坑井計画と大偏距掘削)
		6	Deepwater Drilling I (大水深掘削 1)
2/21	8:30-10:30	7	Bit Technology (ビット技術)
		8	Tubulars I (鋼管 1)
		9	Geomechanics (ジオメカニクス)
	14:00-17:30	10	Case Histories (事例)
		11	Health, Safety, Security & Environment (健康, 安全, 保安および環境)
		12	Rig Technology (リグに関わる技術)
2/22	8:30-10:30	13	Managed Pressure Drilling (圧力管理掘削)
		14	Cementing (セメンチング)
		15	Tubulars II (鋼管 2)
	14:00-17:30	16	Casing While Drilling (ケーシング掘削)
		17	Completions (仕上げ)
		18	Deepwater Drilling II (大水深掘削 2)

さてこれらの論文では、もう 20 年以上も前に発表されたトルク・ドラグモデル¹⁾が、ドリルストリングの曲げ剛性を考慮していない近似モデルであり、さらにその後、曲げ剛性を考慮した、より高精度のモデルが多数発表されているにも拘らず、今でも非常によく用いられていることについての検証と今後のモデル開発に対する課題が考察されていました。

一方、実際の掘削やケーシングの作業中にトルク・ドラグを軽減するための方法としては、Non-Rotating ドリルパイププロテクターやローラーセントライザーなどの機器をドリルパイプやケーシングパイプの外側に装着することや、より潤滑性の高い泥水を用いることが挙げられます。掘削泥水のセッションでは、油系泥水にグラファイト(黒鉛)や炭酸カルシウムの粉末を潤滑剤として添加して使用した報告がありました。

- Lubricant Enabled Completion of ERD Well (105730)

トルク・ドラグは、掘進中だけでなくケーシング作業時にも問題になります。泥水が満たされ

た坑井のなかにケーシングパイプを降下する作業は、例えるなら、底の抜けた円筒を水中に沈めるようなものです。そこで、底に蓋をして筒の中に水が入らない状態で水中に沈めれば、より大きな浮力が筒に作用することになります。この原理を使った Floation Method と呼ばれる方法を用いてケーシングと坑壁との摩擦を軽減したライナー設置作業の報告がありました。

- Floation of 10 3/4-in. Liner—A Method Used To Reach Beyond 10 km (105839)

大偏距掘削では、トルク・ドラグの増大のためにドリルストリングが座屈しやすくなることも大きな問題になります。まだ室内実験レベルの研究ですが、興味深いものとして、ドリルストリング内の泥水の圧力振動が座屈挙動に及ぼす影響を調べた報告がありました。

- The Effect of Hydraulic Vibrations on Initiation of Buckling and Axial Force Transfer for Helically Buckled Pipes at Simulated Horizontal Wellbore

Conditions (105123)

筆者らも石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) と共同で、大偏距掘削時のカッティングストラップ（掘屑運搬）に関する研究を行っています。図9に示すように、大偏距坑井内のカッティングスの堆積挙動の時間変化をシミュレーションできるツールを開発中です。こちらの研究開発は、昨年秋の Asia Pacific の会議で発表を行いました。大偏距掘削関連技術として大いに関心を持ってもらえたようです。

2.2 セッション 16「ケーシング掘削」

ケーシング掘削に関するセッションでは、実際にケーシング掘削/ライナー掘削を実施した事例の報告が3件ありました。

- Two Salt-Dome Wells Successfully Drilled With Casing-While-Drilling Technology (105773)
- Drilling With Liner on Horizontal Oil Wells (105403)
- PDC Casing Drilling Improves HS&E, Cuts Drilling Costs (105595)

ひとつめは、ロータリーステアブルおよびMWDシステムを組み込んだBHA回収方式のケーシング掘削システムを使用して、坑壁不安

定や逸泥の問題のある岩塩ドームの掘削に成功した報告でした。2つめは Weatherford 社のドリラブルビットを使ったライナー掘削、3つめは Hughes Christensen 社のドリラブルビットを使った西アフリカでのケーシング掘削の報告でした。ブースでは、これらのケーシング掘削機器の展示もありました（図10）。

この他には、ケーシング掘削時のセメンチング作業に関して2件の発表がありました。

- Cementing Considerations for Casing While Drilling (105413)
- Combination of Drilling With Casing and Stage Tool Cementing (105457)

このなかでは、次のようなケーシング掘削特有の問題も取り上げられていました。ケーシングパイプをいかに坑井の中心に位置させるかが、セメンチングの成功につながりますが、そのために通常はケーシングの周囲にセントライザーと呼ばれる機器を装着して坑井内に降下します。ところが、ケーシング掘削では、ケーシングを回転させるために、通常のセントライザーを用いることができません。そこで、ケーシングを坑井の中心に位置させながら回転できる Non-Rotating タイプのセントライザーなどの特殊な機器の開発が必要になります。

