

3 探鉱から生産までの基礎技術

地質学的観点からは、海域と陸域の間で油ガス田の特性に本質的な差異はない。海域の油ガス田開発と陸域の油ガス田開発の違いは、一言で表せば「坑井および生産処理施設が海域にあるか陸域にあるか」の違いである。本章では、海域・陸域の油ガス田開発の双方に共通する基礎技術について解説する。

3.1 石油・天然ガス開発の概略

3.1.1 用語の定義

一般に、有用な物質・鉱物が経済的な採掘対象となる程度に集中的に存在している領域を鉱床 (deposit) と呼び、鉱床の存在箇所を探し出す活動を探鉱 (exploration) という。探鉱の結果、採算性のある油ガス田が発見されると、その後石油・ガスを採取する生産井 (production well) を掘削したり、必要な生産処理施設・積み出し施設などを建設したりする。この段階を開発 (development あるいは exploitation) という。あるいは、これに続く生産段階までを含めて広義の開発とする場合もある。開発段階に進むにあたっては、試掘 (exploratory drilling) で得られたデータを基に油層評価 (reservoir evaluation)、生産計画、掘削計画、施設計画などから成る油ガス田開発計画を作成し、その油ガス田の採算性を検討することが求められる。一方、生産 (production) とは、広義には油ガス層から坑井内に排出された原油または天然ガスを地表にもたらず作業を指す。生産の方法は、油・ガス層の圧力により地上に噴出してくる自噴と、坑井内に貯まった油をポンプやガスリフト (gas lift) により汲み上げる人工採油から成る一次採取、水やガスを圧入して油層にエネルギーを与えることで生産量を増加させる二次採取、および熱・化学反応・原油の性状の改変などによって生産量を増加させる三次採取に分類される。三次採取は増進回収法 (EOR : Enhanced Oil Recovery) とも呼ばれる。(3.6も参照)

3.1.2 探鉱から生産までの一般的な流れ

石油および天然ガス開発の一般的な流れを図 3.1.1 に示す。油ガス田の開発における最初の段階は、既存の情報を収集して行う対象地域の事前調査と、それに基づく鉱区権益の取得である。鉱区権益の取得にあたっては、鉱区入札ないし買収などにより、鉱業権を取得する必要がある。続いて、地質的・物理的手法による探鉱調査である。調査においては、リモートセンシング (remote sensing)、地質、地化学、物理探査 (geophysical exploration あるいは geophysical prospecting、地震探査、重磁力探査、電磁気探査がある) などが存在する。その後、試掘井・探掘井の掘削が行われ、油ガス層に当たっていれば、採算性の検討 (フィージビリティ・スタディ、F/S : Feasibility Study) が実施される。フィージビリティ・スタディの結果、採算性があるとみなされた油ガス田は、開発段階へ移行となり、生産井の掘削や生産設備の建設が行われる。その後、実際に油・ガスを出荷・販売する生産段階へと移行する。

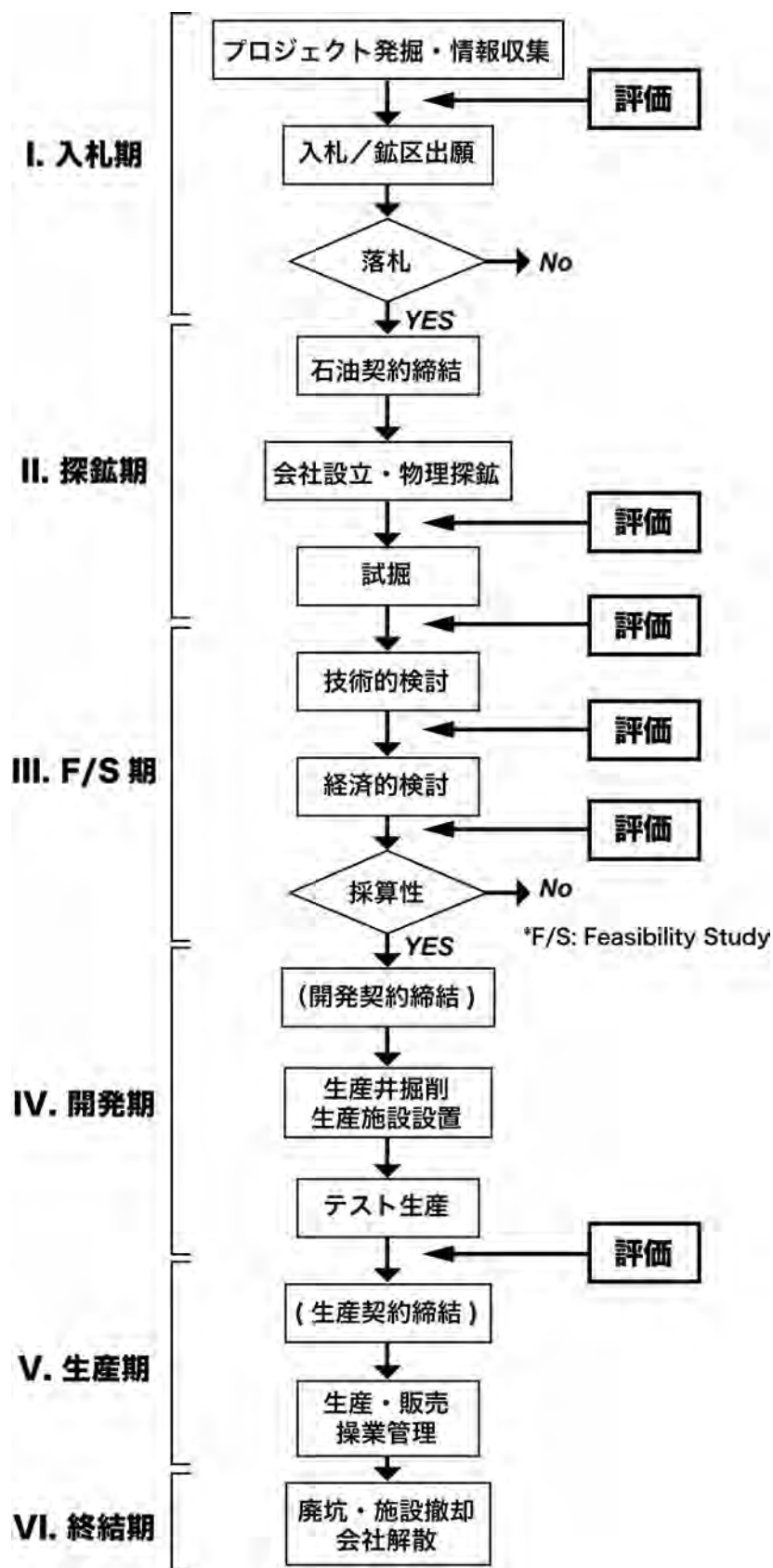


図 3.1.1 石油および天然ガス開発の流れ

(出典：石油技術協会, 2013 を一部改変)

3.2 探査技術

3.2.1 地質調査

2.1.3節で述べた通り、油ガス田は一般に堆積盆地に形成される。そのため、油ガス田の探鉱にあたっては、まず石油システムが形成される堆積盆地を調査・評価する堆積盆地評価と呼ばれる段階が存在する。その手段として、地質調査と物理探査が用いられる。地質調査としては、地表地質調査 (geological survey) や文献調査がまず行われる。具体的には、調査対象地域の地層が堆積した環境や地層の側方変化を調べたり、石油システム (貯留岩・根源岩・帽岩・トラップ等) の観点から、各条件に対する評価を行う。そのために、陸域調査の場合は肉眼で地表に露出する岩石・地層 (露頭) の特徴を直接把握する。その際に地層の走向・傾斜、岩質 (lithology) の特徴、堆積物の流向方向、地層の厚さ、重なり具合 (整合・不整合) などの観点から調査を行う。また、露頭周辺の構造の位置や形態 (背斜・向斜、断層など) を確認し、岩石試料の採取も行われる。

採取した試料からは、地質時代の同定や堆積環境 (sedimentary environment) の復元を行うための微化石分析、根源岩の石油生成能力を調べるための地球化学分析、貯留岩としての物理的特性や粒子組成、孔隙の発達状況などを調べる貯留岩分析などが行われる。また、堆積盆地評価と並行して行われるのが、油ガス田の存在が見込まれる地質構造の所在・形状などを調べる構造評価である。この段階では、地震探査 (seismic exploration あるいは seismic survey) の結果を精査し、地下構造を解釈することが重要となる。さらに、リモートセンシングを用いた分析も行われている。航空機や人工衛星に搭載されたセンサーを用いて、地表付近の対象物から反射または放射される電磁波を捉え、それらを解析する。この手法は、広範囲を同時に観測することができ、経時変化する事象の観測にも適している。また、地上のアクセスや国境等の制約なしに観測可能であることも利点である。この他、衛星画像や航空写真を用いて、地表に現れている地形・方向性を読み取り、地質の判定・判読や地質構造の確認 (地形・地質判読) によっても、地下の地質構造が推定されている。

ここまではあくまでも、油ガス田が存在する可能性を示す条件の調査にすぎない。すなわち、これらは間接的な探鉱であるため、実際に油ガス田が存在するか否かは直接坑井を掘削して判断する必要がある。これが試掘である。試掘で油ガス層を掘り当てれば、産油・産ガス能力を含む油ガス層の特性に関する情報の取得が行われる。油ガス層を発見できなかった場合にも、その坑井試料から可能な限りの地質的・地化学的情報を収集し、次の掘削に関する判断材料とする。

油ガス田を構成する堆積層は陸域のみに分布するとは限らず、海域にまで広がっている。そのため、海域での物理探査技術や海域掘削技術も向上し、海域でも石油、天然ガスの探鉱が行われている。しかし海域においては露頭が海底となるため、陸域に比べ地質調査やリモートセンシングは簡単ではない。

3.2.2 物理探査

(1) 概要

地下を構成する物質の物理的性質は均質なものではない。例えば、弾性的な性質が異なれば弾性波（地震波）の伝わり方は異なるし、電磁氣的性質が異なれば電気・電磁氣的レスポンスが異なってくる。そこで、地下に弾性波等の物理的擾乱を作用させ、そのレスポンスから地下の物理的性質の分布を推定することができる。この操作は数学的には逆問題（inverse problem）と呼ばれる。また、積極的に物理擾乱を作用することなく、重力や磁力のようなポテンシャル場を利用して地下を推定することも可能である。

逆問題を図 3.2.1 を用いて説明すると、原因（今の場合は地下に存在する物理的な異常）から結果（今の場合は地下からの物理的レスポンスの計測データ）を導くことは容易であり、これを順問題（forward problem）と呼び、逆に結果から原因を推定することが逆問題である。逆問題の実際は、物理場（波動場、拡散場、ポテンシャル場）を二階偏微分方程式で表現される数学モデルで記述することにより、数理的に解析を行う。ただし、計測データと計測データを最も満足するようなモデルの関係は非線形であり解が一意的に決まらないことが多く、計測データを最も満足するようなモデルを反復的な操作を繰り返しながら初期モデルから更新していくアプローチが適用される。さらに、データがいつも十分に取得されるとは限らず、また計測データに様々なノイズが混入してしまうことが一般的であるため、解の不確実性が大きくなる。不確実性を減らすためには、いくつかの物理探査手法を組み合わせると統合的に解析・解釈をすることが行われる。

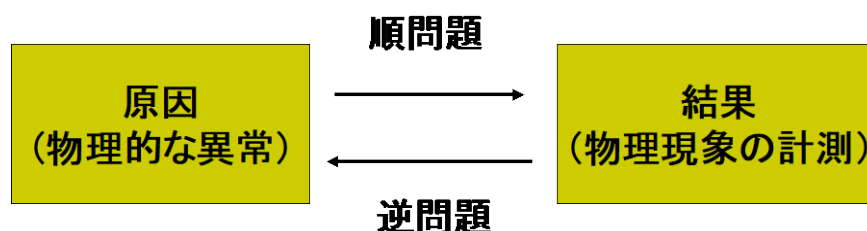


図 3.2.1 順問題と逆問題

このように、人間の目に代わって物理的現象を観測・解析・解釈して地下を可視化する技術体系は物理探査と呼ばれ、地下に存在する石油を探査できることから、歴史的に石油産業と共に発展してきた経緯がある。表 3.2.1 に、主として石油・天然ガス開発に用いられる物理探査の種類と概要を示す。石油・天然ガス開発において物理探査を適用する目的は、石油・天然ガス資源の賦存可能性について評価に資する情報を提供し、最終的には試掘位置を決定することである。図 3.2.2 に、概査から精査を行い最終的に統合解釈し試掘位置を決定するまでの流れ（概略）を示す。地表地質調査等を経て探査エリアが決定されてからは概ね以下の手順で探査が進められる。第一に、堆積盆地の大局的な特性を明確することから始まり、これには重力探査（gravity survey）や磁力探査（magnetic survey）を用いた概査が行われる。これらの探査は物理的にはポテンシャル場を観測するため空間

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

分解能は粗いが広範囲に探査できる利点がある。次に、二次元反射法地震探査 (seismic reflection survey) を有望対象領域に適用する。この段階での二次元反射法地震探査の測線密度は一般的に粗いもので、有望対象領域を広くカバーし、その中で炭化水素資源の賦存可能性の高い地質構造 (トラップ) を調べていく。最終的には三次元反射法地震探査を実施し評価の高度化を図り、地表地質調査ならびに地化学調査 (geochemical exploration あるいは geochemical prospecting) 等を統合的に解釈し、石油システムを構成する根源岩における生成 (generation) と熟成 (maturation)、移動 (migration)、貯留岩 (reservoir rock)、帽岩 (キャップロック) の各要素を評価し、試掘の対象となりうる探鉱対象 (プロスペクト (prospect)) を精査していく。評価精度を高めることを目的として坑井を掘削し、これを用いた物理探査を含む調査が行われることもある。以下では、重力探査、磁力探査、地震探査について述べる。

