

石油掘削技術の現状

東京大学工学部 田 中 彰 一

1. まえがき

石油の開発を目的とした坑井の掘削は1859年にドレイクが米国ペンシルベニア州タイタスビルで成功したのが嚆矢とされている。この坑井の深度は21.2mで、綱掘方式が用いられた。ロータリ方式の能力が認められるきっかけは1901年にルーカスが米国テキサス州スピンドルトップで成功したことである。この坑井の深度については諸説があるが、311mといわれている。ロータリ方式が主流になったのは1927年以後であり、それまでは綱掘方式が掘削深度記録を保持していた。掘削技術の現状の一端として掘削記録を日本国内及び海外について以下に記す。

陸上における掘削

日本：坑井深度 桜町SK-1（新潟県）5,301m
（1983年）

米国：試掘深度 Bertha Rogers 1（オクラホマ州）9,583m（1974年）

採油深度（ルイジアナ州）6,542m
（1956年）

採ガス深度（テキサス州）8,083m
（1977年）

ソ連：地質調査井 SG-3（コラ半島）11.8km
（1983年末）目標深度 15km

海洋における掘削

日本：基礎試錐 御前崎沖 水深469m、掘削深度3,505.5m（1984年）、半潜車型掘削装置使用

フランス：地中海 水深1,714m、掘削深度3,606m（1983年）、掘削船使用

米国：ニュージャージー州沖 水深2,119m、掘削深度3,545m（1984年）、掘削船使用

2. 掘削用機器

掘削装置の概要を図1に示しますが、これは次の機能を果たす機器を組合わせたものである。

重量物の昇降：櫓、ドローワークス、クラウンブロック、トラベリングブロック

掘進：ロータリテーブル、スイベル、ケリー、掘管、ドリルカラー、ビット

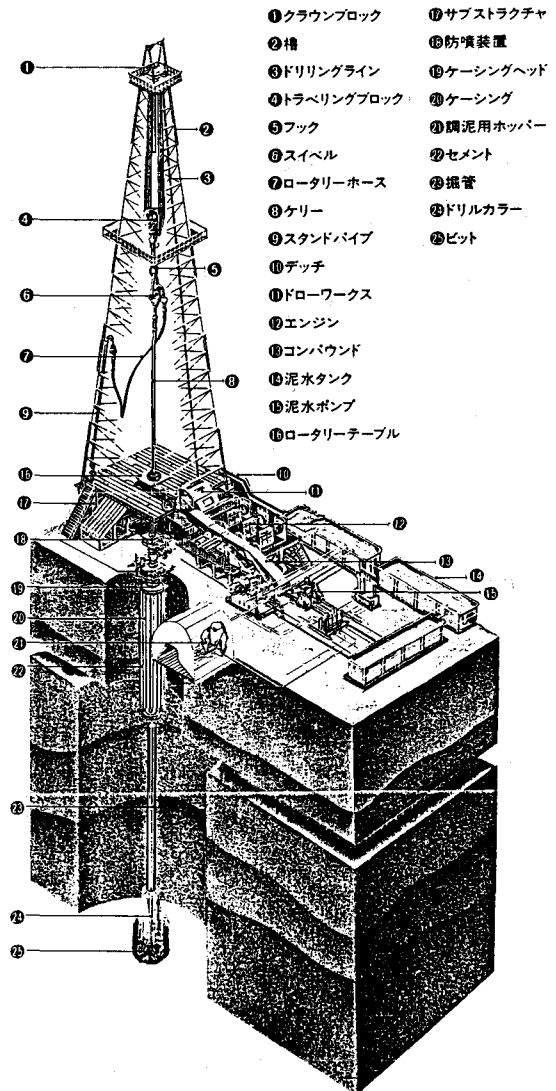


図1 掘削装置の概要²⁾

泥水循環：ポンプ、タンク、デッチ、調泥装置

噴出防止：防噴装置

坑井維持：ケーシング

原動機としては図1に示す内燃機関の他に電動機も用いられる。現場で交流発電を行ない、サイリスタで直流交換し、直流モータを用いる装置が多くなっている。櫓としては図1に示す組み上げ方式の標準櫓に替わって、図2の可搬式マストが用いられるようになってきている。

掘進のさいの坑井内の機器について主なものを説明する。ビットとしてはスリーコンローラービットが主力であるが、ダイヤモンドビットやPDCビットも使われている(図3参照)。

