

最新の坑井掘削技術（その4）

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

連載も4回目となり、ちょうど次は海洋掘削技術を取り上げようと考えていたところ、タイミング良く（悪く？）日本で唯一の海洋掘削コントラクターである日本海洋掘削（株）の方々が執筆された記事¹⁾が石油・天然ガスレビュー誌に掲載されました。本誌の「事務屋のための石油技術講座」においても、10年以上前になりますが海洋掘削技術および海洋油田の開発について連載されました。これらの記事と重複する部分もあると思いますが、あわせて参照していただければと思います。本稿では、いつものように、海洋での坑井掘削がどのように行われるかという話から始めて、専門知識をあまり持ち合わせていない読者の方にも理解し易いように解説したいと思います。

1. 海洋掘削の概要

1.1 海洋掘削リグ

海洋で石油・天然ガスの坑井を掘削するためには、図1に示すような海洋掘削装置（リグ）が用いられます。多くのものは曳航されて、あるいは自航して移動できる移動式海洋掘削装置で、これには次のような種類のものがあります。

- (1) 着底型（サブマーシブル）
- (2) 甲板昇降型（ジャッキアップ）
- (3) 半潜水型（セミサブマーシブル、セミサブ）
- (4) 船型（ドリルシップ）

最初の2つは、海底に掘削装置を接地、固定させる方式であるため、比較的浅い水深で用いられます。着底型掘削リグは、船体を沈めて海底に着底させて掘削作業をします。甲板昇降型掘削リグは、船体および甲板が昇降可能な脚によって支えられていて、曳航時には脚を上げて浮上し、掘削地点に到着すると脚を下げて海底

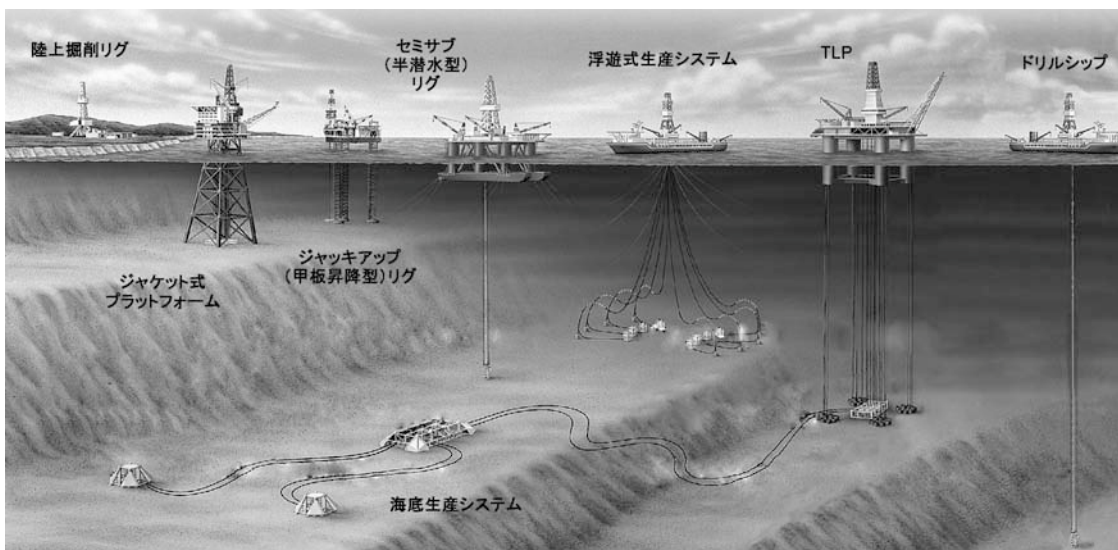


図1 主な海洋掘削リグおよび海洋生産システム（Vetco Gray 社カタログより引用・加筆）

面に接地させます。

後の2つは浮遊式の掘削装置です。半潜水型掘削リグは、下部船体（ローハル）の上に複数の支柱（コラム）を立て、その上に作業甲板を搭載した構造の掘削装置です。掘削時にはコラムの半ばまで沈めた状態で作業します。船型掘削リグすなわち掘削船は、文字通り通常の船体上に掘削装置を搭載した形式のものです。