表 3.2.1 石油・天然ガス開発に用いられる物理探査の種類と概要

探査方法	測定パラメータ	得られる地下の物性	用途
重力探査	• 重力場	• 密度	• 堆積盆地の定義・概略記述
磁力探査	• 磁力場	• 磁化率 • 残留磁気	• 堆積盆地の定義・概略記述
地震探査	• 走時 • 波形	• 弾性波速度 • (密度)	• トラップの記述 • 貯留層評価
電磁探査	• 電磁放射に対する反応	• 比抵抗 • インダクタンス	• 堆積盆地の記述 • 炭化水素資源の集積ポテンシャルの直接検知

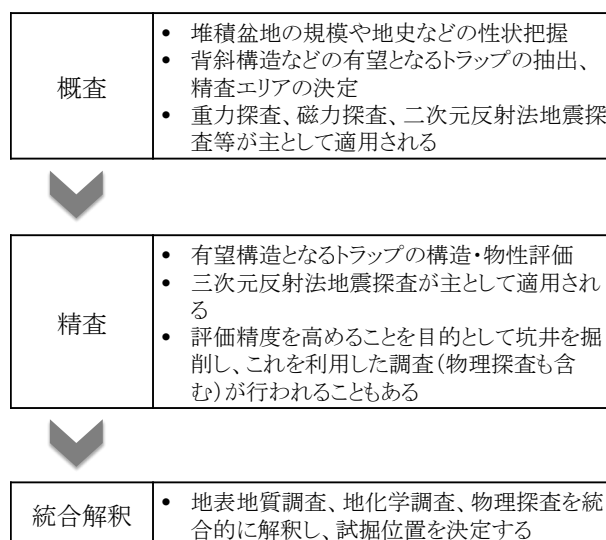


図 3.2.2 概査から精査を行い最終的に統合解釈し試掘位置を決定するまでの流れ (概略)

(2) 重力探査

重力探査は、地下構造に起因した空間的な密度変化 (原因) により生じた微少な重力場 (結果) を測定・解析することにより、地下の密度分布を推定する探査法である。例えば、油層を胚胎する可能性のある背斜構造 (anticline structure) では重力場の高まりが観測さ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

れるし、垂直変化を伴う断層構造 (fault structure) では重力場のギャップを観測することができる。

① 原理

重力探査の基礎理論は、すべての物体は互いに引き合うというニュートンの万有引力の法則に基づく。すなわち、異なる質量を有する物体間に働く引力はそれぞれの質量の積に比例し、物体間距離の二乗に反比例する。地球上の重力は、この引力に加えて、地球の自転による遠心力 (地球は楕円体であるので緯度により異なる) を合成したものであり (これを標準重力場 (normal gravity field) と呼ぶ)、単位質量当りの重力を重力加速度と呼ぶ。重力加速度の単位は Galileo Galilei にちなんで Gal ($=10^{-2}$ m/s²) である。

地下を構成する物質は異なる密度を有しており (図 3.2.3)、密度不均質に起因する異常成分、すなわち標準重力場からの差を重力異常 (gravity anomaly) と呼ぶ。重力異常は 3 成分で構成されるベクトル場であるが、実際には標準重力場の方向における異常成分を検知することになる。この場合、観測される重力値に対して必要な補正を施し、地下を構成する物質の密度不均質性に起因する重力異常を抽出して、地下の密度分布を間接的に推定することができる。図 3.2.4 に地下構造と重力異常の概念図を示す。

3 成分から構成される重力加速度のベクトル場の 3 成分 (g_x, g_y, g_z) に対してそれぞれの方向でさらに空間微分することにより得られる 9 成分 ($g_{xx}, g_{xy}, g_{xz}, g_{yx}, g_{yy}, g_{yz}, g_{zx}, g_{zy}, g_{zz}$) からなるテンソル場を測定することにより、重力加速度ベクトル場のうち 1 成分のみを使用する上述の通常の重力探査法に比べて、高空間分解能かつ高精度な密度特性を得ることができる。この探査法を重力偏差法 (gravity gradiometry survey) と呼ぶ。図 3.2.5 に通常の重力探査法と重力偏差法の違いを説明する簡略図を示す。通常の重力探査法は重力による加速度を測定しており (図 3.2.5)、重力偏差法は二つの物体 A と B に作用する加速度を測定し、それらの加速度の差を両物体の距離で除算 (すなわち空間微分) することにより重力偏差を求める。空間微分操作により高空間波数成分が強調されることにより観測重力値の高空間分解能化が達成され、密度の側方変化に対して高い感度が期待される。さらに、船上あるいは飛行体を利用した測定における移動体動揺の効果を物体 A と B 両方に受けるため、両者の差を取ることで動揺の影響を除去することができるため観測重力値の高精度化が達成されることも利点である。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

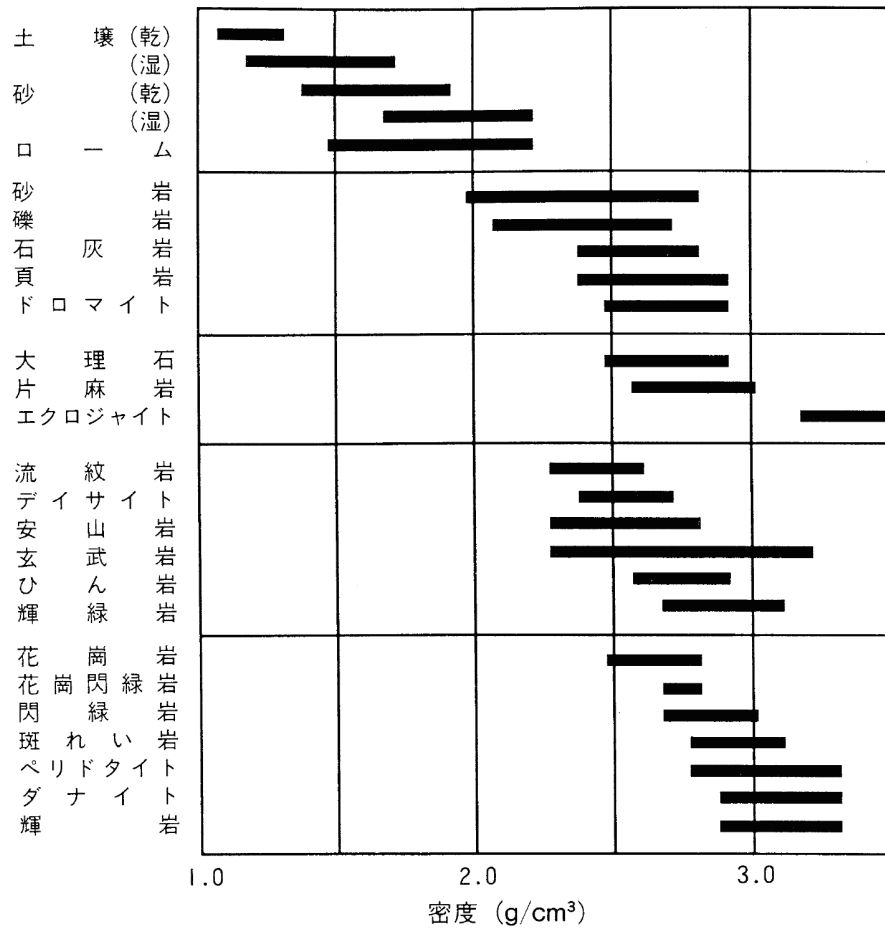


図 3.2.3 地下を構成する物質の密度 (出典：物理探査学会, 2016)

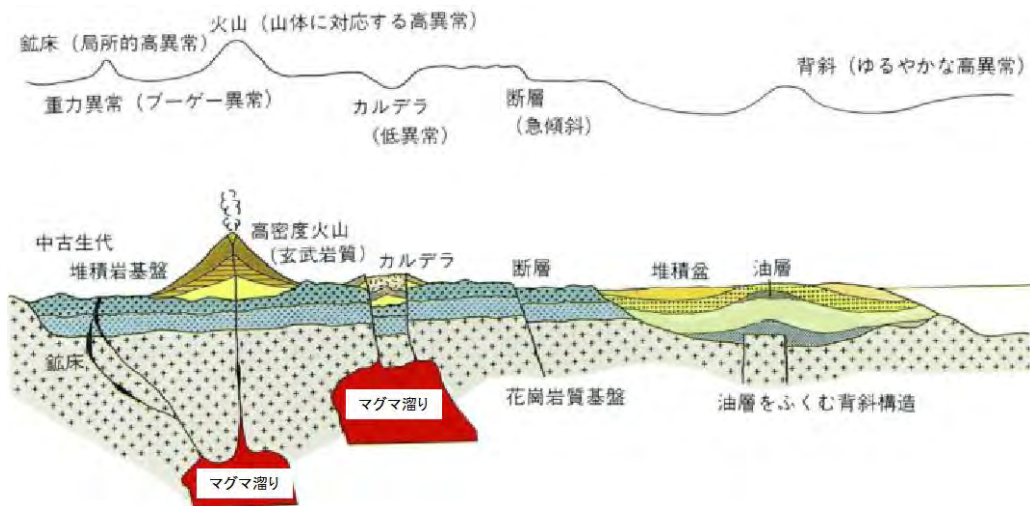


図 3.2.4 地下構造と重力異常の概念図 (出典：物理探査学会, 1989)

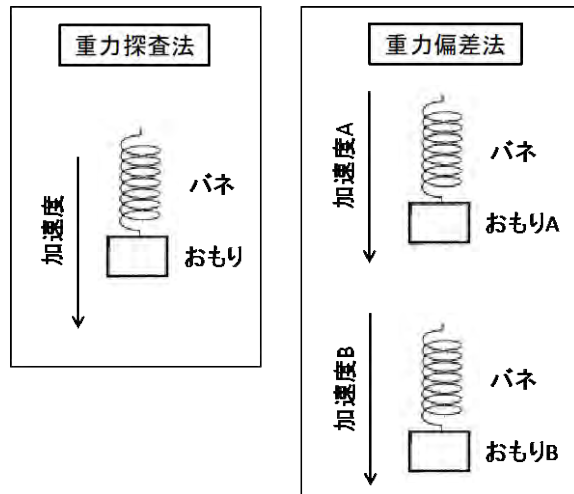


図 3.2.5 通常の重力探査法（左）と重力偏差法（右）の原理の違い

② 測定方法

重力の測定方法には、相対（比較）重力（relative gravity）測定と絶対重力（absolute gravity）測定の方法がある。相対重力測定は重力基準点（gravity station）との重力差を基準点での重力値に加えて重力値を求める方法であり効率的に測定を実施できるが、重力基準点から遠隔になるほど誤差が累積されてしまい精度低下の可能性を内包している。これに対して、絶対重力測定は任意の観測点での重力値を独立的かつ正確に求める方法であるが、測定装置が大掛かりであること、観測のための経験・知見が必要であること等の理由から特殊な場合にのみ実施される。従って、物理探査手法としての重力の測定には相対重力測定を面的に適用するのが一般的であり、ここでは相対重力測定について述べる。

相対重力計（gravimeter あるいは gravity meter）としては、スプリングの伸びがその張力に比例するフックの法則を利用したスプリング式重力計、弦の振動の固有周波数とその張力の平方根に比例することを利用した弦振動方式重力計、磁場がかけられた状態で液体ヘリウム中に浮いている中空球の変位から重力の変化を測定する超伝導重力計などがあるが、最も利用されているのはスプリング式重力計である。図 3.2.6 にスプリング式重力計の一種であるラコスト重力計の構造概念図を示す。航空機あるいは船舶に重力計装置を搭載することにより空中重力探査あるいは海上重力探査を実施することが可能となっている。また、海上で実施される重力探査は磁力探査とともに稠密な三次元地震探査にあわせて物理探査船に装置を搭載して実施されることもある。これは GPS（Global Positioning System）等の測位（positioning）技術の進歩による位置精度の向上に伴い、エトバス効果（Eotvos effect）（地球に対して運動する物体に働く遠心力と地球に対して静止している物体に働く遠心力との差）を適切に評価できるようになったことも要因である。

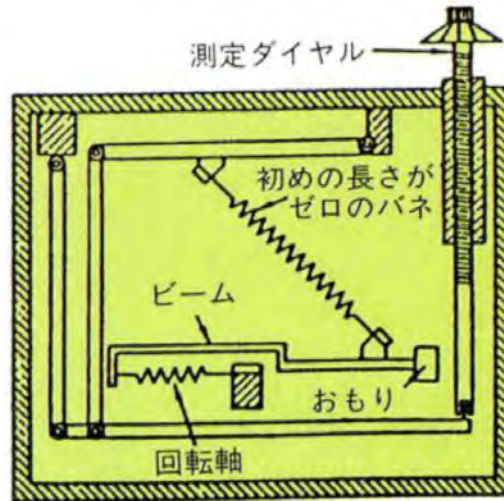


図 3.2.6 ラコスト重力計の構造概念図 (出典：物理探査学会, 1989)

③ 解析方法

重力計により測定された値を重力値に換算し、さらにこの重力値が地下の密度特性の影響のみを反映させるために以下の一連の補正を実施し、最終的に空間的な補間操作を施すことによりグリッドデータを作成する。

a) 潮汐補正 (tidal correction)

月と太陽の天体的な位置関係により発生する引力が測定点に及ぼす影響を補正する。補正量は測定の時刻と測定点の情報により理論的に計算することができる。

b) エトベス補正 (Eotvos correction)

地球に対して運動する物体に働く遠心力と地球に対して静止している物体に働く遠心力との差 (エトベス効果) を補正する。補正量は移動体の対地速度の情報より理論的に計算することができる。

c) ドリフト補正 (drift correction)

ストリングの経年変化や温度変化など、ストリング材質による変化分を補正する。重力測定の前前後で重力差が既知の基点間で閉塞測定 (loop measurement / base tie measurement) を行い、ドリフト量を測定時間に対して配分する。

d) フリーエア補正 (free-air correction)

測定点の標高の高さの違いによる重力差の影響を除去する。補正量は測定点の標高と重力の鉛直変化率 (0.3086 mGal/m を用いる) により計算することができる。

e) 地形補正 (terrain correction)

測定点の標高レベルに水平面を設定し、地形の起伏がその水平面になるような過不足分の重力効果を補正する。

f) ブーゲー補正 (Bouguer correction)