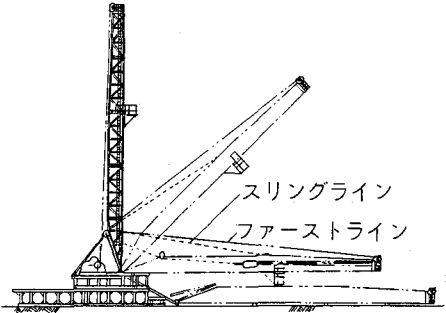


図2 可搬式マストの組立て¹⁾

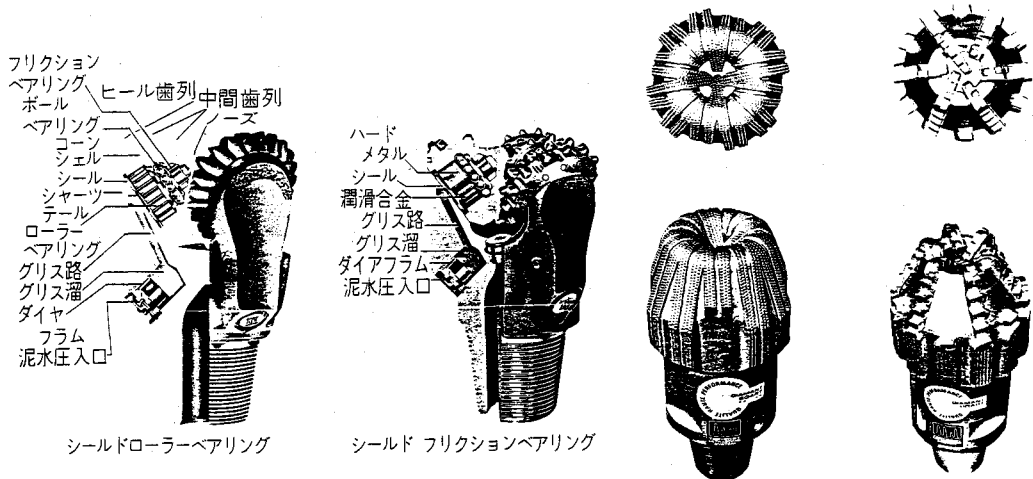


図3 掘削用ビットの例 左より鋼歯ビット、タングステンカーバイトチップインサートビット、ダイヤモンドビット、PDCビット

各型式のビットにおいて適用地質により形状に工夫を施しているが、スリーコンローラービットの掘削作用と歯先設計方針を表1に示す。

ビットの上にはドリルカラー、肉厚掘管、掘管の順に接続される。掘削に必要な推力であるビット荷重はドリルカラーの重量の8割あるいはそれ以下になるように調節される。ドリルカラーの下部は圧縮状態、上部及び掘管は引張状態に置くことが原則である。ドリルカラーには中間にスタビライザーを接続する(図4参照)。スタビライザーの位置と個数により、現在の坑井傾斜角度を維持する(沿角)、増加させる(増角)、あるいは減少させる(減角)の調節を行なうことができる。

ビットを回転させる方法としては地表で行なうものと坑底で行なうものとに大別される。地表で回転を行なう方法としてはケリーとロータリーテーブルを用いる通常

表1 ビットタイプと歯先設計方針¹⁾

鋼 歯 ビ ャ ッ ト					
ビットコード シリーズNo.	適 応 地 質	設 計		作 用	
		歯間隔	歯 高	ゲージ打	つねじる
1	圧縮強さが低く、高掘進性地質 軟頁岩、粘土、軟砂岩	■	■	■	■
2	中硬性地質 硬頁岩、砂岩、石灰岩	■	■	■	■
3	硬質で研磨性地質 硬砂岩、珪質石灰岩、花崗岩	■	■	■	■
チ ッ プ イ ン サ ー ト ビ ャ ッ ト					
ビットコード シリーズNo.	適 応 地 質	設 計		作 用	
		チップ サイズ	チップ間 隔	チップ打	つねじる
5	シリーズNo.1相当 頁岩、粘土、砂岩、軟石灰岩	■	■	■	■
6	シリーズNo.2相当 石灰岩、砂岩、ドロマイト、硬頁岩	■	■	■	■
7	シリーズNo.3相当 石灰岩、ドロマイト、珪岩、砂質頁岩	■	■	■	■
8	超硬質・高研磨性地質 石英岩、石英質砂岩、タコナイト	■	■	■	■

の方法（図5参照）の他に、最近はスイベルにモータを組み込んだパワー
スイベル（図6参照）も開発されている。坑底で回転を与えるのには泥水
モータが用いられるが、タービン型と容積型とある（図7参照）。容積型モ
ータは内面が捻れたステータの中の捻れた軸を泥水で強制的に回転さすも
のであるが、泥水の通路が1個のものが通常用いられるが、通路が複数あ
る低回転速度、高トルクのものも使用され始めている。

国内で使用されている6,000m級掘削装置の例として1320-Mの主要機
器の配置を図8に示す。櫓の高さは43m、トラベリングブロックの懸垂容
量は500tであり、外径127mm掘管を用いて約6,000m掘削できる。所要
全動力は約5,000HP、全敷地面積は約7,000m²である。

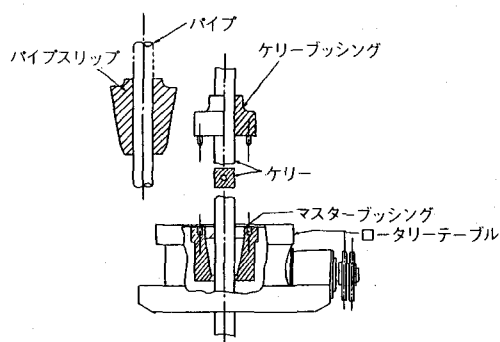


図5 ロータリーテーブル¹⁾

3. 掘削計画と掘削障害

坑井の掘削は大径のビットである深度まで掘削して
ケーシングを降下し、ケーシングの外周をセメントで
固める。次にケーシングの内径を通過できるビットで
掘削し、ケーシングを設置する。この繰返しで掘削を
行なう。掘削計画の例を図9に示す。浅い深度に設置
されるケーシングは淡水層の保護を目的としている。
掘削にさいしては地質条件により、異常高圧層、逸水、
崩壊などの障害が発生する。これらの障害の克服は泥
水の性質の調節により行なえるかどうかをまず検討し、
次にケーシングにより障害箇所を被覆することを考え
る。地中の状態は地表地質調査、物理探査、隣接井が
ある場合はそのデータを参考にして予想する。坑井を
掘削する目的は石油を採取することにあるから、油層
部分に設置されるケーシングの寸法の検討より掘削計
画の立案は始められる。坑底より地表に向けて計画は検討され、坑井内に降下されるケーシングの最大重量によ
り、掘削装置が選択される。