浮遊式掘削装置は、アンカー（錨）とワイヤーやチェーン（係留索鎖）を用いた係留、あるいは自動船位保持システム（dynamic positioning system, DPS）によって、掘削地点に留まって掘削作業を行います。DPSはアンカー係留よりも大水深での船位保持が可能です。

1.2 プラットフォーム

海洋掘削リグは専ら坑井の掘削に用いられますが、探鉱が成功して十分な石油・天然ガスの存在が確認でき、開発に移行する段階になると生産に必要な設備を持った施設が必要になります。生産設備および坑井の改修作業なども行えるように掘削装置を搭載した施設をプラットフォームと呼びます。

プラットフォームは大きく固定式と浮遊式に分けられ、それぞれ次のような種類があります。

(1) 固定式プラットフォーム

- (a) ジャケット式
- (b) 重力式
- (c) 人工島

(2) 浮遊式プラットフォーム

- (a) コンプライアントタワー（Compliant Tower）、ガイドタワー（Guyed Tower）
- (b) TLP（Tension Leg Platform）
- (c) スパー（SPAR）
- (d) FPS（Floating Production System）
- (e) FPSO（Floating Production, Storage and Offloading System）

固定式は構造物を海底に固定する形式のプラットフォームです。一方、浮遊式プラットフォームは大水深に適した様々な形式のものが開発されています。また、FPSやFPSOは海底装置を含めた生産システム全体を表す名称です。主な海洋生産システムとそのおよその稼働水深を図2に示します。