地形補正後の測定点と海水準との間に一樣な密度の平板を仮定し、その影響を除去する。無限の広がりを持つ平板モデルを仮定することにより導出される式を用いる方法

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

や、有限平板や平板の曲率を考慮する方法もある。この補正までを施したものをブーゲー異常 (Bouguer anomaly) と呼び、重力異常図として一般に用いられる。なお、仮定する密度を適切に決定することが重要で、岩石試料に基づく方法やブーゲー異常と標高の相関関係より導出する方法などがある。

④ 得られる情報とその解釈

重力探査は大局的な地質構造を把握する概査法として位置付けられるため、探鉱初期段階で用いられることが多かったが、地震探査データと同時に取得されるようになったことや重力探査データ取得・解析技術の向上により、他の物理探査法との統合的利用も進んでいる。石油・天然ガス探査を目的とした物理探査の中では、重力探査は最初に適用された手法であり（1924年、米国テキサス州ナッシュドーム油田）、1930年代においては地震探査より頻繁に実施された探査法であった（Nabighian et al., 2005）。歴史的には、岩塩層に関連した油ガス貯留層において重力探査が適用されてきた。これは、周囲の堆積層と岩塩層に大きな密度コントラストが存在するためである。

重力異常図は、広域的な深部構造形態に起因する広域異常成分と比較的浅部の構造形態に起因する局所的な重力成分で構成されるため、フィルタリング処理や強調処理などの画像処理的操作により、地質構造の解釈を行うことができる。また、重力異常図から地下情報を抽出する最も基本的な方法として、ブーゲー異常の空間波数スペクトルにおいて傾きが異なるいくつかのセグメントに分けることにより、一次元の密度境界を推定することができる。さらに、具体的な密度構造を求めるために、重力異常を説明できる三次元的な地下構造モデルを逆問題として解析する方法が計算機の進展により実現可能となっている。

重力探査により得られる地下情報としては、堆積盆地の広がり、基盤形状、堆積盆地中の断層、貫入岩 (intrusive rock)、背斜構造などが挙げられる。上述のように、他の物理探査データとの統合的解析・解釈も進んでおり、とりわけ重力探査データと地震探査データとの統合的な解析・解釈は有効事例が多い。例えば、地震探査データを使用したイメージング処理において重力探査データが良い拘束条件になること、具体的には反射法地震探査データでは表現されにくい岩塩層の基底が重力探査データで表現可能となる（図 3.2.7）。図 3.2.7 において、黄色の実線が重力探査より求められた岩塩層の基底であり、当該箇所は反射法地震探査データではイメージングされていないことがわかる。また、重力偏差法による高分解能化の事例を図 3.2.8 に示す。通常重力探査法と比べて空間的な分解能が高いことがわかる。

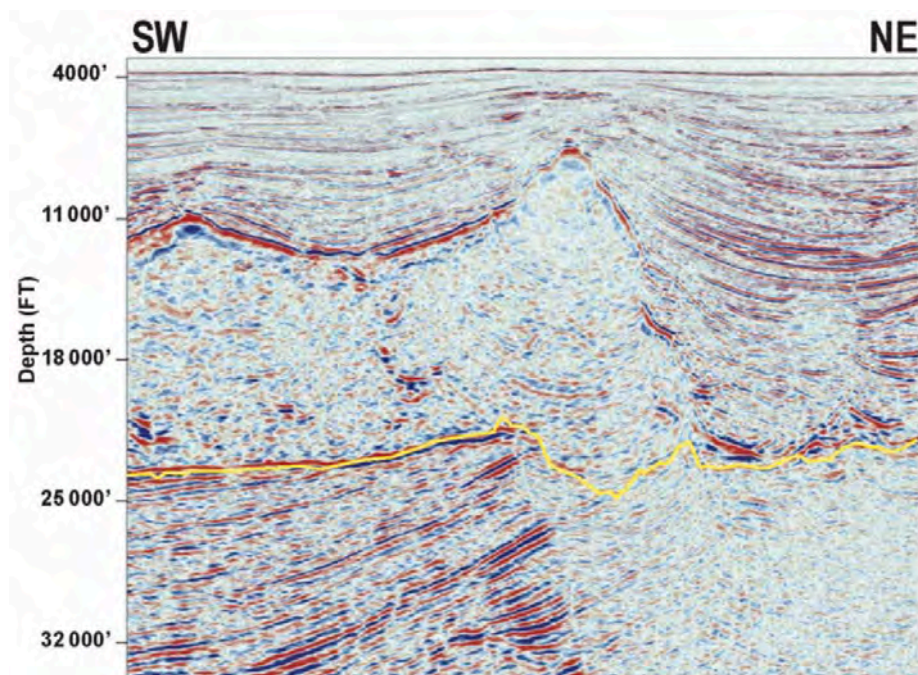


図 3.2.7 岩塩層における反射法地震探査断面と重力探査により求めた岩塩層の基底（黄色実線）
 (出典：O'Brien et al., 2005)

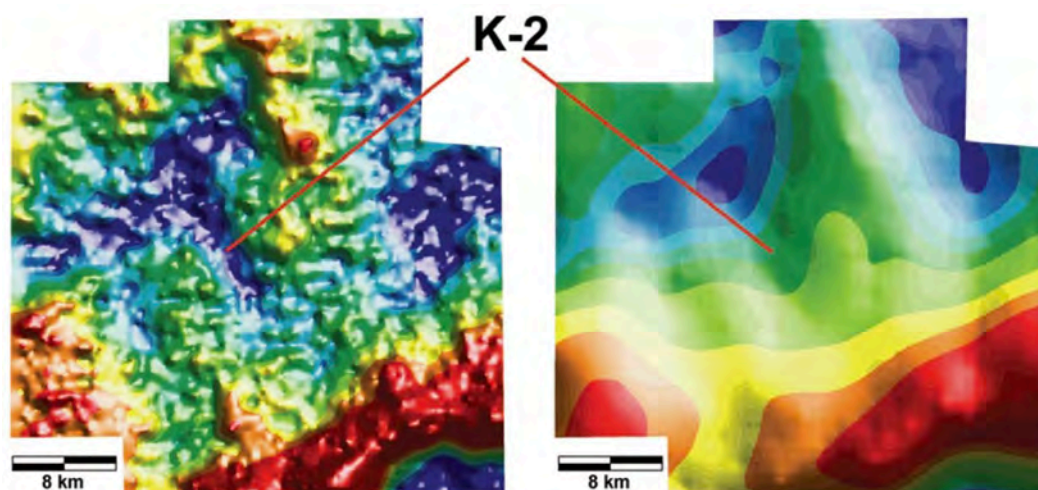


図 3.2.8 重力偏差法（左図）と通常の重力探査法（右図）の比較 （出典：O'Brien et al., 2005）

(3) 磁力探査

磁力探査は、地下を構成する岩石の種類に起因した空間的な磁性変化（原因）により生じた磁力場（結果）を測定・解析することにより、地下の磁性分布を推定する探査法である。磁性の大きい鉱物で構成される基盤岩（**bedrock** あるいは **basement rock**）に対して、堆積岩の磁性は極めて小さいため、基盤岩と堆積岩の 2 層構造モデルが明瞭に成立し、基盤までの深度評価や断層、地塁（ホルスト (**horst**))、地溝（グラールベン (**graben**))、貫入岩などの地質構造評価が可能となる。

① 原理

重力探査と同様にポテンシャル場を測定するため、磁力探査の基礎理論は重力探査の

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

それと類似している点があるが、帯磁の方向と残留磁化 (remanent magnetization) の点に留意する必要がある。磁力探査の基礎理論は、点磁荷間に働く力の大きさと向きに関することを記述するクーロンの法則に基づいている。すなわち、磁荷粒子間に働く斥力または引力がそれぞれの磁荷の積に比例し、粒子間距離の二乗に反比例する。観測される地球の磁場は、主として地球中心核内での電磁流体により形成される超広域的磁場 (国際標準地球磁場 (IGRF : International Geomagnetic Reference Field) として標準化されている)、地下を構成する岩石の磁氣的性質に起因する局所的な磁場、人工構造物からの磁場を合成したものである。磁場の単位はテスラ (T) である。

地下を構成する物質は異なる磁氣的性質を有しており、この不均質に起因する擾乱成分、すなわち超広域的磁場からの擾乱成分を磁気異常 (magnetic anomaly) と呼ぶ。なお、磁気異常をもたらす岩石の磁氣的性質には、残留磁化と誘導磁化 (induced magnetization) の成分があることに留意する必要がある。残留磁化には様々な種類が存在するが、溶岩が冷えて固まる過程で地磁気の向きに合わせて岩石が磁化されて残る熱残留磁化が重要となる。誘導磁化は、外部磁場により誘導されるもので外部磁場に地下を構成する物質の帯磁率 (磁化率) を乗算することで表される。図 3.2.9 に地下を構成する物質の帯磁率を示す。また、残留磁化と誘導磁化の比をケーニヒスベルガー比 (Koenigsberger ratio) (あるいは Q 比 (Q ratio)) と呼び、多くの火山岩 (volcanic rock) では 1 を超える。磁場は 3 成分で構成されるベクトル量であるが、その方向を正確に測定することは容易ではないため、ベクトルの絶対値である全磁力 (total magnetic intensity) を精密に測定する方法が主流となっている。観測される磁力値に対して必要な補正を施し、地下を構成する物質の磁性体の不均質性に起因する磁気異常を抽出して、地下の磁性特性分布を間接的に推定することができる。図 3.2.10 に地下構造と磁気異常の概念図を示す。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

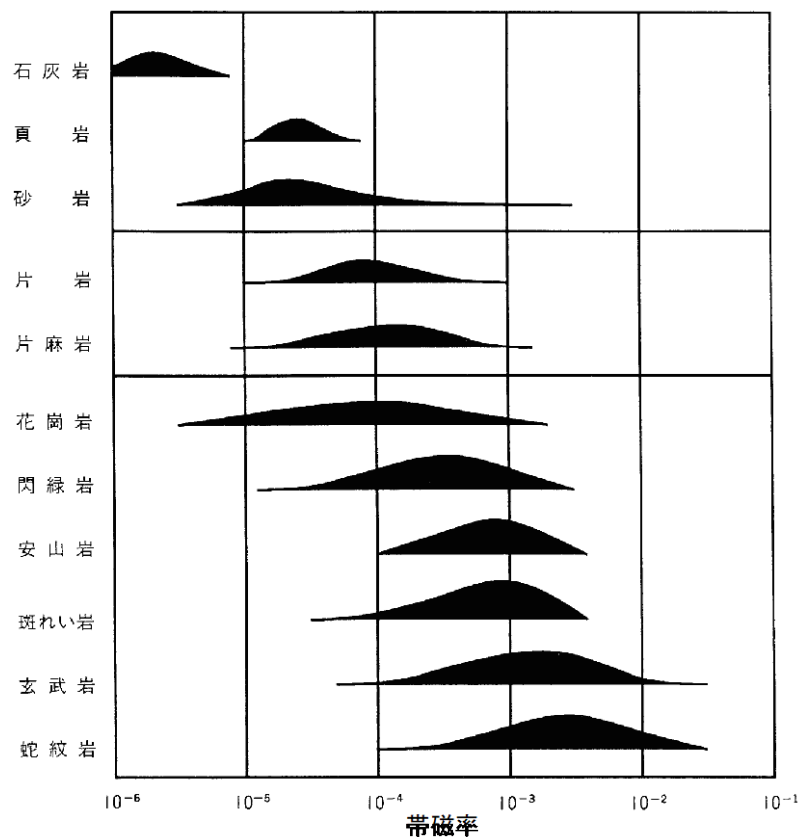


図 3.2.9 岩石の帯磁率 (出典：物理探査学会, 2016)

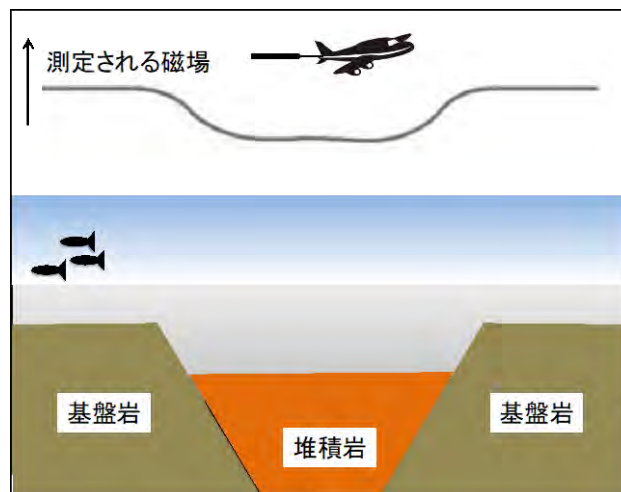


図 3.2.10 地下構造と磁気異常の概念図

② 測定方法

磁場測定に用いられる磁力計 (magnetometer) には様々な種類が存在し、代表的なものとしてプロトン磁力計、光ポンピング磁力計、フラックスゲート磁力計などがある。船舶を利用した海上磁力探査や飛行体を利用した空中磁力探査においては全磁力測定を目的としてプロトン磁力計 (あるいは光ポンピング磁力計) が使用されることが多く、磁場 3 成分を測定する場合には 3 軸フラックスゲート磁力計が用いられる。ここでは、

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

最も一般的なプロトン磁力計の原理を説明する。

プロトン磁力計は核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance) 現象に伴うプロトン (水素原子核) の歳差運動を利用するもので、移動体による動揺を受けても全磁力を安定的に測定することができる。図 3.2.11 にプロトン磁力計の構成を示す。プロトンを含む液体 (水、メタノール、ケロシン) を入れた容器にコイルを巻いて電流を流し強い静磁場を容器に作用させる。この時点で容器の中のプロトンの磁気モーメントはそれまではランダムであったものが、その静磁場の方向に整列する。この状態から静磁場を遮断すると、プロトンは地球磁場を軸とした歳差運動を始めるためコイルに誘導電圧が生じ、その周波数 (ラーモア周波数と呼ばれる) を計測することにより全磁力が求められる。