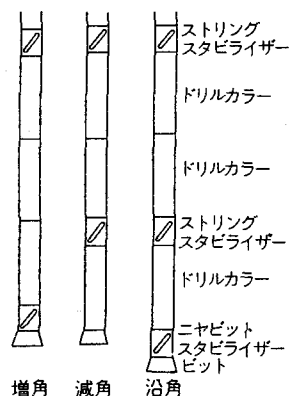


図4 掘進編成の例¹⁾

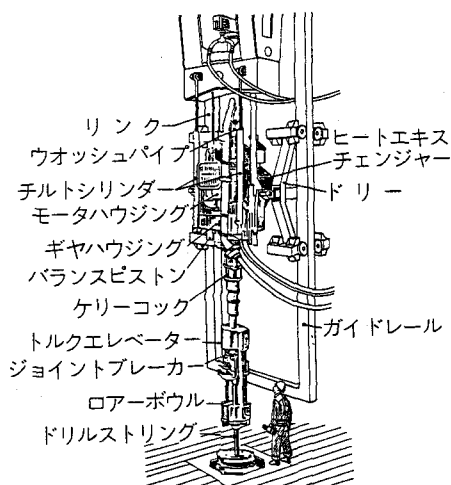


図6 パワースイベル¹⁾

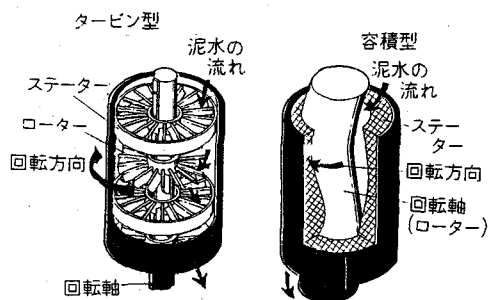


図7 坑底駆動泥水モータ¹⁾

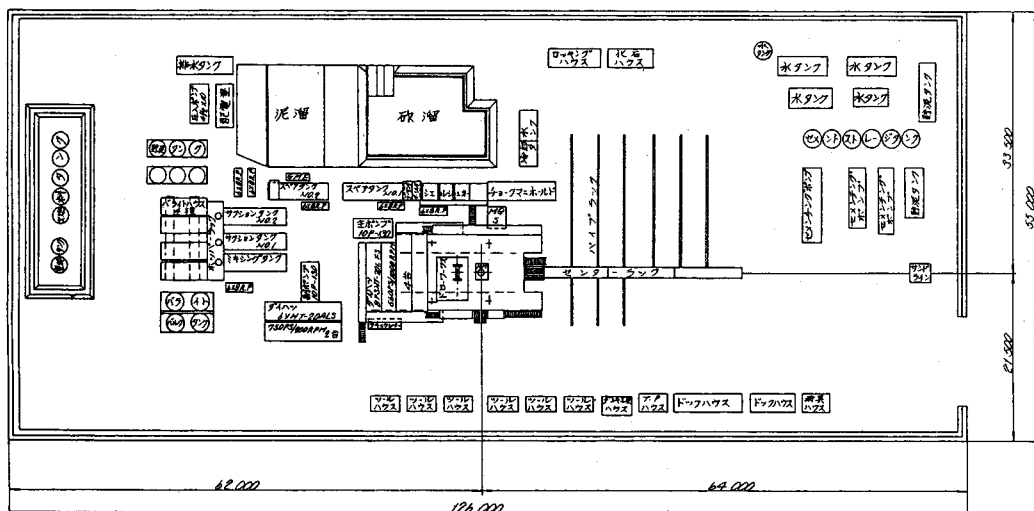


図8 6,000 m 級掘削装置「1320-M」主要機器配置¹⁾

地層内の流体の持つ圧力を地層圧力という。地表から対象深度までの静水圧力に相当する地層圧力を持つ地層を正常圧層、それより低いものを低圧層、それより高いものを異常高圧層という。異常高圧層は地層の堆積後の圧密過程が非排水の状態により行なわれたことが原因の一つに考えられている。従って、正常圧層に比べ孔隙率大きい、比抵抗が小さい、弾性波の速度が小さい、密度が