TLPは、セミサブリグに類似した半潜水型の浮体をテンドンと呼ばれる緊張係留索によっ

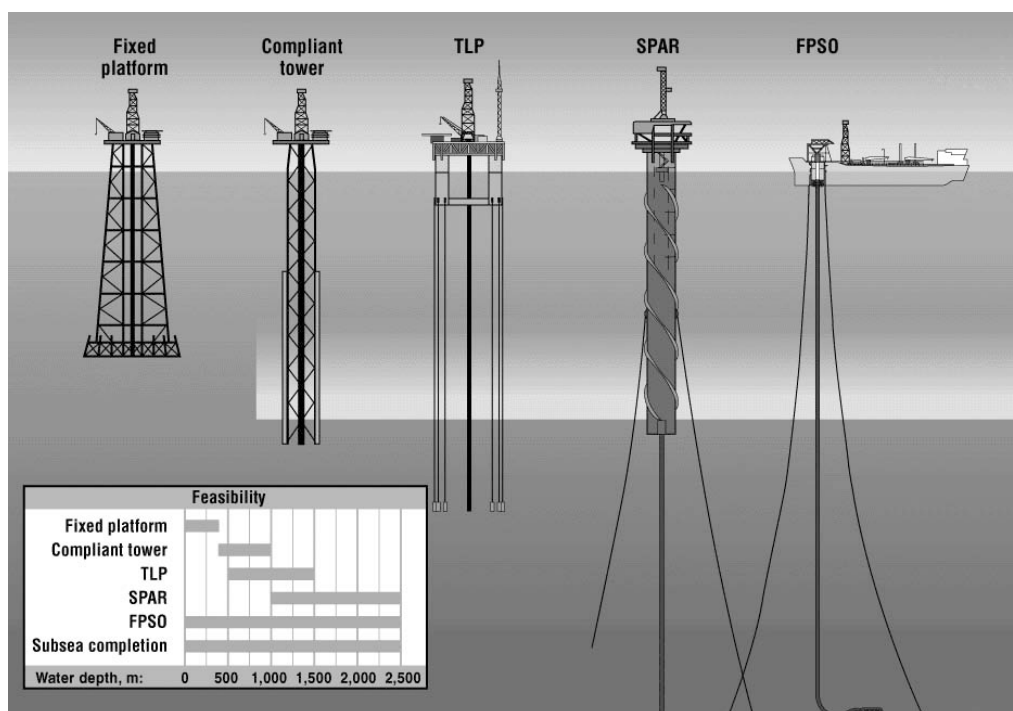


図2 主な大水深海洋生産システムとおおよその稼働水深（文献2）より引用）

て海底面から垂直に係留します。スパーは円筒状の浮体上に掘削・生産設備を備えたプラットフォームです。「SPAR」と大文字で表記されることも多いのですが、TLPのような略語ではなく円筒状のという意味の単語です。FPSはセミサブリグに生産設備を搭載して改造されることが多く、アンカーで係留されます。FPSOは、タンカーを改造して建造されることも多く、原油の貯蔵とシャトルタンカーへの出荷が可能なシステムです。

1.3 海洋掘削の方法

海洋での坑井掘削に用いられる方法は、陸上での掘削と同じくロータリー掘削ですが、海底面に掘削装置を置いて掘削するわけではありません。海上に設置あるいは浮遊する掘削装置から海底に向けてドリルビットや掘管などの掘削編成を降下し、海底面下の地層を掘削していきます。

ロータリー掘削では坑井内に泥水を循環することによって安全に坑井を掘削することができますが、海上の掘削リグと坑口のある海底面との間には海水しか存在しません。そこで、陸上での掘削と同様に泥水循環を行うためには、海

底面と掘削リグの間をマリンライザーと呼ばれる立ち上げ管で接続し、海水中に坑井が続いているかのような仕組みを作り出して掘削します。このようにマリンライザーを用いた掘削方法をライザー掘削と呼び、ライザーを用いない方法をライザーレス掘削と呼びます（図3）。

マリンライザーを用いた一般的な海洋掘削では、海底面の坑口にライザー管の先端を接続するまでは、ライザーレスで掘削します。手順は以下のとおりです（図4）。

- (1) テンポラリーガイドベースを掘管の先に取り付けて降下し、掘削地点の海底面上に設置する（以降の作業は、リグとガイドベースを結ぶガイドラインとよばれる4本のワイヤーロープを案内にして機器の降下を行う）
- (2) ガイドラインを利用してビットを降下し、36インチ坑を掘削する
- (3) パーマネントガイドストラクチャを上部に取り付けた30インチケーシングを掘管を用いて降下し、セメンチングする
- (4) 26インチ径のビットでさらに200～300m程度掘削する
- (5) ウェルヘッドハウジングを上部に取り付け