海上での磁力探査は重力探査とともに稠密な三次元地震探査にあわせて物理探査船に計測機器を搭載して実施されることが多い。船舶を利用した海上磁力探査を実施する場合には、船体磁気の影響を軽減するため船尾から船長の 2 倍以上離してプロトン磁力計を非磁性容器 (魚のような形状をしているためフィッシュとも呼ばれる) に格納し曳航する。また、プロトン磁力計のセンサーを複数曳航して磁気勾配を測定する場合もある。この場合、後述する日変化補正が不要となる。

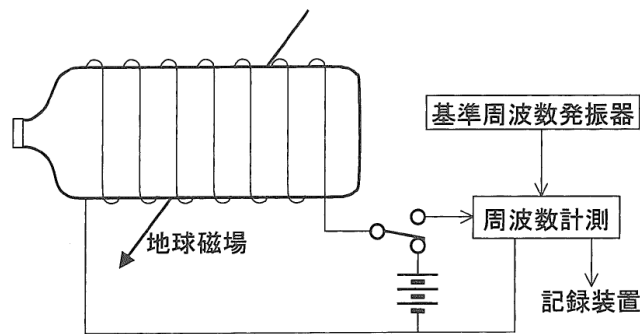


図 3.2.11 プロトン磁力計の構成 (出典: 物理探査学会, 2005)

③ 解析方法

磁力計により測定された観測値が地下を構成する物質の磁氣的性質の影響のみを反映させるために以下の補正を実施し、最終的に空間的な補間操作を施すことによりグリッドデータを作成する。

a) 日変化補正

地球上の磁場 (地磁気) は地下の磁気特性に起因する空間的な変化のみならず時間的にも変化している。電離層を含む地球上層大気は太陽輻射による熱対流や太陽や月の潮汐力により変動しており、これにより電離層内に電流が生ずることによる影響が磁場の時間的変動の主要因である。このような変動を含めて時間的に変動する成分の影響を軽減する操作を日変化補正と呼ぶ。

補正方法としては、固定点にて連続測定された磁力値を差し引くことにより行われる。また、精度は落ちるが交点コントロールと呼ばれる方法を適用することもある。この方法は、測線が交差する交点において観測される磁力値が一致するように補正を行うが、

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

不一致の要因としては日変化分のみならず様々な要因が混在するため、全体的な誤差が最小になるように補正量を決める。

b) IGRF 残差計算

測定点情報に基づいて標準磁場 (IGRF) による残差計算を行う。国際標準地球磁場は国際地球電磁気学会 (IAGA : International Association of Geomagnetism and Aeronomy) において基準化された標準地球磁場モデルであり、全世界の地磁気観測所の観測データおよび人工衛星をはじめとする各種の移動観測による地磁気測定データを基に大域的な地球磁場を球関数で級数展開表現されている。定期的に更新されており、その世代番号 n を付して IGRF- n の形式で区別されている。

④ 得られる情報とその解釈

重力探査と同様にポテンシャル場を測定するため、磁力探査は大域的に堆積盆地の構造規模を評価する概査法として位置付けられ、探鉱初期段階で用いられることが多い。また、他の物理探査法との統合的利用も進んでいる。歴史的には 19 世紀半ば頃に鉄鉱床の探査に始まり、20 世紀初頭には石油探査にも適用された。一般的に、堆積層の磁性はその下部の基盤 (結晶質火成岩など) のそれより小さいため、基盤までの深度評価や断層、地塁、地溝、貫入岩などの地質構造評価も可能となる (Nabighian et al., 2005)。

重力異常と同様に、磁気異常は広域的な深部構造形態に起因する広域異常成分と比較的浅部の構造形態に起因する局所的な磁気成分で構成されるため、フィルタリング処理や強調処理などの画像処理的操作により、地質構造の解釈を行うことができる。磁気異常に特徴的なものとして、擬重力変換 (pseudo-gravity transform) と極磁力変換 (reduction to the magnetic pole) がある。双方とも解釈を容易にすることを目的として、双極異常を単極異常に変換する操作である。

磁気異常図から地下情報を抽出する最も基本的な方法として、磁気異常の空間波数スペクトルのプロット図 (横軸に空間波数、縦軸に磁気異常のパワースペクトルの自然対数) において、傾きが異なるいくつかのセグメントに分けることにより磁性岩体の深度を一次元的に推定することができる。また、磁気異常図から地下構造を定量的に求めるために、磁性岩体に対して単純な形状 (球、直方体、板、断層、ダイク等) のモデルを仮定し、観測値をその岩体により励起される局所的な磁気異常で説明できるようにモデルのパラメータを求めることができる。さらに、磁気異常図全体を解釈する方法として、磁化強度マッピング (magnetic susceptibility mapping) (あるいは見掛帯磁率マッピングとも呼ぶ) を用いて、二次元的な磁化分布を求める方法がある。基本的には解析領域をセルに分割し観測値を説明できるように各セルのパラメータを非線形最小二乗法に基づく逆解析 (inversion) によって求める。さらに、この方法を拡張することにより三次元的な磁化分布を求めることも実現されてきているが、非線形性が強くなるため、信頼性の十分な解を得るために地下構造に対する先験的な情報 (a priori information) を導入して逆解析を行うことが一般的である。

地溝帯が発達する湖域に胚胎する石油・天然ガス探査において空中磁気探査が適用さ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

れた例を図 3.2.12 に示す。図 3.2.12(a)は全磁力に極磁力変換を施し、さらに鉛直一次微分したものである。磁気異常図の長波長成分は基盤に由来しており、基盤における線状テクスチャは断層を示唆するものであり、磁気異常の大きい箇所は火山岩の貫入など高磁性岩体を示唆する。図 3.2.12 (b)は断層などの解釈図を図 3.2.12(a)に重ねたものである。

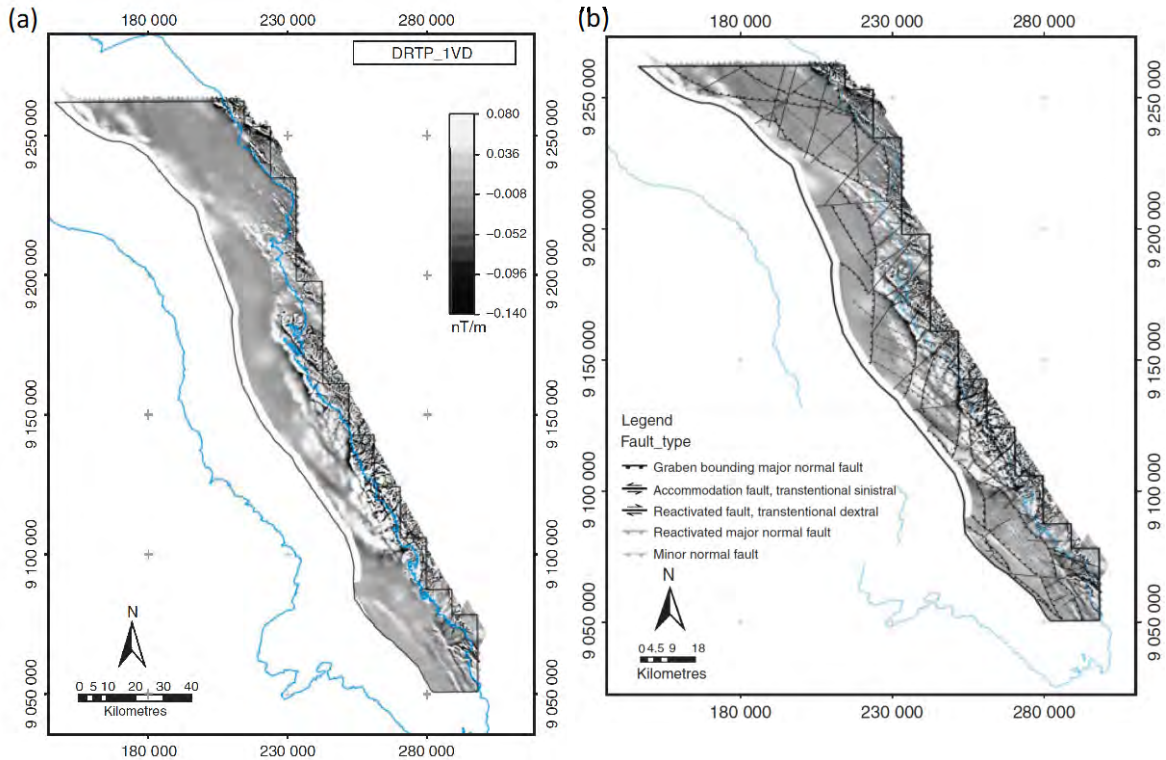


図 3.2.12 空中磁力探査の適用例 (出典: Roberts et al., 2016)

(4) 地震探査

① 原理

地震探査とは、地下を伝播する弾性波（地震波）を利用して地下の構造形態や物性を推定する技術の総称であり、人工的に弾性波を励起させ受振器で測定する能動的地震探査（active seismic method）と、何らかの原因により地下で励起された弾性波を受振器で測定する受動的地震探査（passive seismic method）に大きく分かれる。能動的地震探査は、利用する弾性波の種類や測定幾何的配置により様々な名称で呼ばれる。測定幾何的配置としては、地表のみで行うタイプ、坑井のみで行うタイプ、地表と坑井を利用するタイプ、坑井間を利用するタイプに大きく分類される。音響インピーダンス（acoustic impedance、速度と密度の積）の異なる地層境界で反射する波を利用する反射法地震探査、速度の異なる地層境界で屈折して戻ってきた屈折波を利用する屈折法地震探査（seismic refraction survey）、地表面に沿って伝播する表面波を利用する表面波探査（surface wave survey）などがある。また、使用する弾性波の種類としては、実体

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

波 (body wave) である P 波 (縦波) と S 波 (横波)、境界波 (boundary あるいは interface wave) である表面波などが使用される。図 3.2.13 に P 波と S 波の粒子運動の様子を示す。一方、受動的地震探査としては、常時存在する微小な振動を利用する微動探査 (microtremor array survey)、何らかの原因で発生する微小な地震を利用する微小地震探査 (microearthquake utilization exploration method) 等がある。一口に弾性波探査と言っても、その種類は非常に多彩であり、要求される探査分解能、探査範囲、探査物性などを満たすように探査手法が選別される。

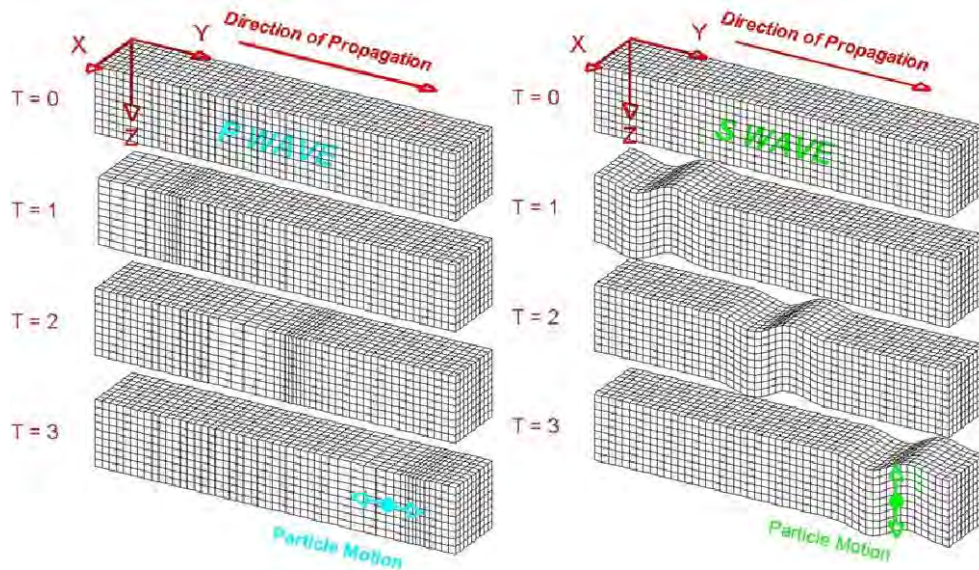


図 3.2.13 P 波と S 波の粒子運動の様子 (出典 : Braile, L.W.)

石油・天然ガス探査における弾性波探査の中で最も使用されるのが、反射法地震探査である。反射法地震探査技術は石油・天然ガス探鉱を背景に成長してきた技術である。これは、反射法地震探査によって得られる探査深度や側方・鉛直分解能が石油・天然ガス探鉱・開発の目的に適していることに加えて、多種多様な地下の物性情報を提供することが可能だからである。歴史的には、油・ガスが胚胎する堆積盆地を成層構造とする仮定に基づいた技術体系が組み立てられていたが、その後複雑な三次元的な地下構造を高精度にイメージングできる技術体系へと進化するなど、現在も弛まない技術的進化を続けている。

反射法地震探査は、地表で人工的に弾性波を発震させ、音響インピーダンスの異なる地層境界で反射した波を地表に設置した多数の受振器で波動場を観測し、その情報を解析することにより、地下の構造や物性を推定する技術である。このとき、弾性波が音響インピーダンスの異なる境界面で反射する比率のことを反射係数 (reflection coefficient) という。数学的には反射係数 R は以下の式で定義される。

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (3.2.1)$$

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

ここで ρ と V はそれぞれ密度と速度であり、添え字 1 と 2 は、それぞれ境界面に対して上側の層と下側の層を示す。ただし、ここで注意すべきことは、上述の反射係数は境界面に対して垂直に入射した場合であり、反射係数自体は入射角に依存するものであり、これを AVO (Amplitude Variation with Offset) 現象という。この現象は密度と P 波速度ばかりでなく S 波速度にも依存する。地層流体や岩石の物性による AVO 現象の違いを利用することで、油ガスの胚胎の推定や貯留層評価の実施が可能となる。

② 測定方法

弾性波探査の種類は多岐に渡っているが、前述したように、ここでは、その中核的存在である反射法地震探査技術について主として述べる。当該技術の測定方法は、震源系・受振系・記録系の三つの要素から構成され、ここでは海上での調査について述べる。二次元海上反射法地震探査では発震・受振点を線的に配置してデータ取得・処理されるのに対して、三次元海上地震探査では発震・受振点を面的に配置してデータ取得・処理される (図 3.2.14)。また、解析対象となるのは主として P 波であり、場合によって S 波も含まれる。空間的に地下状況が変化することが一般的であるため、三次元探査であることが望ましい。実際には、広範囲を大局的に探査することを目的として二次元探査を適用することにより有望海域を絞り込み、さらにその有望海域において三次元探査を適用し、最終的に試掘位置を選定する手順が一般的である。