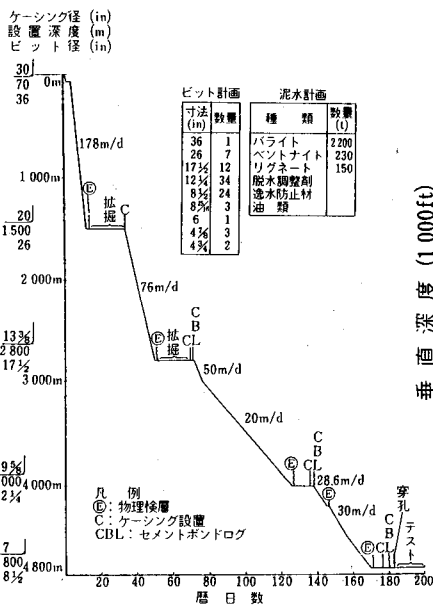


図9 掘削計画の例¹⁾

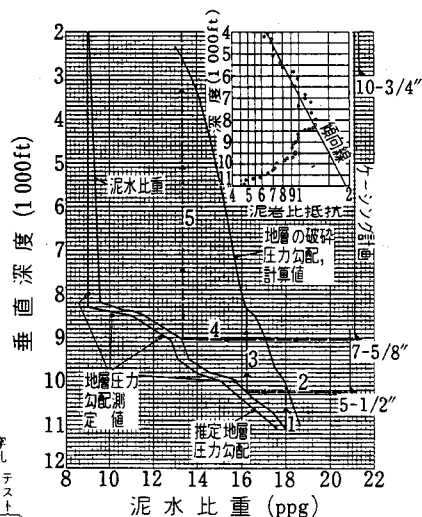


図10 異常高圧層地域のケーシングの設置深度の決定法³⁾

小さいなどの特長を持っている。地層を構成している岩石粒子にかかる応力は対象深度より上部にある地層による累積荷重より地層圧力を引いたものに等しいと考える。従って正常圧層に比べて異常高圧層は機械的強さが小さく、掘進率が大きくなる。異常高圧層の検知はこれらの特性を利用し、掘削計画の段階では物理探査の地層速度解析より予想する。掘削中は関連あるデータを継続して測定し、事前に検知を行なう。必要あれば掘削を中断し、地層圧力の測定や物理検層を行ない、定量的に評価する。泥水による坑井内の圧力が地層圧力より低いと地層流体の坑井内への流入を起こし、処置を誤ると制御不能の暴噴になる。泥水による圧力が地層の破碎圧力より大きくなると地層に割れ目を作ってしまう。泥水の密度は図10に示すように泥水圧力が地層圧力より幾分大きく、地層の破碎圧力より小さくなるように維持される。図10では11,000ftの掘止め深度の掘削には18ppg (2.16g/cm³)の泥水を使用する必要があるが、この密度の泥水を使用すると深度10,000ftより浅い地層は破碎される危険性があり、ケー

シングを10,200ftに設置する必要があることを示しています。同様に、数字1から順に地表に向かって計画を進めていきます。掘削計画をたてるさい地層圧力と地層の破碎圧力の推定が基本になります。図11は異常高圧層検知の方法の例です。地層圧力を推定するEatonの方法を紹介する。

$$P_t/D = (S/D) - \{(S/D) - (P_t/D)_n\} (d_{c0}/d_{cn})^{1.2}$$

$$P_t/D = (S/D) - \{(S/D) - (P_t/D)_n\} (R_0/R_n)^{1.2}$$

$$P_t/D = (S/D) - \{(S/D) - (P_t/D)_n\} (\Delta t_n/\Delta t_0)^{3.0}$$

ここで、 P_t/D ：対象層の地層圧力勾配、 S/D ：累積荷重勾配、 R ：泥岩の比抵抗、 d_c ：掘進率の指数、 Δt ：泥岩の音波走行時間、添字 n ：傾向線上の値、添字 0 ：測定値（図10参照）。 d_c は掘進率を次の式で表わしたさいの指数 d に泥水密度等の補正を加えたものである。

$$R_p = K W^d N$$

ここで、 R_p ：掘進率、 W ：ビット荷重、 N ：ビット回転速度、 K ：係数。地層の破碎圧力を推定するMatthews & Kellyの式を紹介する。

$$FPG = K_i \{(S/D) - (P_t/D)\} + (P_t/D)$$

ここで、 FPG ：地層の破碎圧力勾配、 K_i ：応力係数。

坑壁の不安定性により発生する障害としては上記の破碎の他に坑径拡大、坑径づまり、崩壊がある（図12と13参照）。坑径拡大は崩壊によって発生する他に泥水の流れの状態が乱流になり洗われることにより、あるいは掘管によりはたかれて発生する。坑径づまりは岩石の塑性流動による。坑井を掘ったことにより応力状態が変化することも坑壁の不安定性の原因の一つであるが、岩石と泥水との反応も主要な原因である。浸透性の地層の坑壁面には泥水中のベントナイトが氾過されて泥壁ができ、崩れてくるのを防止する。地層にかかる応力により崩れてくるものは泥水密度を上げてある程度支えることができる。地層水には各種イオンが溶けており、粘土鉱物との間に化学的平衡を保っていると考えられる。地層水と同一の化学的性質を泥水の氾過水が持っておれば粘土鉱物の安定性を乱すことは起こらない。氾過水のイオン濃度が低いと粘土鉱物は膨潤し、地層が崩れやすくなる。

モンモリロナイトやイライトが多いと特にその傾向が大きい。膨潤を防ぐため水系泥水ではカリウムイオンを泥水に添加することがよくある。油エマルジョン泥水では高濃度の塩類を加え、粘土鉱物の水を吸い出す作用をさせている。油は粘土鉱物の粒子の間の微小な隙間には、水に比べて浸入しがたく、坑井内の泥水圧力と地層圧力の間の差圧力を維持しやすい特性もある。水系泥水の使用温度限界は180℃以下であり、それ以上では油系泥水