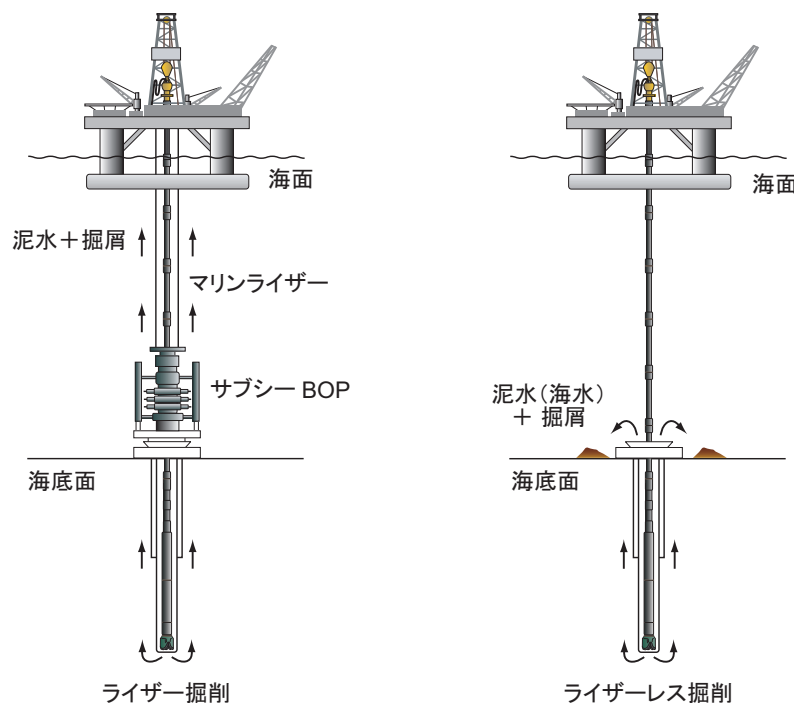


図3 ライザー掘削とライザーレス掘削

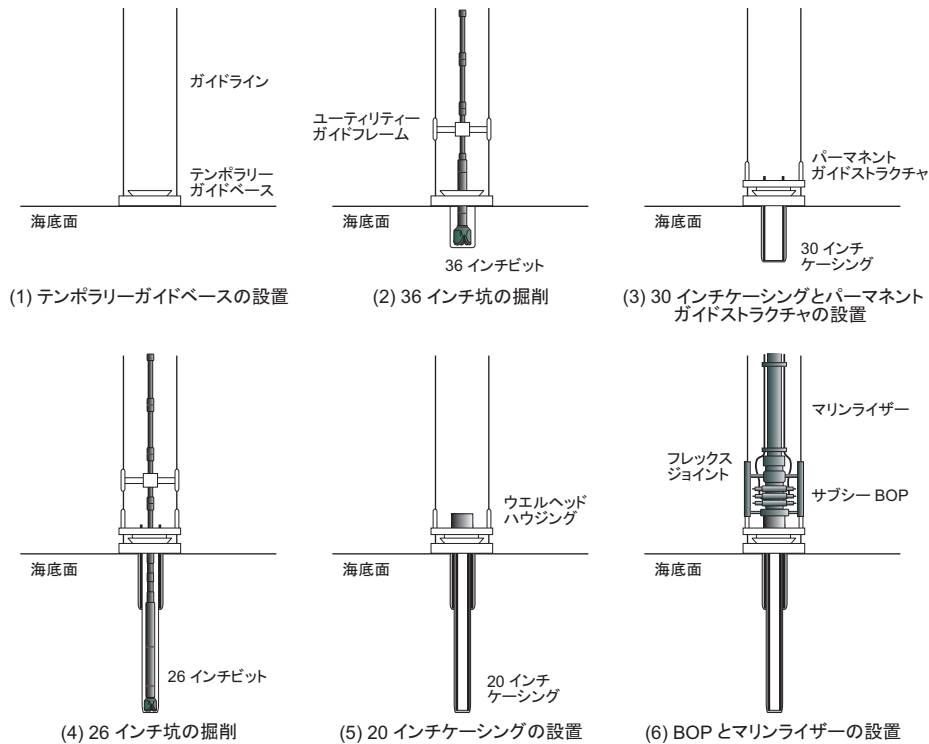


図4 一般的な海洋掘削の手順

た 20 インチケーシングを降下し、セメンチングする

(6) BOP を先端に取り付けたライザー管を降下し、ウエルヘッドハウジングに接続する
 こうして BOP とライザーを坑口に接続した後は、完全な泥水循環と掘屑の回収が可能となります。また、鋼管類や各種機器はライザー管の内部を通して坑井内に降下します。

浮遊式掘削装置では、掘削作業中の船体の動揺によって、リグの坑口に対する位置が常に変動します。図5に示すように、海洋掘削リグにはこれを補正するための各種機構および装置が備えられています。ライザーテンショナーおよびガイドラインテンショナーはそれぞれライザーおよびガイドラインを必要な張力で牽引しておくための装置です。ライザー管の下端はフレキシブルジョイントで、上端はスリップジョイント(あるいはテレスコピックジョイント)で接続され、横方向や上下方向の変位に対応します。船体の動揺によるビット荷重の変動を抑えるために、ドリルストリングを吊り下げるフックおよび滑車部分にモーションコンペンセーターと