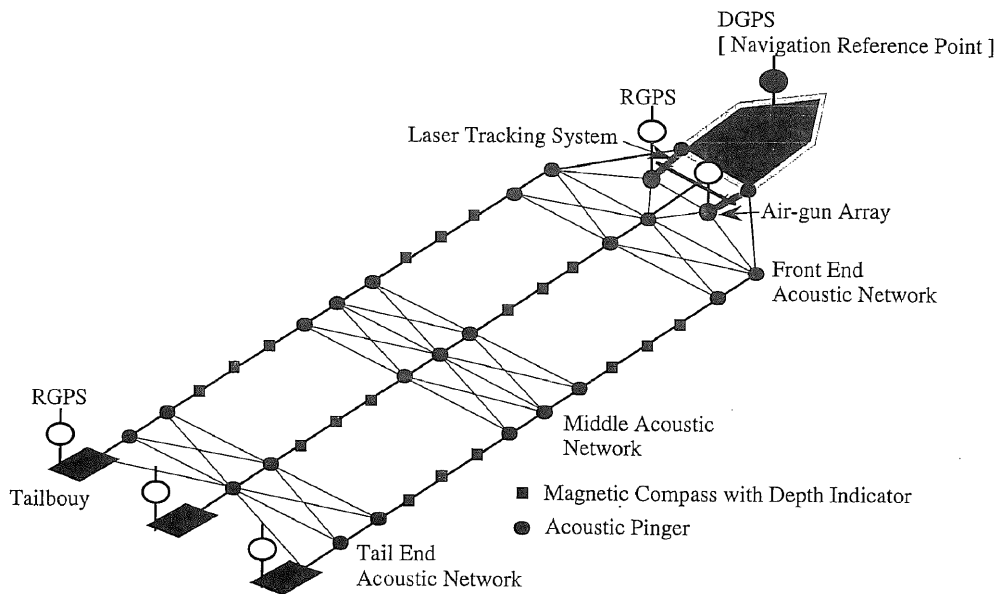


図 3.2.14 海上三次元反射法地震探査の観測形態の一例 (出典：物理探査学会, 2016)

まず震源系としては、爆薬震源と非爆薬震源に分けられるが、海上での震源として爆薬震源はほとんどの場合禁止されているため非爆薬震源であるエアガン (air gun) (高圧縮空気を一気に放出する装置) の使用が一般的である。なお、単独のエアガン発震では気泡の 2 次的な振動 (拡大・収縮の繰り返し) が発生してしまうため、容量の異なる

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

エアガンを複数使用（エアガン・アレイ（air gun array）あるいは同調配列）することにより互いの2次的振動を打ち消し合うことができる（図 3.2.15）。なお、震源からの直接下方進行波と、海面で一度反射して位相が反転した下方進行波（ゴースト反射波（ghost reflected wave））とが干渉する影響（ノッチ効果（notch effect））のため、探査目的によりエアガンの発震深度を最適化する必要がある。

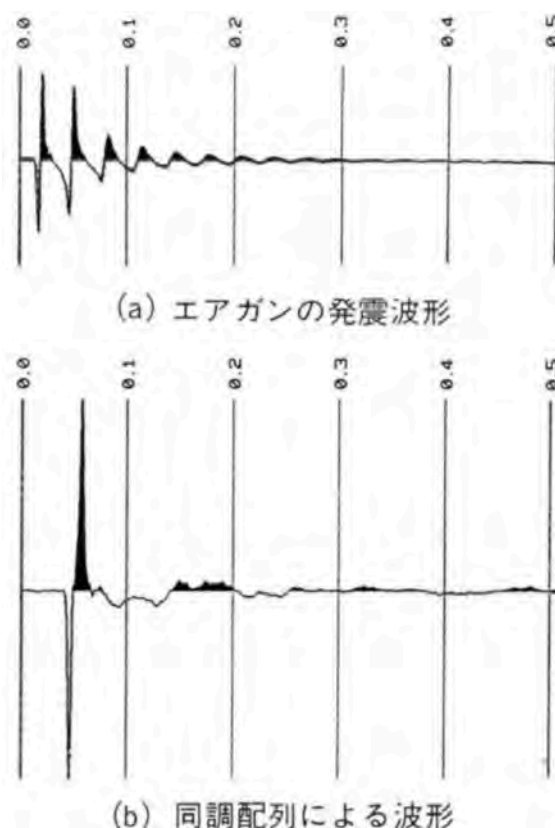


図 3.2.15 エアガン・アレイによる2次的振動の抑制効果（出典：物理探査学会, 1989）

受振系としては、海上調査の場合にはハイドロフォン（hydrophone）と呼ばれる受振器が使用される。ハイドロフォンは圧力変化を電気信号に変換し、通常は圧電素子型のものがストリーマ（streamer）と呼ばれる特殊ケーブルに内装されて用いられることが一般的である。なお、ハイドロフォンの群配置（group setting）による空間フィルタ（spatial filter）効果を利用する。すなわち、一つの受振点に複数個の受振器を設置し、各受振器で観測される信号を加算して、その受振点での地震記録とする。ストリーマの曳航深度については、発震側と同様にゴースト波によるノッチ効果を避けるために探査目的により最適化する必要がある。なお、近年では、ストリーマの深度を変化させて曳航する方法や、異なる深度のストリーマを2本曳航する方法やハイドロフォンに加えてジオフォン（geophone）もストリーマに搭載する方法なども提案されており、これらの手法によりノッチ効果が抑制され、周波数の広帯域化が図られている（近年では特に低周波数成分の重要性が指摘されている）。船舶、エアガン・アレイ、ストリーマケーブル（streamer cable）のテールブイの各位置はGPS技術により高精度に測位されるとと

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

もに、ストリーマケーブルに関しては磁気コンパスと音響測位網により各受振点位置情報が検出される(図 3.2.14)。また、4成分(ハイドロフォンと3成分ジオフォン)の受振器を内蔵したOBC(Ocean Bottom Cable)と呼ばれるケーブルが開発され、海底に敷設することによりP波・S波の両方を同時に観測することも可能である。OBCはストリーマと比較して、データの品質が高い点とケーブル展開の自由度が高い点があげられる。ただし、ストリーマに比べ、ケーブルの展開作業効率は低いため、費用がかかる。従って、プロジェクトとしての採算が見通せる開発・生産段階におけるデータ収録やモニタリング等の定点観測に適用されることが一般的である。

記録系としては、反射法地震探査では探鉱機と呼ばれるデータ収録装置が用いられる。受振器で取得されるアナログ記録をA/D変換器により、離散的な値を取るデジタル信号に変換する。この過程は、時間方向を離散化(サンプリング)する過程とデータ値を離散化(量子化)する過程からなる。量子化したデータ値の分解能はA/D変換器のビット数で決まり、 n ビットの場合は 2^n の分解能となる。地震探鉱に用いられる探鉱機では、現在24ビットが採用され120dBのダイナミックレンジを達成している。なお、時間方向のサンプリング間隔は、ナイキストのサンプリング(標本化)定理(sampling theorem)より、最大周波数の2倍以上である必要がある。

③ 解析方法

以上の要領にて取得された反射法地震探査記録に対して、情報理論ならびに波動理論に基づくデータ処理を行う。基本的なデータ処理の目的は、信号である反射波情報を回復・強調し、各反射波イベントを用いて地下構造情報を得ること、さらに地下構造形態のみならず、処理の過程から得られる反射波の特性(弾性波速度、振幅、周波数、位相など)から、地層の物性や岩相(rock faciesあるいはlithofacies)や地層流体を推定することである。

典型的な反射法地震探査データ処理の流れを図 3.2.16 に示す。磁気テープ等で保存されたデータは、データ形式に係るフォーマット変換を行った後、記録中に存在する品質の劣悪なトレースを除去する(データ編集)とともに伝播距離に従って損失された振幅を回復する処理を行う(振幅補償)。観測される地震波トレースは地下の反射係数列と震源特性・受振器特性・地層特性を含んだ基本波形(basic wavelet)とのコンボリューション(convolution)により表現されると仮定する(コンボリューションモデル(convolution model)と呼ぶ)。コンボリューションモデルの概念図を図 3.2.17 に示す。この基本波形をインパルスに圧縮し、地震波トレースを地下の反射係数列を得る操作を行う(デコンボリューション(deconvolution))。基本波形は必ずしも既知ではないため、反射係数列がランダムで定常であること、基本波形が最小位相(minimum phase)であることを満たせば、観測記録を用いてフィルタを設計することができる。なお、海上地震探査の場合、遠方波形観測や海底面波形などにより基本波形を推定し、その基本波形を最小位相に変換するフィルタを設計することが行われる。

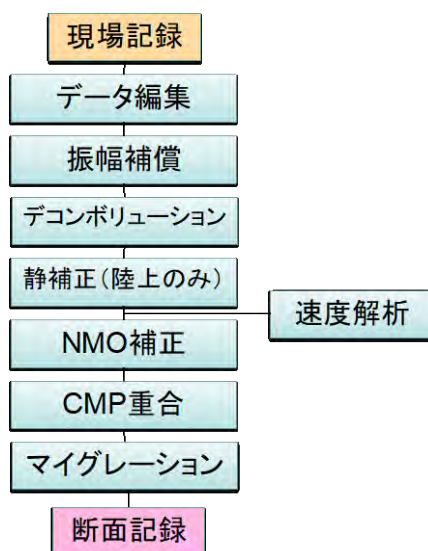


図 3.2.16 反射法地震探査データ処理の流れ

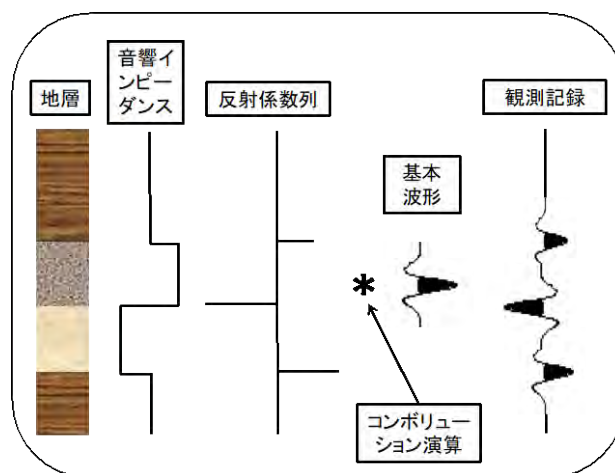


図 3.2.17 コンボリューションモデルの概念

まず、発震点と受振点間のオフセット距離の midpoint を同一にする複数の地震トレースの組である CMP (Common Mid-Point) ギャザーに編集する (図 3.2.18 (a)(b))。次に、各 CMP ギャザー内で反射イベントと各オフセット記録の反射イベントとの走時差を補正 (NMO: Normal Move Out) し (図 3.2.18 (c))、反射イベントを水平に揃えた後に重合し、最終的に一つのトレースを作成する (図 3.2.18 (d))。NMO 補正 (Normal Move Out correction) を適切に行うための速度は、速度解析 (velocity analysis) によって抽出することができる。速度解析においては、さまざまな速度を仮定して NMO 補正と CMP 重合 (Common Mid-Point stack) を繰り返し、それぞれの重合効果をセンプランズ値などによって定量的に評価し (図 3.2.19 (a))、最大の重合効果を与える速度 (重合速度 (stacking velocity)) を時間 (往復走時 (TWT: Two Way Time)) の関数として決定する (図 3.2.19 (b))。

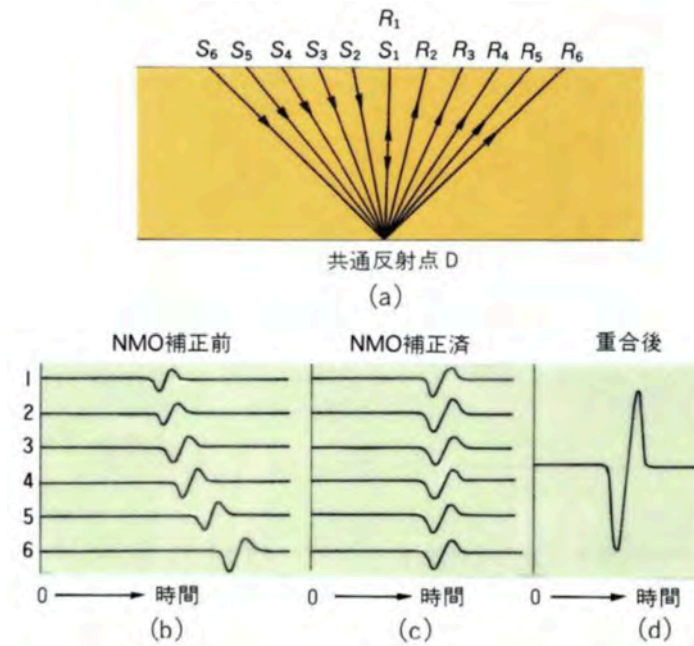


図 3.2.18 CMP 重合の概念図 (出典：物理探査学会, 1989)

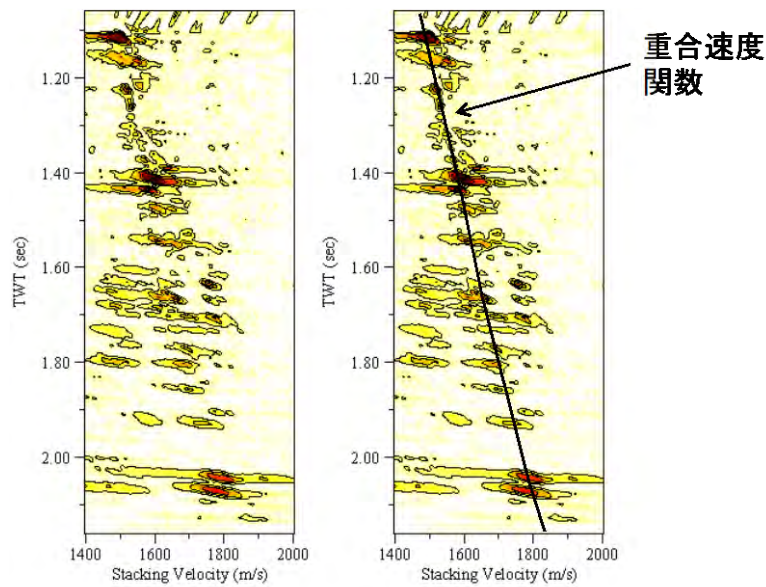


図 3.2.19 速度解析パネル (左図) と重合速度関数の決定 (右図)