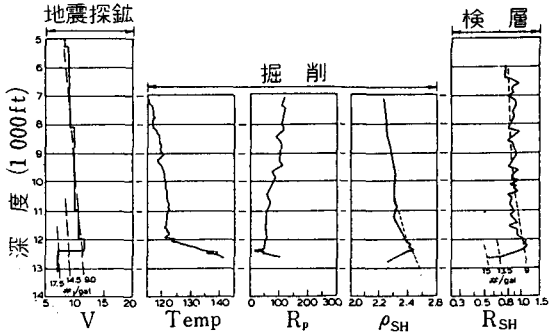


図11 異常高圧層の検知例⁴⁾

V ：弾性波速度、 T_{emp} ：泥水温度、 R_p ：掘進率、 ρ_{SH} ：泥岩密度、 R_{SH} ：泥岩比抵抗、深度12,000 ftより異常高圧層に入っている。

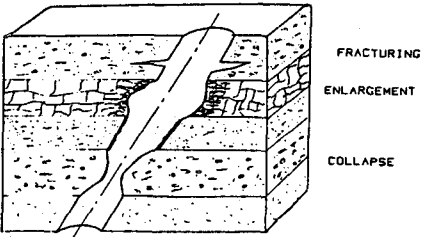


図12 坑壁の不安定性により発生する障害⁵⁾

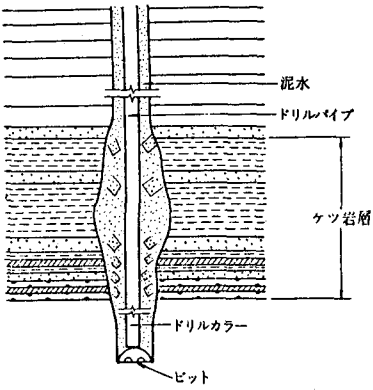


図13 坑壁の崩壊

を使用する必要がある。国内では環境問題の面で懸念があり油系泥水は使用されていない。

掘削障害のうち最も対策に困難なものは泥水が地層内に流出する逸水であり、大規模なものは坑井内の泥水液面が地表より数十メートル、時には数百メートル低下し、泥水循環が不可能になる。逸水の原因としては図14に示すものが考えられる。人為的に発生させる割れ目は泥水密度が高すぎること、ビットを急激に降下することなどで生じる。逸水を止めるには泥水密度を下げることに他各種逸水防止剤を用いる。割れ目に

に圧入する固形物としては粒状、繊維状、平盤状のものが用いられ、固結させるものとしてはセメント、水ガラスなどが用いられる。

泥水の化学的性質は地層の膨潤を対象に調節され、密度は地層圧力を主な対象として調節される。坑底における泥水圧力と地層圧力との差を差圧力というが、岩石の性質により、図15に示すように差圧力が大きくなると掘進率は低下する。岩石の機械的強さの増加も原因の一つであるが、主たるものは掘屑の除去が速やかに行なわれないことにある。掘屑が除去されるためには、掘屑上下面に働く圧力が等しくなることが必要である。差圧力が大きいと平衡するまでに時間がかかり、再破壊が発生する。この現象を緩和するために泥水の性質を調節し、ジェットビットが用いられる。

坑井内における測定は掘進を中断して行なわれていたが、掘進を継続しながら行なうMWD(Measurement White Drilling)技術が実用化の段階に達してきた。図16にその概要を示す。ビット直上にセンサを置き、即時にデータを地表に伝送

する。伝送方法としては表2に示す四方法に大別されるが、現在実用化されて

いるのは泥水圧力波を用いるものであり、電磁波によるものが現場テストされている。地表に伝送されるデータとしては次のものがある。坑井方位角度と傾斜角度、ビット荷重とトルク、泥水温度、地層比抵抗とガンマ線。図17

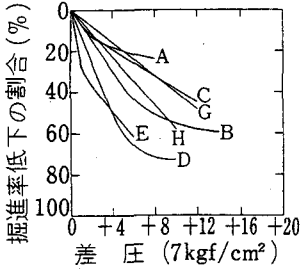
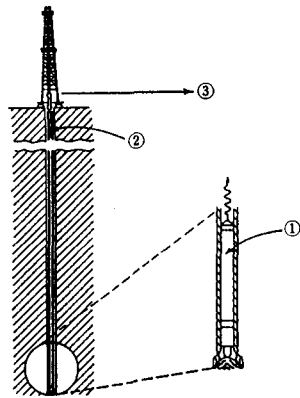