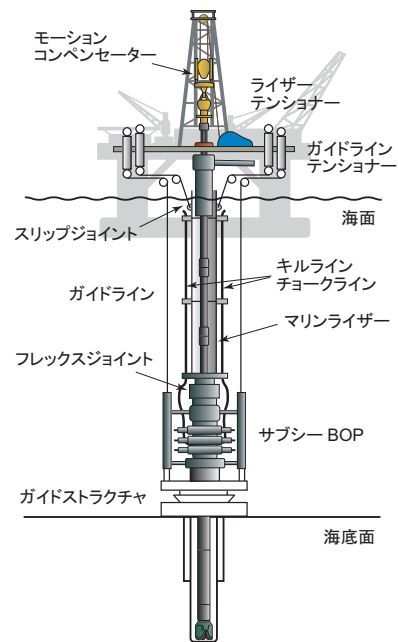


図5 掘削リグの動揺を補正する機構
 呼ばれる装置が組み込まれます。

2. 大水深掘削の記録

何 m 以上の水深を大水深と呼ぶかには、200 m や 1,000 ft、1,500 ft などいろいろな定義があり

ます。米国内務省鉱物資源局 (MMS, Minerals Management Service) のメキシコ湾の大水深開発に関する報告書³⁾では、1,000 ft 以上を大水深 (deepwater)、5,000 ft 以上を超大水深 (ultra-deepwater) と定義しています。この定義が一般によく用いられるようです。

現在の大水深掘削の記録を表1に示します。石油・天然ガスの探鉱・開発を目的とした大水深掘削の記録は、1998年までの10年あまり2,300 m前後で横ばいであったのが、その後大きく記録を伸ばし、2003年には水深10,000 ft、3,000 mを超えました。DPSを備えたドリルシップによる記録です。アンカー係留による記録も更新され、水深2,800 mに達しています。プリセット係留というのは、掘削リグの到着前にあらかじめアンカーおよび係留索をワークボートにより海底に設置しておく方法です。従来方式アンカー係留でも、2,300 mを超える記録更新がOffshore誌のオンライン版(2006年8月31日付け)に報告されています。これらの記録はすべて米国メキシコ湾でのものです。

いわゆる科学掘削では、1968年から開始された深海掘削計画 (Deep Sea Drilling Project, DSDP)において、グローマーチャレンジャー号という掘削船によるマリアナ海溝での記録があります。ただし、石油の掘削のようなライザーを用いた掘削ではありません。

日本国内での大水深掘削の記録は、今のところ2004年に新潟県上越市沖合いで掘削された基礎試錐「佐渡南西沖」における水深971 mです。さらに最近では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

の地球深部探査船「ちきゅう」が、青森県八戸市の下北半島東方沖100 kmの水深約1,180 mの地点において石油坑井掘削と同じライザー掘削による試験掘削を行いました。JAMSTECのプレス発表によると、本稿を執筆している時点では、海底下647 m掘削中にリグ上の廃泥水処理装置の不具合およびそれに続く低気圧の通過によって掘削を中断したまま掘削試験終了となったようです。したがって正確な水深は分かりませんが、これらの発表によれば国内での大水深掘削記録が更新されたこととなります。

3. MPDとデュアルグラディエント掘削

3.1 海洋掘削における地層圧力の特徴

現在の大水深掘削記録がいずれもここ数年の間に更新されていることから、大水深掘削のための技術開発が精力的に進められていることが分かります。大水深掘削には、陸上での大深度掘削とは違った特有の技術課題が存在します。

石油・天然ガス坑井のロータリー掘削では、坑井内の圧力が地層圧より大きく地層の破壊圧より小さくなるように比重を調節した泥水を循環させることによって、安全に掘削を行うことができます。さらに、地下の圧力の状態に応じて前回説明したように必要なケーシングを設置していきます。

海面から海底面までの間には海水しか存在しないため、図6に示すように、見かけ上は海底面までは地層圧と地層破壊圧が等しく、海底面下の地層圧と地層破壊圧との差が小さいという特徴があります。地層圧と地層破壊圧との差が小さいと、ケーシングをより短い深度間隔ごとに