このような重合の結果、ランダム雑音(random noise)に対する反射波の S/N 比(Signal to Noise ratio) (信号と雑音のエネルギーあるいは振幅比等で表現され、信号の品質を定量的に表す指標)は理想的には重合数の平方根倍改善される。また、多重反射(multiple reflection)などのコヒーレント雑音(coherent noise)に対しても、空間フィルタとしての抑制効果がある。特に、海面と海底面における多重反射は非常に大きいエネルギーを有することから、海上反射地震探査法においては重大な雑音になりいくつか軽減する手法が提案されているものの、完全に除去できる手段はないため、地震探査断面解釈の

際に注意を要する。

以上のように作成された CMP 重合記録断面図では、傾斜した地層は正しい空間的位置にプロットされていないため、これを正しい位置に戻す操作が必要で、これを重合後マイグレーション (post-stack migration) 処理という。縦軸に往復走時をとった記録断面を作成する手法を時間マイグレーション (time migration) と呼び、この場合、通常縦方向の速度変化が考慮される。一方、縦軸に深度をとった記録断面を作成する手法を深度マイグレーション (depth migration) と呼び、縦方向と横方向の速度変化が考慮される。なお、時間断面から深度断面を得るためには、坑井を利用した速度測定等により得られた T-D (Time-Depth : 時間-深度) 曲線 (3.4.3 を参照) や反射法地震探査データを利用した種々の速度解析手法により得られる速度情報を利用するが、深度変換 (depth conversion) 結果が速度情報に敏感なため、正確な地下の速度情報が地震探査断面の全体に渡って必要となる。そのため、速度情報の誤差に影響されない時間断面上で解釈作業を実施することが一般的である。しかしながら、構造解釈に基づいて掘削計画を立てる場合や地質構造モデル構築を行う際には、深度情報で提供することが望ましいことから、変換誤差を承知の上、深度変換する場合もある。近年では、成層構造を仮定する CMP 重合法を介さずに直接イメージングを実施する手法として、重合前マイグレーション (pre-stack migration) が適用されるようになってきた。重合前時間マイグレーション (PSTM : Pre-Stack Time Migration) が標準仕様となつてはいるが、速度の不均質性が大きかったり、複雑な地下構造に対しては重合前深度マイグレーション (PSDM : Pre-Stack Depth Migration) がより有効なイメージング手法となる。重合前深度マイグレーションは高速計算機資源を要するため、以前は適用が限定的であったが、昨今の計算速度の飛躍的向上に伴い、適用事例が広がっている。

反射法地震探査における分解能は、異なる二つの反射イベントを区別できる能力として定義され、垂直方向分解能 (vertical resolution) と水平方向分解能 (horizontal resolution) に分けられる。垂直方向分解能については様々な基準があるが、波長の 4 分の 1 程度とされる。一方、水平方向分解能についてはフレネル帯 (Fresnel zone) に関連してくる。フレネル帯は、対象深度と波長の関数として表現され、波線経路の長さが 2 分の 1 波長以内の範囲が干渉により強め合う領域であり、CMP 重合記録の水平分解能の定義として使用される。水平分解能向上の特性を有するマイグレーション処理の適用により、フレネル帯は縮減されるが、マイグレーション効果は発震・受振点配置や空間サンプリングにも依存するため縮減効果の定量的表現を一般化することは難しい。

④ 得られる情報とその解釈

石油・天然ガス探査の場合には、石油システム (石油の生成・移動・集積までの一連の過程を統一的に考えるアプローチ) の概念に従って、これらの要素や条件が揃っているかを構造の形態や発達史、堆積環境などを複合的に把握し、石油・天然ガスが溜まっている可能性のある構造とその拡がりや賦存する流体の種類や量について各種データを統合的に解釈する。究極的な目標は生産井掘削位置の決定に資する情報を提供すること

であり、反射法地震探査はその中心的な役割を果たしている。

上述の一連のデータ処理を施し、さらに信号と雑音を分離する手法を重層的に適用してもなお、最終的な地震探査断面には雑音成分が残留しており、その後の解釈に影響を及ぼすことを認識しておく必要がある。解釈手法としては大まかに、岩相（ファシス）解析（facies analysis）、地質構造解析（geological structure analysis）、アトリビュート解析（attribute analysis）、統合・可視化（integration and visualization）の四つに分けることができる。

a) 岩相（ファシス）解析

岩相解析は、地層境界を表現する地震探査断面において、反射波の振幅強度、連続性、形状、位相、周波数、区間速度（interval velocity）などに注目することにより、岩相の堆積環境や岩質の定性的な地質解釈を行うことを目的とする。それぞれの地震反射面は同時代に堆積したものであるため、堆積環境をある程度推定できるという仮定に基づく。図 3.2.20 に示すように、地震探査断面における反射イベントの見え方と堆積環境とを定性的に関連付けることにより、地震探査断面を区分しそれぞれの堆積環境を推定する。しかし、地震探査データ、岩相、堆積環境の間関係は一意的には決まらないため、さらなる解釈作業を必要とする。地震探査断面上において認識される大規模な堆積特性としては、発達するデルタ、海底扇状地、河川成堆積物などが挙げられる。図 3.2.21 に河川成堆積物における岩相解析適用の例を示す。

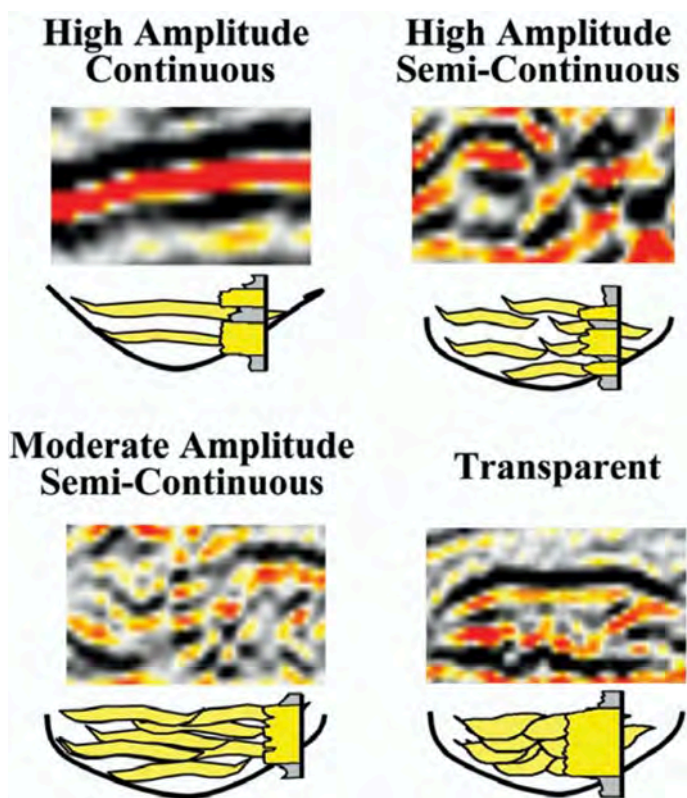


図 3.2.20 反射イベントの見え方と堆積環境との関連付け （出典：West et al., 2002）

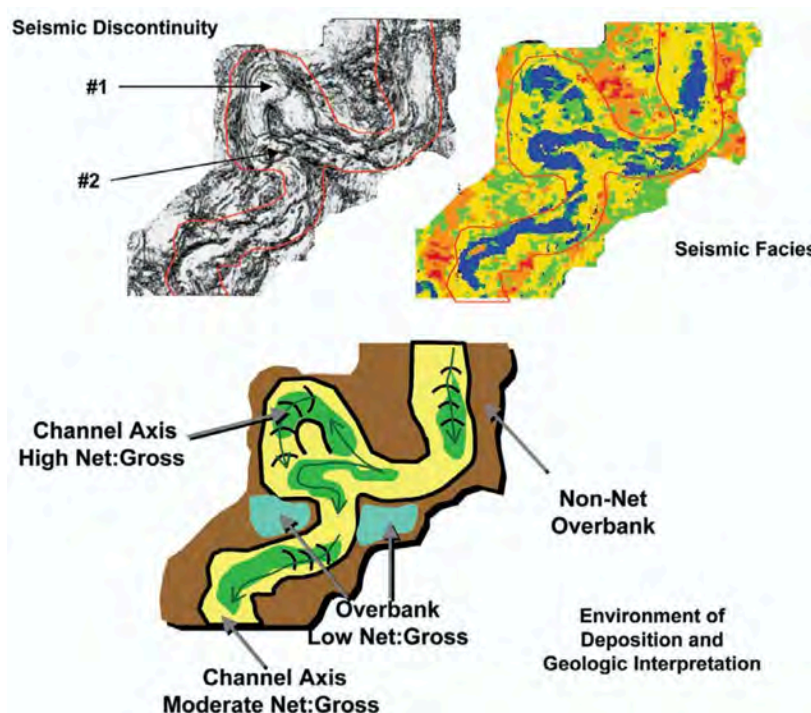


図 3.2.21 河川成堆積物における岩相解析適用の例（出典：West et al., 2002）

b) 地質構造解析

地質構造解析は計算機上に搭載された専用の解釈ソフトウェアを使用して実施されるのが一般的である。解釈ソフトウェアの機能としては、地震探査断面において視認される反射面（ホライゾン（horizon）とも呼ばれる）の自動ピッキング、断層の定義、坑井との対比、三次元表示などとなっており、地下構造の形状変化や断層形態を二次元あるいは三次元的に解釈することができる（図 3.2.22）。高角な断層からの直接的な反射波は観測できないことが多いため、反射面の垂直方向のずれや弱振幅により視認されることが一般的である。この作業は、解釈者の主観的要素に依存する面が多く、その意味で不確実性が生じる点に留意する必要がある。不確実性を減らすことを目的として、地震探査断面に影響を及ぼす影響（探査仕様、内因・外因的ノイズ、処理仕様など）を考慮しつつ、計算機によるモデリングを併用することも行われる。図 3.2.22 において、そのようなモデリングを通して求められた不確実性の領域も示されている。

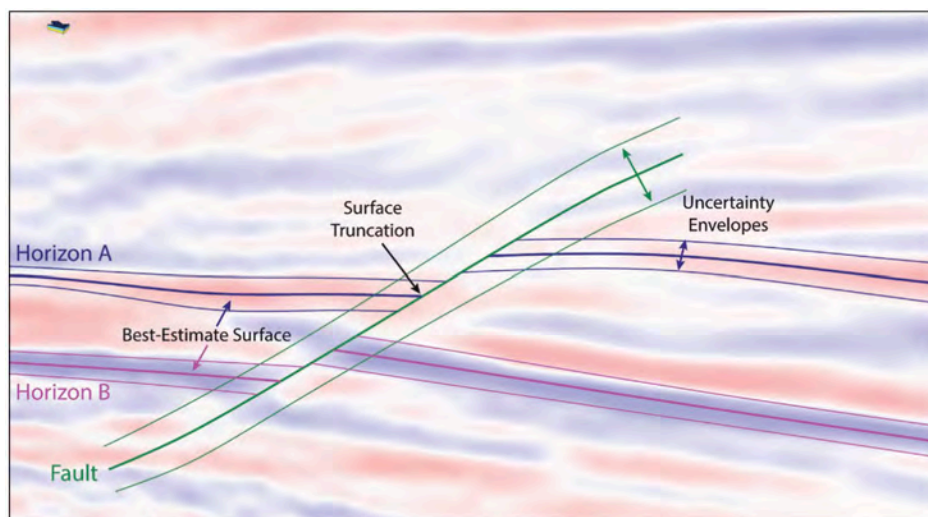


図 3.2.22 二次元地震探査断面における反射面と断層の解釈と不確実性表示の例

(出典 : Leahy and Skorstad, 2013)

c) アトリビュート（属性）解析

アトリビュート解析とは、地震波形の特徴（振幅、極性、形状など）を定量的に評価し、地質情報を抽出する方法である。現在では極めて多数のアトリビュートが提案されており、地質構造・層序解釈、岩石・流体特性解釈など多岐に適用されている。Taner et al. (1994) はアトリビュートを幾何学的なものと同物理的な意味を有するものの二つに分類し、幾何学的なアトリビュートは地層の傾斜・方位・連続性などの幾何学的特徴の視認性を向上させるものであり、物理的アトリビュートは地下を構成する物質の物理特性把握を目的としている。AVO 解析も物理的アトリビュートの範疇となる。最良なアトリビュートの選定には定石は無く、それぞれの地質状況に合わせて試行錯誤的に最良なものを見つけることが行われる。ここ数十年において、アトリビュート解析の発展は著しく顕著な成果を出し続けている。アトリビュート解析適用の例（コヒーレンス）を図 3.2.23 に示す。断層、チャンネル、突州（point bar）、切り立った川岸（cut bank）等が明瞭に確認できる。