図15 掘進率に及ぼす差圧の影響⁷⁾



① 坑底計測器。構成要素：センサ、電子機器、符号化機器、送信器、電源
② 地表へ送られる信号
③ 受信器、信号処理器、表示器等

図16 MWDの概要⁸⁾

表2 MWDの開発活動状況⁹⁾

テレメトリ方式		従事会社数
音	波	8
電	磁	7
有	線	15
泥	水	15
水	圧	
圧	力	
波		

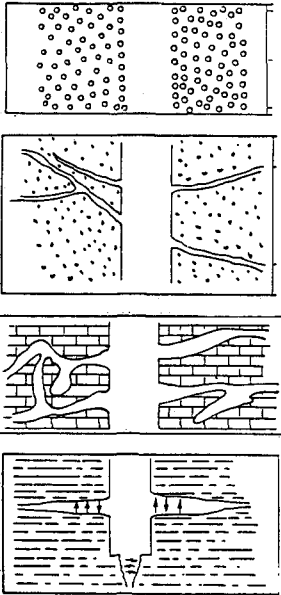


図14 逸水の原因⁶⁾

上図より未固結の浸透性の良い地層、自然に存在する割れ目、洞穴、人為的に発生させた割れ目

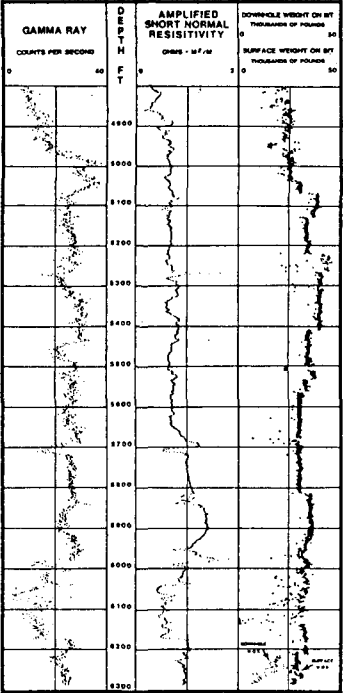


図17 泥水圧力波法による測定例⁹⁾

は測定例であるが、この場合には地層の性質は27秒ごとに、ビット荷重は54秒ごとに測定されている。この図の右欄には坑底で測定されたビット荷重と地表の荷重計によるものとが示されているが、図下部の矢印の深度で掘管が抑留気味になったことが検知されている。

4. 傾斜掘

傾斜掘の適用例を図18に示す。傾斜掘技術の現状は図19の破線の内側であるが、この限界を越える技術の開発が行なわれている。

図20は傾斜角を60°から80°に増加させることで、一つの掘削基地から対象にする面積が9倍以上に広がることを示している。

図20 高傾斜掘の利点¹⁰⁾

傾斜井のタイプは図21に示されている。地表からある深度まで掘り、傾斜を出し始めるが、この点をKOPという。傾斜を出すのに用いられる機器としては図22から図24に示すものが用いられる。バジャービット