表1 大水深掘削記録

DPSによる掘削 (ドリルシップ)	10,011 ft (3,051 m)	2003年
プリセット係留による掘削 (セミサブ)	9,205 ft (2,805 m)	2005年
従来式アンカー係留による掘削 (セミサブ)	7,650 ft (2,332 m)	2006年
海底仕上げによる生産	7,570 ft (2,307 m)	2004年
浮遊式生産施設による生産	6,300 ft (1,920 m)	2003年
ライザーレス掘削 (科学掘削)	23,088 ft (7,037 m)	1978年

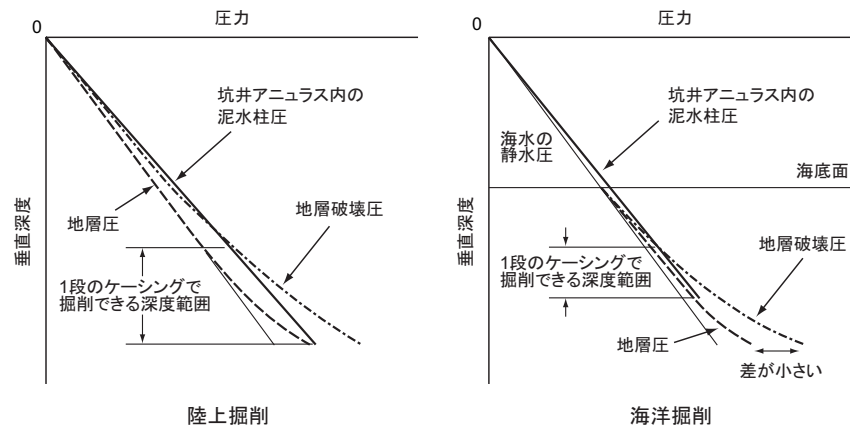


図6 海洋掘削における地層圧力の特徴

設置しなければならず、より多くのケーシングが必要になります。しかし、掘削手順の項で見たように、サブシー BOP を設置した後はこのとき設置したウエルヘッドハウジング内にケーシングを追加していくので、必然的に設置できるケーシングの数には制限があります。

ケーシング数を減らすための有効な手段の一つとして期待されているものに、前回紹介したエクスパンドブルチューブラー技術があります。そして今回は、掘削中の坑井内の圧力を制御することによってこの大水深掘削における問題を解決する手法である MPD について解説します。

3.2 MPD とは？

MPD (Managed Pressure Drilling) は、いまのところ適切な日本語が存在せず、そのままマネージドプレッシャードリリングなどと呼んでいます。文字通り、圧力を管理(制御)しながら掘削する方法の総称です。前回紹介したアンダーバランス掘削と同様に、坑井を密閉した状態で掘管を回転することのできる坑口装置 (Rotating Control Device, RCD) を用いて泥水循環経路が閉回路になるようにし、坑井内の圧力を制御しながら掘削します。したがってアンダーバランス掘削も MPD の一種と考えることもありますが、一般的な MPD の定義は地層流体が坑井内へ流入しないように圧力を制御するというものであり、この点でアンダーバランス掘削とは区別されます。

海洋掘削における地層圧力の問題を解決するためにこの MPD が有効です。MPD にはいろいろなバリエーションが考えられますが、おもに以下のようなものがあります⁴⁾。

- 一定坑底圧法 (constant bottomhole pressure, CBHP)
- 加圧マッドキャップ掘削 (pressurized mud cap drilling, PMCD)
- デュアルグラディエント掘削 (dual gradient drilling, DGD)

一定坑底圧法は、坑底における坑井内の圧力 (坑底圧, bottomhole pressure) が一定になるように制御しながら掘削する方法です。前回図解したように、泥水の循環を停止しているときは坑井内の圧力は泥水柱圧 (静水圧) に等しく、循環を行うと流動による坑壁や掘管との間の摩擦圧力損失が加わります。泥水を循環すると坑底圧が増加し、地層圧と地層破壊圧との差が非常に小さい場合には逸泥などのトラブルが発生する危険があります。