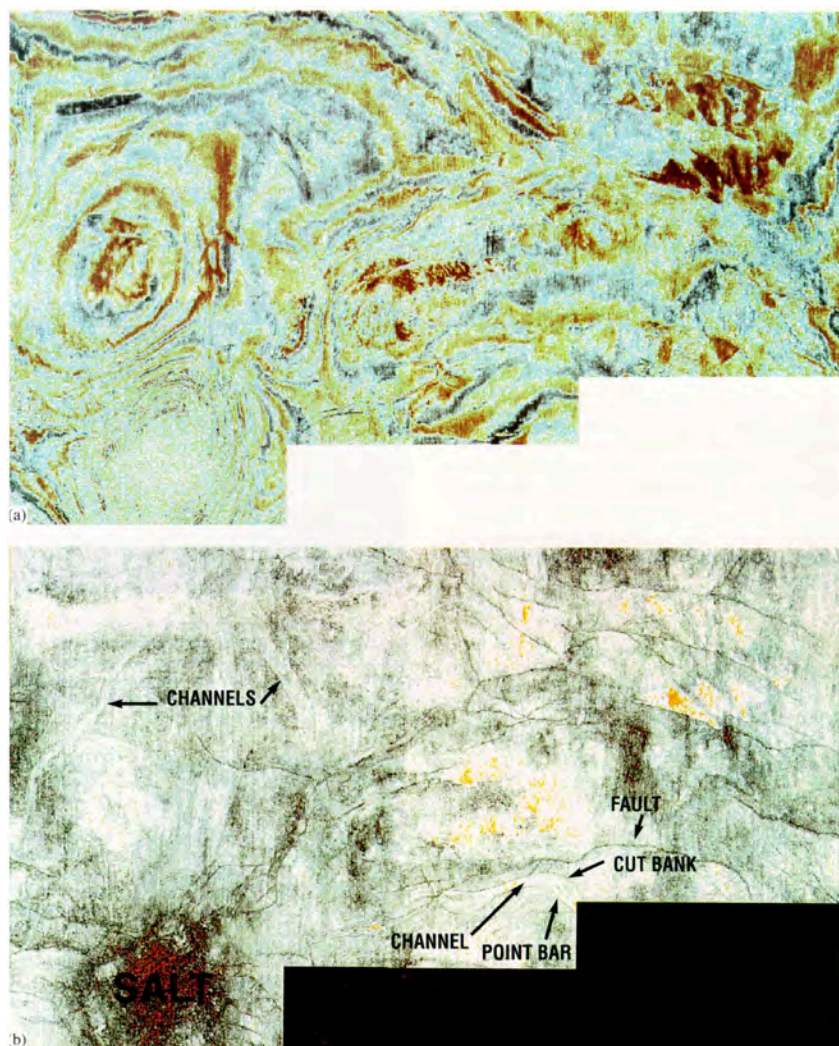


図 3.2.23 三次元地震探査ボリュームにおける時間スライス（上図）とコヒーレンスアトリビュート解析結果（下図）（出典：Bahorich and Farmer, 1995）

d) 統合・可視化

貯留層モデルを構築するためには、地震探査データ、物理検層（well logging / geophysical logging）、室内実験・岩石物理（rock physics）的アプローチなど異なる手法を統合する必要がある。これらの異なる手法は周波数帯域が異なるため（室内実験：100 kHz から MHz、音波検層：kHz オーダー、地震探査：Hz オーダー）、スケーリングの問題、つまり異なるスケールの事象をどのように統合化するのが問題となる。室内実験に基づく岩石物理的アプローチでは、孔隙スケールでの鉱物、流体、グレイン粒子の形状がコア試料を伝播する波動にどのように影響するのかに着目しているが、調査スケールが室内実験レベルから検層レベルさらに地震探査レベルに拡大し、低周波数（つまり長波長）での測定になると様々な状態の岩石の情報を空間的に平均化して観測することとなる。また、そもそもの物性値が周波数依存性を有することもある。結果として、室内実験で測定される岩石の特性と地震探査などの低周波数で測定されるそれとは異なることがあり得る。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

統合化において3次元地震探査の利用が一般的になってきた現在では、ソフトウェアとハードウェアの進化に併せて可視化技術も進化している。強力なグラフィック環境において様々なサイズとデータ形式を有するデータセットを可視化することや可視化技術を駆使することにより、効率的に解釈できるばかりでなくデータの品質評価も行え、意思決定の精度を向上させる。図3.2.24は、三次元地震探査ボリューム（図3.2.24(a)）から強振幅部分を抽出し（図3.2.24(b)）、さらにその一部を取り出し（図3.2.24(c)）、その部分に対して不透明度（opacity）を丁寧に設定することにより、詳細な情報を得ることができる（図3.2.24(d)(e)(f)）。

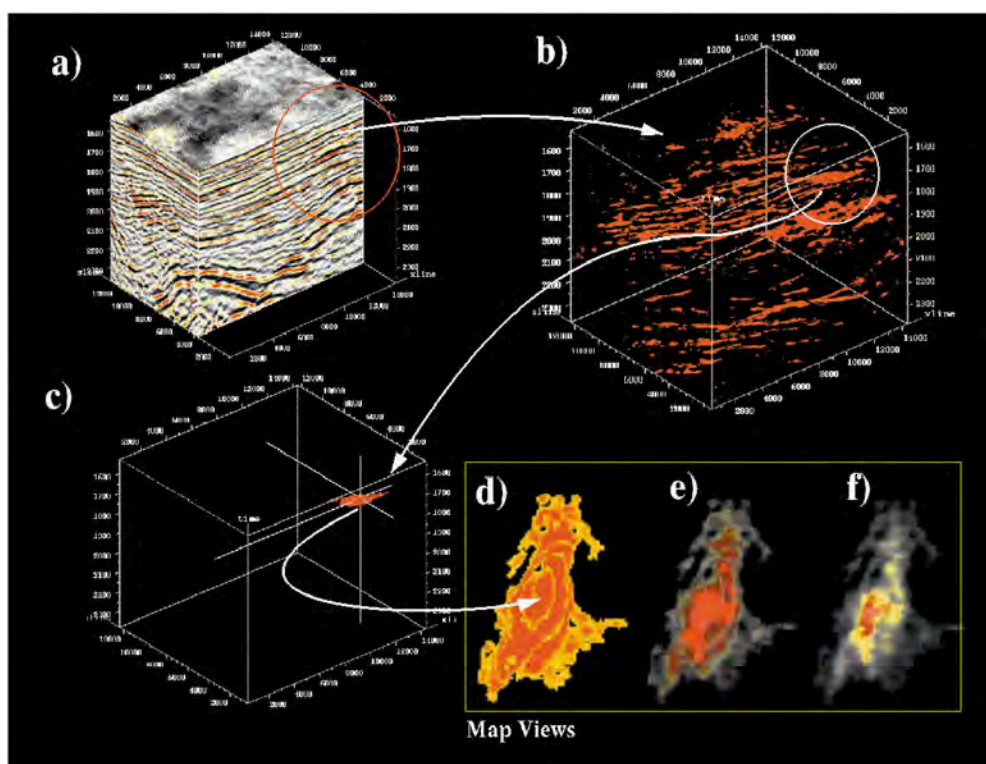


図 3.2.24 三次元地震探査ボリュームにおける強振幅部分の不透明度（opacity）設定による見え方の違い（出典：Kidd, 1999）

3.3 掘削技術

3.3.1 ロータリー掘削 (rotary drilling)

図 3.3.1 に示した石油および天然ガス開発の流れのなかで、地表からの探査を終えた探鉱期から F/S 期にかけての試掘、開発期の生産井掘削において地下へのアクセスのための坑井の掘削が行われる。探鉱・F/S 期に掘削される坑井のうち、石油や天然ガスを見つけるための坑井を試掘井 (exploration well あるいは wildcat)、見つかった油ガス層の可採埋蔵量や生産能力の検討、開発・生産計画の立案、経済性の検討を行うための貯留層解析に必要な坑井データを取得する坑井を評価井 (appraisal well) と呼ぶ。開発期に掘削される開発井 (development well) には、生産井のほかに水攻法 (water flooding) や増進回収に用いられる圧入井 (injection well) がある。また、必要に応じて観測井 (monitoring well) や取水井 (water well)、坑井の暴噴 (blowout) を止める手段の一つとしての救助井 (relief well) の掘削が行われることもある。試掘井や評価井は仮試油 (生産テスト) を終わったら通常は廃坑 (well abandonment) されるのに対して、生産井は油ガス層の生産性が最大になるように坑井の仕上げ (well completion) が行われる。坑井の仕上げ作業や廃坑作業もまた掘削エンジニアの仕事である。

石油・天然ガスの坑井掘削にはリグ (rig) と呼ばれる掘削装置が用いられる。図 3.3.1 に示すように陸上の掘削リグ (drilling rig) 以外にも、海洋での掘削ではジャッキアップリグ (jackup rig) やセミサブマーシブルリグ (semi-submersible rig、以下「セミサブ」という)、ドリルシップ (drill ship) といった様々なタイプのリグが用いられる。

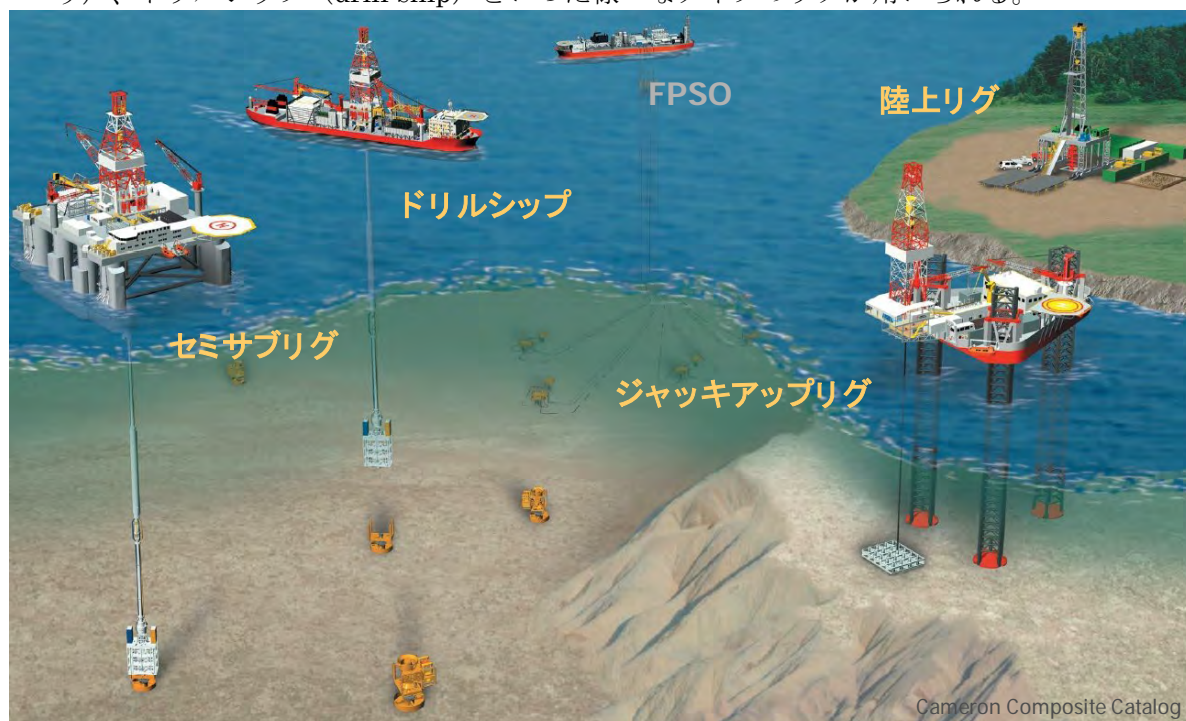


図 3.3.1 陸上および海洋の掘削リグ

(出典：Cameron 社カタログに加筆)

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

以上のように坑井の種類や掘削の時期、陸上・海洋といった環境の違いはあるものの、いずれの坑井掘削にもロータリー掘削と呼ばれる方法が用いられる。石油・天然ガス開発の坑井掘削費は、対象とする地層や深度などの環境、試掘井か開発井かなどにより大きく異なるが、おおよそ陸上で1坑あたり数億から数十億円、海洋でその2~3倍かかるといわれている。全体の開発費に占める掘削費用の割合は大きく、坑井の掘削をいかに効率よく安価に行うかが非常に重要である。

現在の石油・天然ガス坑井の掘削に用いられている泥水循環式のロータリー掘削は、ビット (bit) に回転と掘進方向の推力となるビット荷重(WOB: Weight On Bit) とを与えてビットに取り付けられた刃先により機械的に岩石を破壊しながら円形断面の穴を掘り進め、坑井内に満たした掘削泥水 (drilling mud) とよばれる掘削流体の圧力を坑井周囲の地層の応力および圧力にバランスさせて坑井が崩壊あるいは圧潰しないように保持し、さらに掘削流体を連続的に循環することによって掘削した岩石片いわゆる掘屑 (cuttings) を地上に運搬する掘削手法である。

この手法を実現するために、ロータリー掘削では図3.3.2に示すように、地上に檣^{やぐら}を設置し、巻き上げ昇降装置によって坑井内にドリルストリング (drill string) と呼ばれる一連の中空連結パイプを吊り降ろし、刃先を有したロータリー掘削ビットをその先端 (最下部) に取り付ける。ある一定の深度まで掘削するごとに、坑壁の崩壊や逸泥 (lost circulation) 、あるいは異なる深度の地層間での地層流体の移動を防止する目的でケーシング (CSG : casing) を坑井内に挿入し、ケーシングと周囲の坑壁の間の空間にセメントを充填して固定する。したがって、掘削される坑井の坑径はケーシングが挿入されるたびに小さくなり、完成された坑井は、図のように複数のケーシングが筒のように挿入された構造となる。