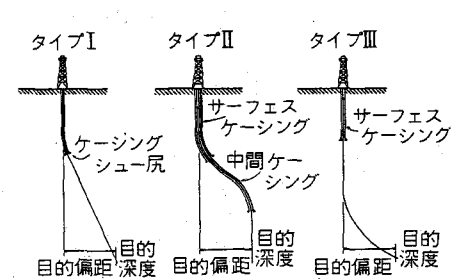


図21 傾斜井のタイプ¹⁾

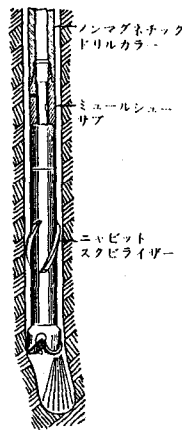


図22 バジャービット法¹¹⁾

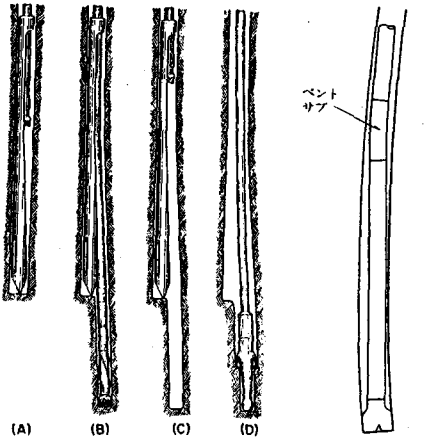


図23 ポイップストック法¹¹⁾

図24 泥水モータ法¹¹⁾

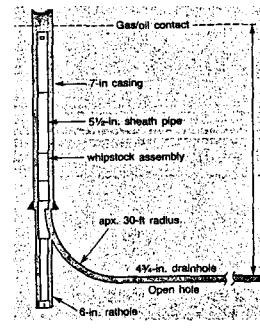


図25 ポイップストックを用いた水平掘¹²⁾

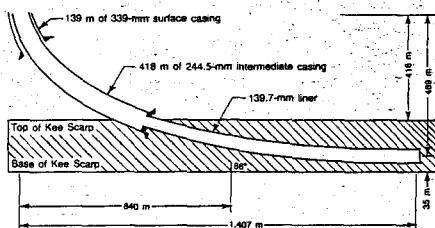


図26 カナダの水平掘の例¹³⁾

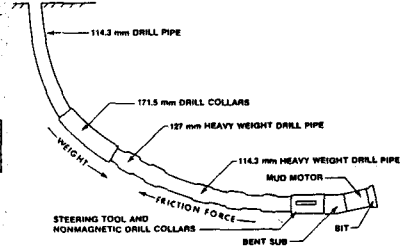


図27 泥水モータを用いた水平掘¹³⁾

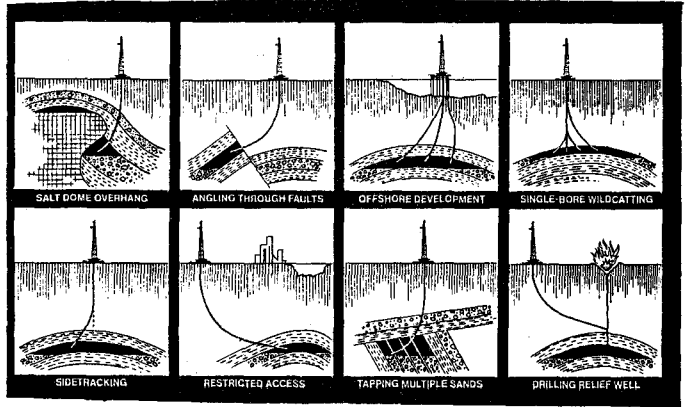


図18 傾斜掘の適用例

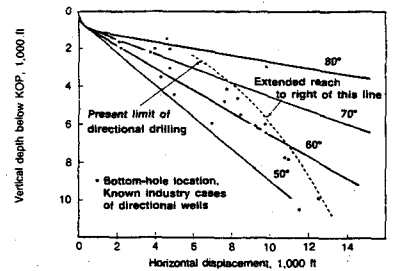


図19 傾斜掘の現状¹⁰⁾

は軟質層で用いられる。現在最もよく用いられているのが泥水モータとベントサブの組合わせである。ベントサブは上下のピンの軸の間に1〜3°の傾斜を付けた短管である。これらの機器である程度掘進し、坑跡が安定してくると図4に示した掘進編成、ビット荷重と回転速度を適宜選択しながら目的位置に向かって掘進する。掘進中の坑井の傾斜角度と方位角度の測定には前記のMWDも用いられるが、図28に示すステアリングツールも用いられる。ベントサブ直上の非磁性ドリルカラー内に測定器を設置し、ケーブルで地表に伝送する。

傾斜掘技術の応用として油層部を水平に数百メートル掘削することも行なわれている。図25は垂直井より特殊な掘管を用いて掘る方法を示す。図26は通常の傾斜掘機器を用いて掘られた例で、掘削時の編成の例を図27に示す。油層深度が浅い場合には槽自体を傾けたスラントリグも用いられる(図29)。

5. 海洋掘削

甲板昇降型掘削装置による掘削は陸上の掘削とほぼ同じであるので、浮遊式掘削装置を用いる場合について陸上の場合と異なる点のみ説明する。図30にガイドラインを用いる方式の手順を示す。海底にテンポラリーガイドベースを設置する。この中心より36inビットで数十メートル掘進する。この中に30inコンダクターパイプを降下し、セメントで外周を固める。このパイプの頭部にはパーマナントストラクチャーが付けられており、これは水平に設置される機構になっている。この内側を26inビットで掘進し、20inケーシングを設置する。この頭に海底設置BOPを付け、海面上までマリンライザー接続される。マリンライザーが付けられると陸上の場合と同様に泥水が使用される。それまでは海水を用いて掘削される。

海洋掘削では、海面から坑井深度を測るとすると、同一深度における累積荷重(岩圧)は海水の部分だけ、海洋の方が陸上の場合より小さくなり、地層の破碎圧力も小さくなる。図31に

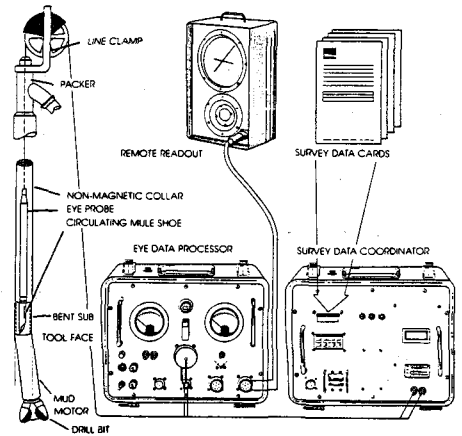


図28 ステアリングツール

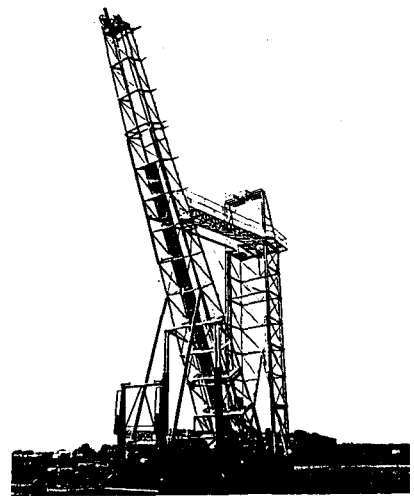


図29 スラントリグ

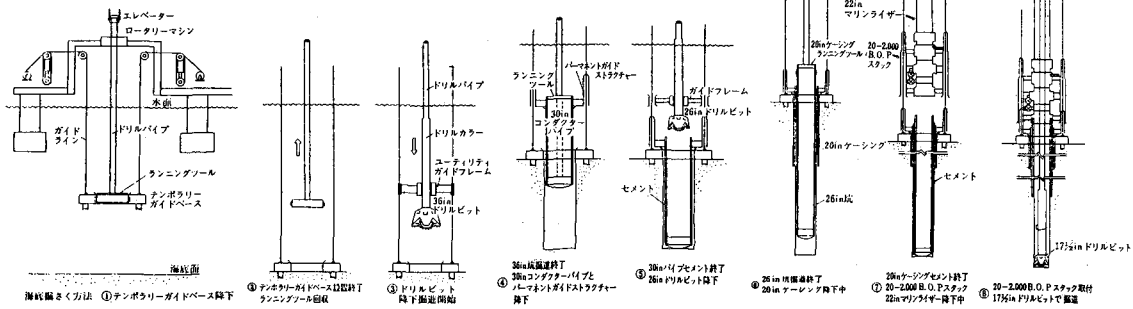


図30 海洋掘削の手順¹⁴⁾

御前崎沖水深470mにおける計画を示す。泥水は洋上の装置から循環されるから泥水の圧力は同じである。図31において、1,000mの深度において、泥水の圧力と岩圧力との差は陸上では101kgf/cm²であるが、海洋では半分以上の値である。20in ケーシングの設置深度の決定とそこまでの掘削計画は慎重に検討される。図32に同一坑井の地層圧力、地層の破砕圧力の推定、泥水密度とケーシング設置深度の計画を示す。