掘削装置には、BOP を閉めた状態で背圧をかけながら泥水を排出するためのチョークライン、逆に坑井内に泥水を送り込むためのキルラインと呼ばれる抑圧作業を行うための泥水ラインが備わっています。通常より比重の小さい泥水を用い、循環中はチョークを開放し、循環停止中はチョークを絞って (閉めて) 背圧をかけてやることによって、図 7 (a) のように泥水循環時と静止時で坑底圧を同じに保ちます。このように坑底の圧力が変動しないように制御するこ

とで、地層圧と地層破壊圧との差の小さい層を安全に掘削する方法がCBHPです。

マッドキャップ掘削は、もともとは主としてH₂S等の有毒物質の産出が懸念される場合に安全に掘削作業を行うために使用された技術です。全量逸泥が発生するような枯渇層や逸泥層を掘削する場合には、高価な泥水を無駄に消費したり、より多くのケーシングが必要となり大きな損失につながります。そこで、海水のような低比重の泥水をポンプしながら掘削し、一方で、地上からは坑井アニュラス内に高比重の泥水を送り込んでふた(mud cap)の役割をさせ、図7(b)のような圧力プロファイルを実現します。すると、低比重泥水は地上に戻ってくることなく全量が逸泥して失われますが、海水のような安価な泥水を用いるために損失は小さくて済みます。低比重の泥水を用いるため、アンダーバランス掘削での利点と同様な掘進率の向上や掘管の抑留といったトラブルの回避も期待できます。

以上のMPDは海洋掘削に限定された技術ではありませんが、海洋掘削におけるシビアな坑内圧力管理に適用することが可能です。

3.3 デュアルグラディエント掘削

MPDのもう一つのバリエーションであるデュアルグラディエント掘削は、デュアルデンシティ掘削(dual density drilling)やサブシーマッドリフト掘削(subsea mudlift drilling, SMD)と

呼ばれることもあります。図8に示すように、2種類の比重(圧力勾配)の泥水を用いて、あたかも海底の坑口直上に掘削装置が設置されているかのような圧力プロファイルを実現する掘削方法です。2つの比重の泥水を用いる点ではマッドキャップ掘削に似ていますが、目的や坑井内の圧力分布が異なります。

デュアルグラディエントを実現する方法にはガスリフトなどいくつかの方法が考えられていますが、ここでは海底ポンプを用いたサブシーマッドリフト方式を紹介します。

SMDの仕組みは、RCDのように坑井を密閉して掘管を回転でき、なおかつ泥水の流路を切り替えることのできるローテティングダイバータを用い、坑井から戻ってきた泥水を海底面からライザーではない別のパイプを通してリグまで運び上げます。ライザー内には泥水の代わりに海水を満たしておきます。

SMDは1990年代半ばに多数の企業が参加した共同プロジェクトが立ち上げられ、研究開発が行われました⁵⁾。当初は、ライザー下部に組み込み可能な電気油圧式海底ポンプ(electro-hydraulic subsea pump)システムの開発が行われました。しかし、電力ケーブルや海底の油圧システムなどの長期的な耐久性の問題のために、海水を海上からポンプして駆動する海底泥水ポンプ(seawater driven mudlift pump)が新たに開発されました。2001年にはフィールドでの実証実験が行われましたが、一定の成功を