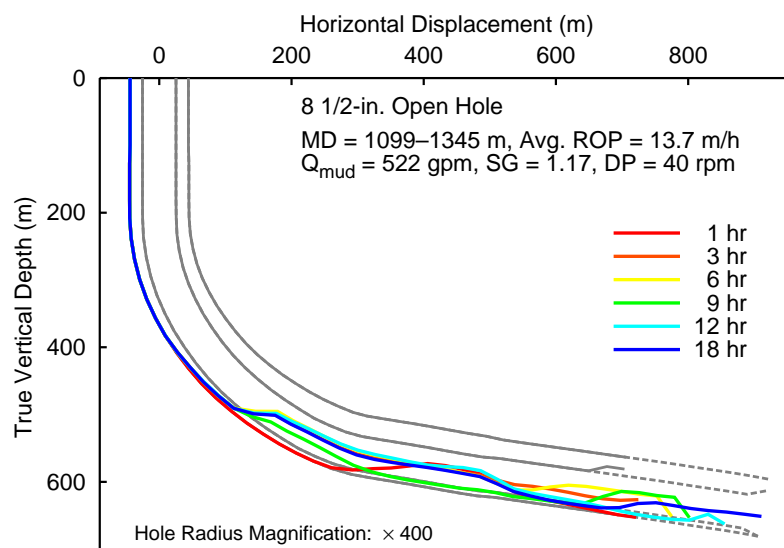


図9 大偏距掘削時のカッティングス堆積挙動のシミュレーション例²⁾



Weatherford 社のドリラブルビット



Tesco 社の BHA 回収方式のケーシング掘削用編成

図 10 ケーシング掘削用ツール

2.3 セッション7「ビット技術」

ロータリーステアラブルシステム (RSS) に関連した発表が、ビット技術のセッションで2件ありました。そのうちのひとつは

- Successful PDC/RSS Vibration Management Using Innovative Depth-of-Cut Control Technology (104388)

です。ロータリーステアラブル・MWD システムを用いた傾斜掘削において、BHA の振動が問題となり、これを制御するために PDC ビットのデザインに改良を施し、傾斜制御の安定性の向上を図ったというものでした。

また展示ブースでは、各社の方式の異なるロータリーステアラブルシステムの模型を見ることができました (図 11)。ビット部分が回転するものやカットモデルにしてあるものなど、ビットの偏向機構や内部の構造が分かるように作られていて、それぞれデモンストレーションが行われていました。各社ともビットの偏向機構を備えたマッドモーターのみを作っているわけではなく、傾斜制御に必要な計測および MWD / LWD を含めた総合的なシステムとして傾斜掘削サービスを行っています。

2.4 その他のセッション

事例報告のセッションで、MPD の一手法と考えられるライザーレスのデュアルグラディエント掘削システムを実際に用いた報告

- Deployment of a Riserless Mud-Recovery

System Offshore Sakhalin Island (105212)

がありました。デュアルグラディエント掘削のうちでも、以前紹介したサブシーマッドリフト掘削は課題が多く商業的にはうまくいっていないようですが、こちらのライザーレスシステムは実績を積みつつあるようです。

MWD 技術関連では、坑内掘削技術のセッションで管体伝送方式の MWD に関する発表がありました。

- Field-Test Results of an Acoustic MWD System (105021)

石油公団でも以前研究開発を行っていたと記憶していますが、今回発表されたものは商業化に向けた実証試験の段階にあるようです。また、以前に紹介した IntelliPipe と呼ばれる有線方式の高伝送レート MWD システムは、IntelliServ Network というシステムで商品化がなされたようで、展示ブースが出ていました。

少々駆け足の紹介になってしまいましたが、今回報告した会議には、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) との共同研究の一部として参加しました。コンピュータと情報ネットワーク技術の進歩により、インターネットで検索をかければ、デスクに座ったまま膨大な量の情報を容易に得ることができる時代になりました。しかし、実際に話を聞いて実物を直に目にしないと分からないことはまだまだ沢山あります。末筆ながら、貴重な情報収集の機会を与え



旧石油公団と共同で開発された Sperry Drilling Services 社 (現在 Halliburton 社の一部門) の GeoPilot



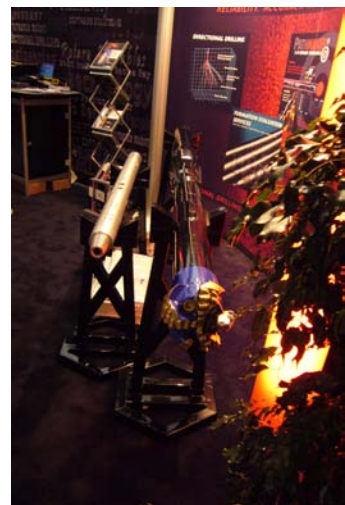
Baker Hughes 社の AutoTrak シリーズ



Baker Hughes 社の AutoTrak



Schlumberger 社の PowerDrive



PathFinder 社の PathMaker

図 11 各社のロータリーステアラブルシステム

ていただいた JOGMEC に感謝いたします。

文献

1) Johancsik, C. A., Friesen, D. B. and Dawson, R., 1984: Torque and Drag in Directional Wells—Prediction and Measurement. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 36, No. 6, pp. 987–992. (SPE 11380-PA)

2) Naganawa, S. and Nomura, T., 2006: Simulating Transient Behavior of Cuttings Transport over Whole Trajectory of Extended Reach Well. paper SPE 103923-MS presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, November 13–15, Bangkok, Thailand.