基本的な海洋掘削の機器構成を図33に示す。洋上の掘削装置は波、潮流、風の力により上下動及び側方への偏位を行なう。これらが発生しても坑底のビットは一定の荷重で掘削する

ようにせねばならない。上下動を補償するため、スイベルの上にモーションコンペンセータが付付けられる。マリンライザーを坐屈から保護するため、根元にフレックスジョイント、洋上には張力かけるライザーテンショナーが設備される。掘削を続行できる限界はフレックスジョイントの傾斜角度で4°、掘削装置の偏位で水深の4%といわれている(図34~36参照)。

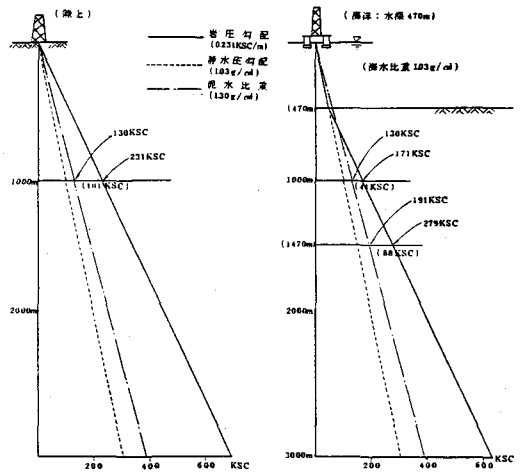


図31 御前崎沖水深 470 m における圧力分布の推定¹⁵⁾

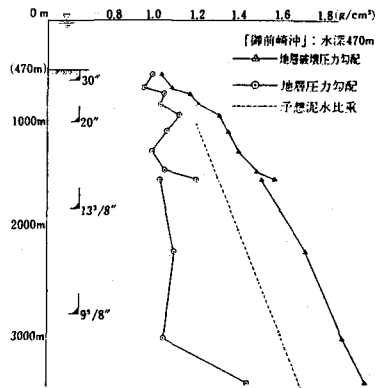


図32 御前崎沖水深 470 m における掘削計画¹⁵⁾

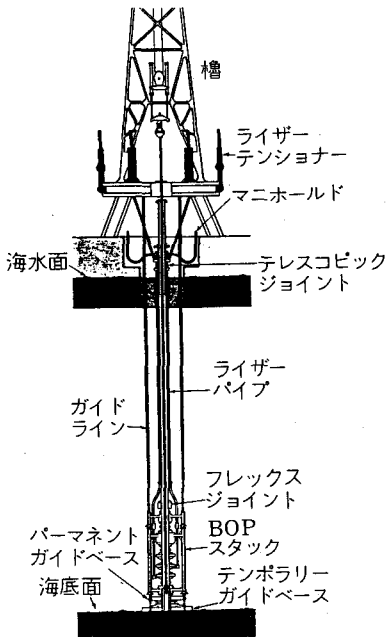


図33 ライザーシステム¹⁾

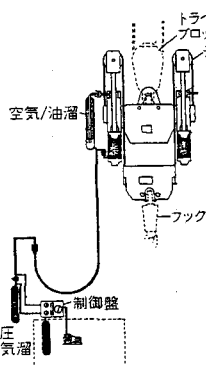


図34 モーションコンペンセータ¹⁾

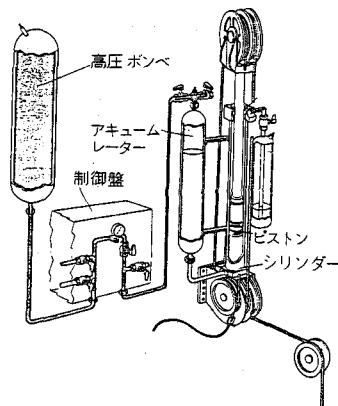


図35 ライザーテンショナー¹⁾



図36 フレックスジョイント¹⁾

参考文献

1. 石油技術協会編：石油鉱業便覧，1983
2. 石油鉱業連盟編：石油開発技術のしおり
3. Eaton, B. A. : World Oil, Vol. 171, No. 5, pp. 73—77, 1970
4. Fertl, W. : Abnormal Formation Pressures, Elsevier Scientific Publishing, 1976
5. Cheatham, Jr., J. B. : Journal of Petroleum Technology, June, 1984, pp. 889—896
6. Messenger, J. U. : Oil and Gas Journal, May 13, 1968, pp. 71—76
7. Vidrin, D. J. et al. : Journal of Petroleum Technology, Vol. 20, No. 7, pp. 676—682, 1968
8. Gearhart, M. et al. : Journal of Petroleum Technology, Dec., 1981, pp. 2301—2306
9. Bates, Jr., T. R. : 11th World Petroleum Congress, PD5(3), 1983
10. Dellinger, T. B. et al. : Oil and Gas Journal, Sept. 15, 1980, pp. 153—169
11. 藤原幸雄：石油の開発，Vol. 5, No. 6, 1972, pp. 55—71
12. Striegler, J. : Oil and Gas Journal, May 24, 1982, pp. 55—61
13. Baldwin, D. D. et al. : 11th World Petroleum Congress, PD5(2), 1983
14. 岸 浩一：石油学会誌，Vol. 15, No. 5, pp. 395—401, 1972
15. 板垣正信：石油技術協会誌，Vol. 48, No. 5, pp. 411—417, 1983