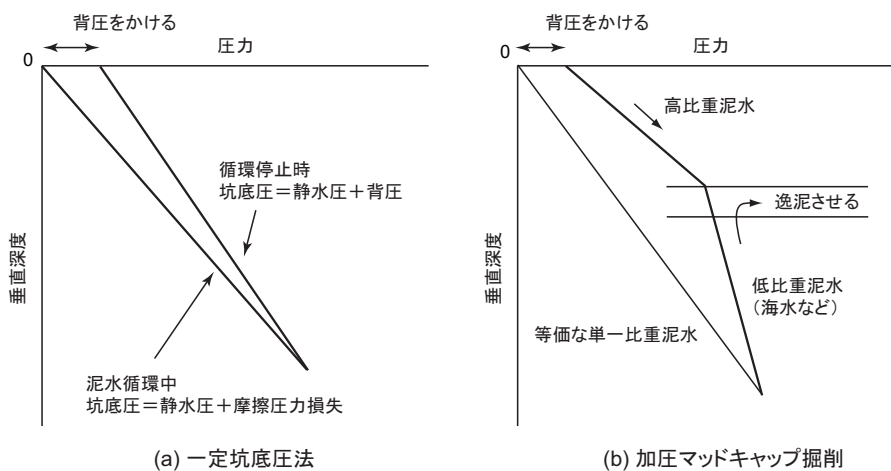


図7 MPDのバリエーション

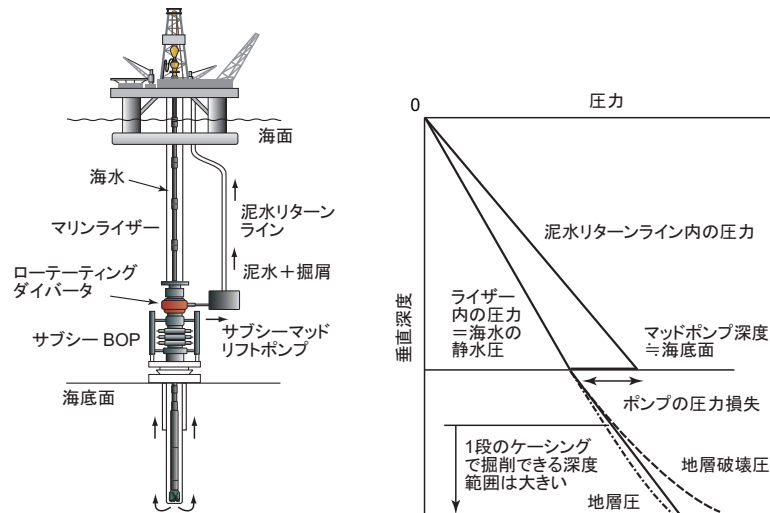


図8 デュアルグラディエント掘削

収めたもののコストや機器の信頼性などの課題が残り、あまり商業的には普及していません。

しかし、浅層での坑壁の安定性に問題がある場合などに泥水循環ができるシステムとして、DGDのバリエーションであるライザーレスでのデュアルグラディエント掘削の研究開発も行われています⁶⁾。このシステムは、ライザーレスで掘削するために泥水の循環ができない20インチケーシングを設置するまでのいわゆるトップホールの掘削に用いられます。

文献

- 1) 梅津 覚・古谷昭人・市川祐一郎, 2006: 掘削分野の技術革新 水深3,000mを克服. 石油・天然ガスレビュー, 第40巻, 第5号, pp. 47-61.
- 2) Bourgeois, T. M., Godfrey, D. G. and Bailey, M. J., 1998: Race on for Deep-water Acreage, 3,500-Meter Depth Capability. *Offshore*, Vol. 58, No. 10, pp. 40-41, 152, 156.
- 3) French, L., Richardson, G. E., Kazanis, E. G., Montgomery, T. M., Bohannon, C. M. and Gravois, M. P., 2006: *Deepwater Gulf of Mexico 2006: America's Ex-*

panding Frontier, U.S. Department of the Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, OCS Report MMS 2006-022.

- 4) Hannegan, D. M., 2006: Variation of Managed-Pressure Drilling Currently Practiced: Offshore Case Studies. paper OTC 17885 presented at the Offshore Technology Conference, May 1-4, Houston, Texas.
- 5) Smith, K. L., Gault, A. D., Witt, D. E. and Weddle, C. E., 2001: Subsea Mudlift Drilling Joint Industry Project: Delivering Dual Gradient Drilling. paper SPE 71357 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, September 30-October 3, New Orleans, Louisiana.
- 6) Stave, R., Farestveit, R., Høyland, S., Rochmann, P. O. and Rolland, N. L., 2005: Demonstration and Qualification of a Riserless Dual Gradient System. paper OTC 17665 presented at the Offshore Technology Conference, May 2-5, Houston, Texas.