陸上掘削リグを構成する地上の主な機器とその典型的な配置を図3.3.3に示す。

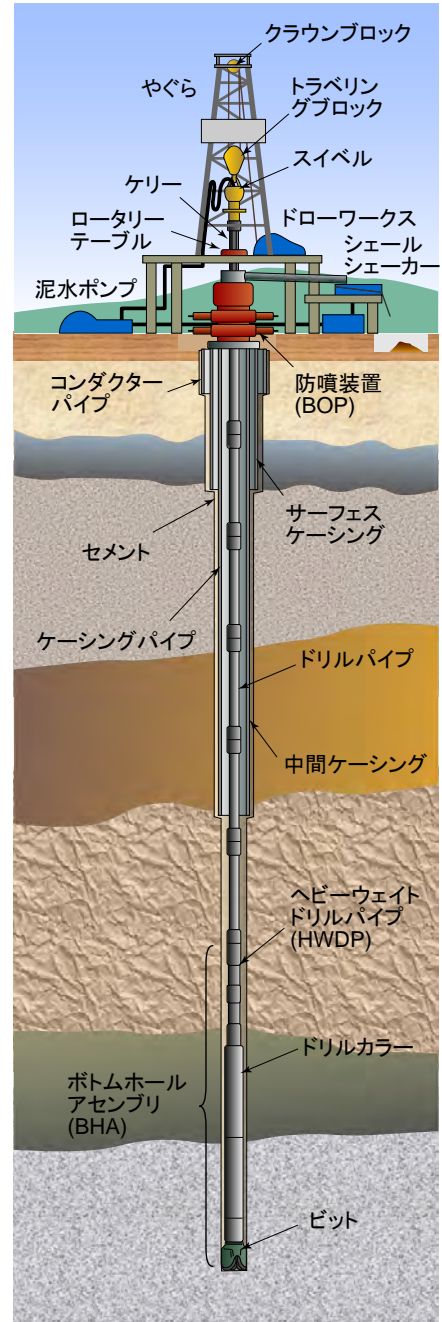
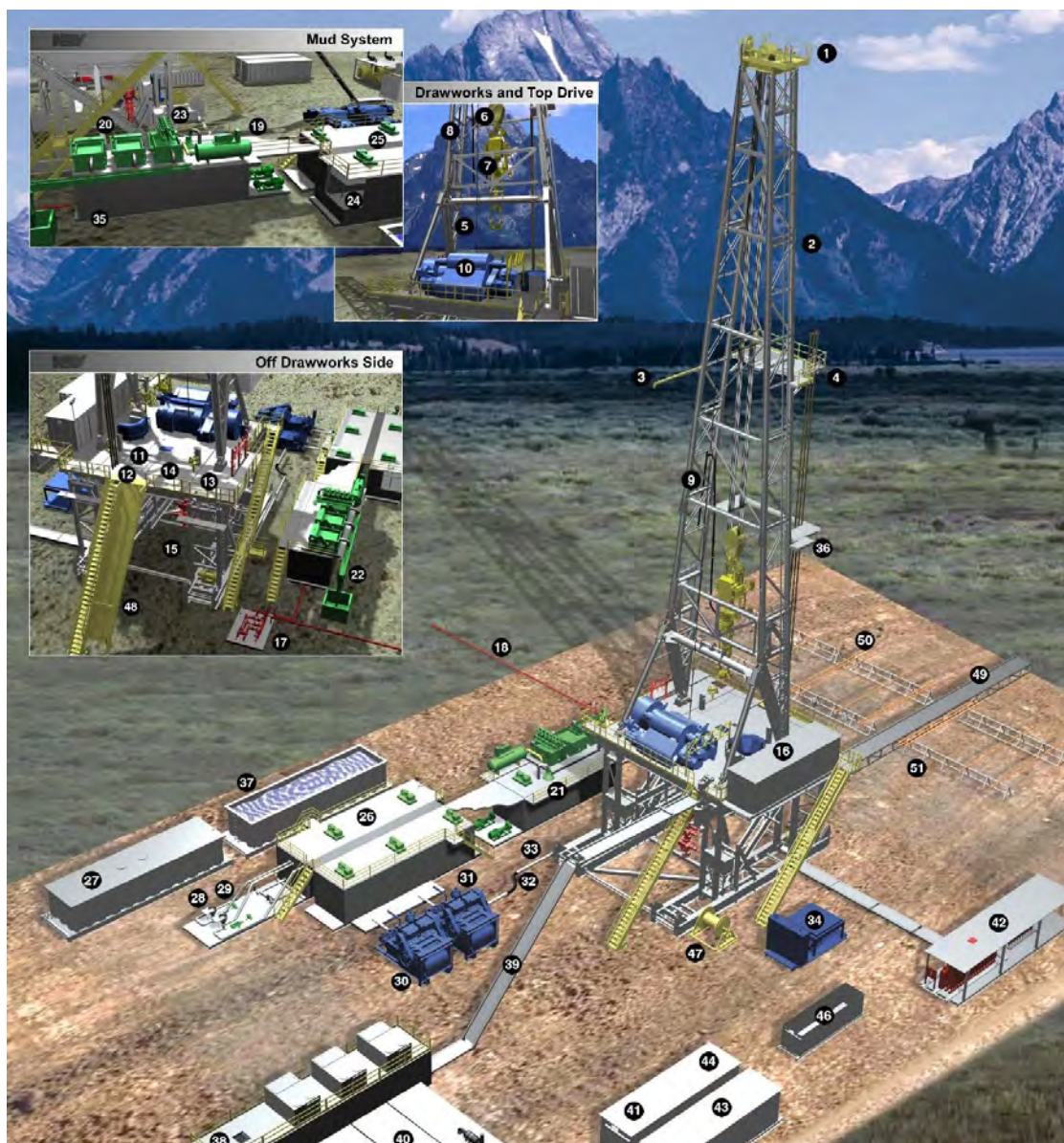


図 3.3.2 ロータリー掘削の概要



- ①クラウンブロック ②マスト ④ワーキングプラットフォーム ⑤ドリリングライン
 ⑥トラベリングブロック ⑦トップドライブ ⑧スタンドパイプ ⑨ロータリーホース
 ⑩ドローワークス ⑪ドリラーズコンソール ⑫パイプセットバック ⑬ドリルフロア
 ⑭ロータリーテーブル ⑮サブストラクチャー ⑯ドッグハウス ⑰シェールシェーカー
 ⑱デガッサー ⑲マッドクリーナー ⑳マッドタンク ㉑レザバートンク
 ㉒マッドミキシングホッパー ㉓マッドポンプ ㉔サイリスタ制御装置 ㉕ケーブルトレイ
 ㉖エンジン・発電機 ㉗BOPコントロールユニット ㉘キャットウォーク ㉙パイプラック

図 3.3.3 陸上掘削リグの主な構成機器とその配置

(出典：NOV 社ポスターに加筆)

3.3.2 リグの主要な掘削機器

(1) 檣および檣下機器

図 3.3.4 に示すようにサブストラクチャと呼ばれる鉄骨構造物の上部に設置されたドリルフロア上に、坑井内に吊り降ろすドリルストリングやケーシングパイプなどの重量を支え、かつそれらを揚降管するための檣、ドローワークス (drawworks) などの巻揚げ昇降

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

装置が配置される。陸上掘削では、あらかじめ横組みしたものを起こして設置するカンチレバー式マストや畳んだ状態から所定の位置に起こす方式のレイズドフロア型サブストラクチャを採用した可搬性の高いポータブルマストなど様々なタイプがある。カンチレバー式マストを倒立させる様子の例を図 3.3.5 に示す。

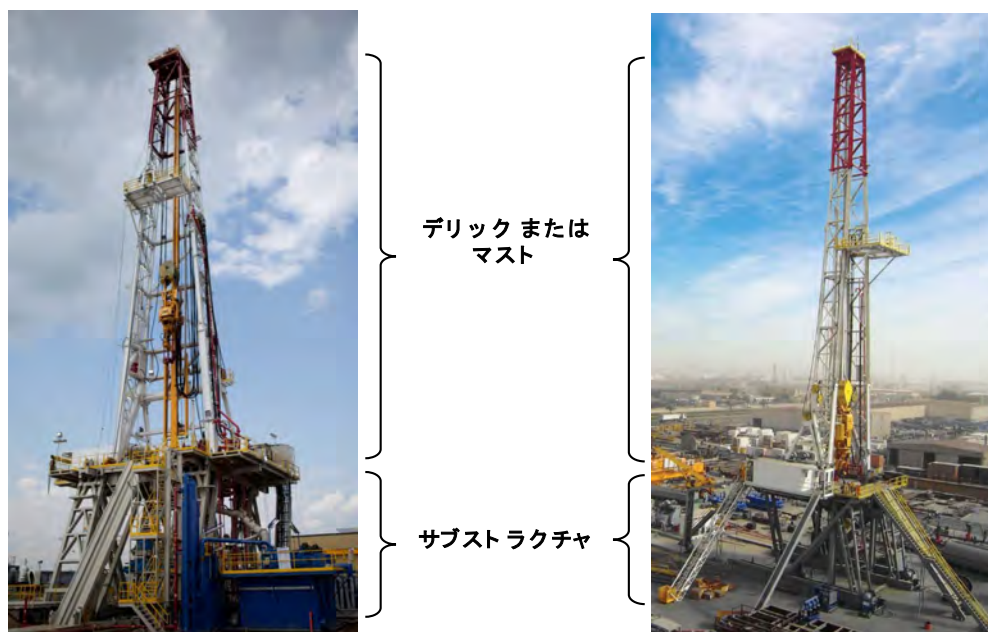


図 3.3.4 陸上掘削リグの例

(出典：NOV 社カタログ)

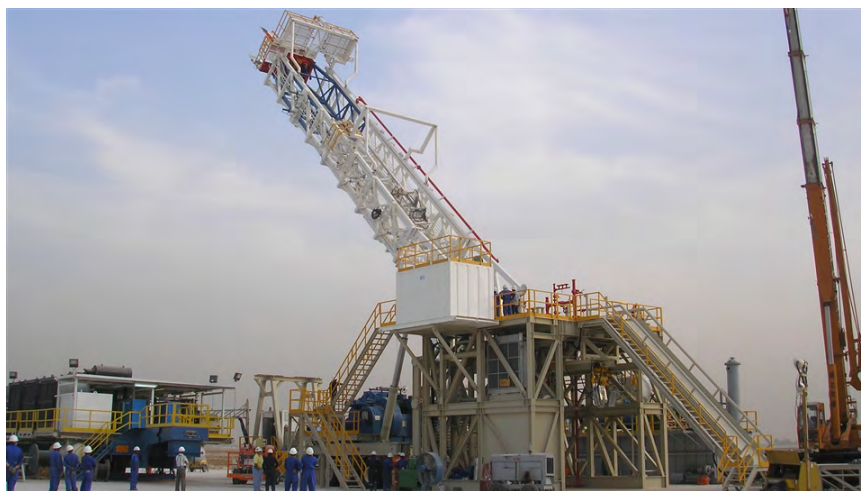


図 3.3.5 リグアップの様子

(出典：Derrick Services (UK) Limited 社ウェブサイト)

ドロークラスとは図 3.3.6 に示すような大型の巻揚げ装置で、リグフロア上またはサブストラクチャ横の地表に設置され、檣頂部に取り付けられたクラウンブロック(定滑車)を介してワイヤーロープを巻き取りおよび繰り出すことによってトラベリングブロック

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

(動滑車)を上下に移動できる。ドロワークスには、巻揚げドラムの回転動力源と回転を止めるためのディスクブレーキやバンドブレーキなどのメインブレーキが備えられている。

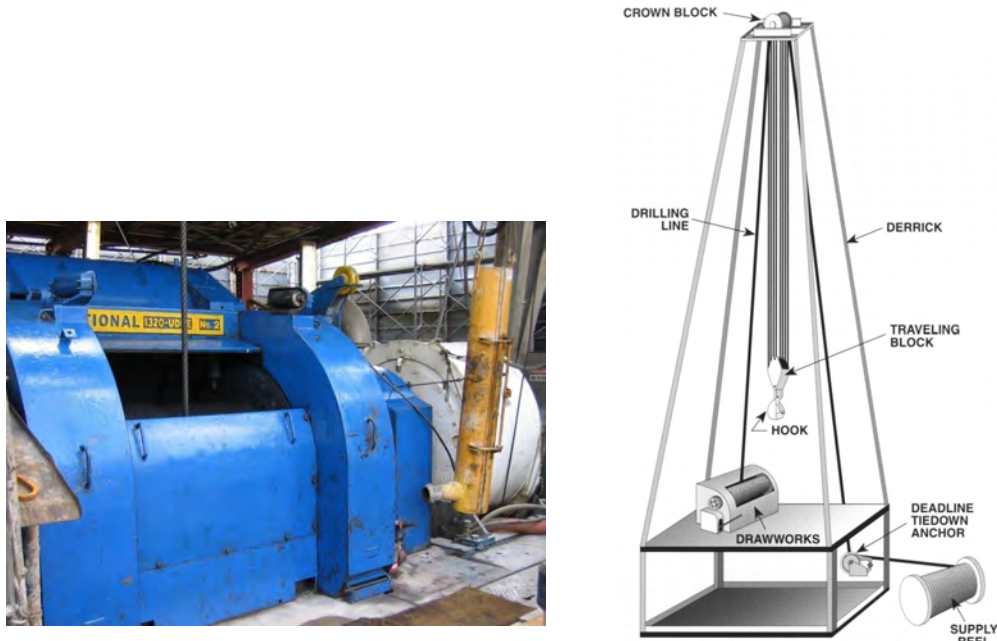


図 3.3.6 ドロワークスと巻揚げ昇降システムの概略

(出典：(左) 筆者撮影 (右) Baker, 2001)

坑底のビットに回転を与える標準的な方法は、地上でドリルストリングを回転させるものである。傾斜掘削 (directional drilling) などではドリルストリングを回転させずにビットだけを回転させる技術が用いられるが、これは 3.3.7 項で後述する。ドリルストリングを回転させる方式には図 3.3.7 に示すケリードライブとトップドライブの 2 種類がある。

ケリードライブでは、ドリルフロア上に配置されたロータリーテーブル (rotary table) 中央開口部にマスターブッシングを装着し、その上にケリー (kelly) を中通したケリーブッシングをラッチすることによって、ロータリーテーブルの回転をドリルストリングに伝達する。

トップドライブシステム (TDS : Top Drive System) はパワースイベルとも呼ばれ、図 3.3.8 のような構造をしており、モーターにつながるパイプハンドラーにドリルパイプ (DP : Drill Pipe) を直接接続し、ロータリーテーブルを用いずにドリルストリングを直接回転する装置である。ケリードライブではケリーブッシング内のケリーの可動範囲の制約のためドリルパイプを 1 本ごとに繋ぎ足していくが、トップドライブではあらかじめドリルパイプを 3 本繋いで組み立てておいたスタンド (stand) ごとに繋ぎ足しができるため作業効率の向上が図れる。また、トップドライブは泥水循環を停止することなくドリルストリングを回転させながら引き上げることができ、パイプの抑留 (pipe sticking) 防止に有効である。なお、ドライブ方式に拘わらず、パイプ類の揚降管時は、ロータリーテーブルのマスターブッシングにスリップをセットして坑内に吊り降ろしているパイプ類の荷重を支える。

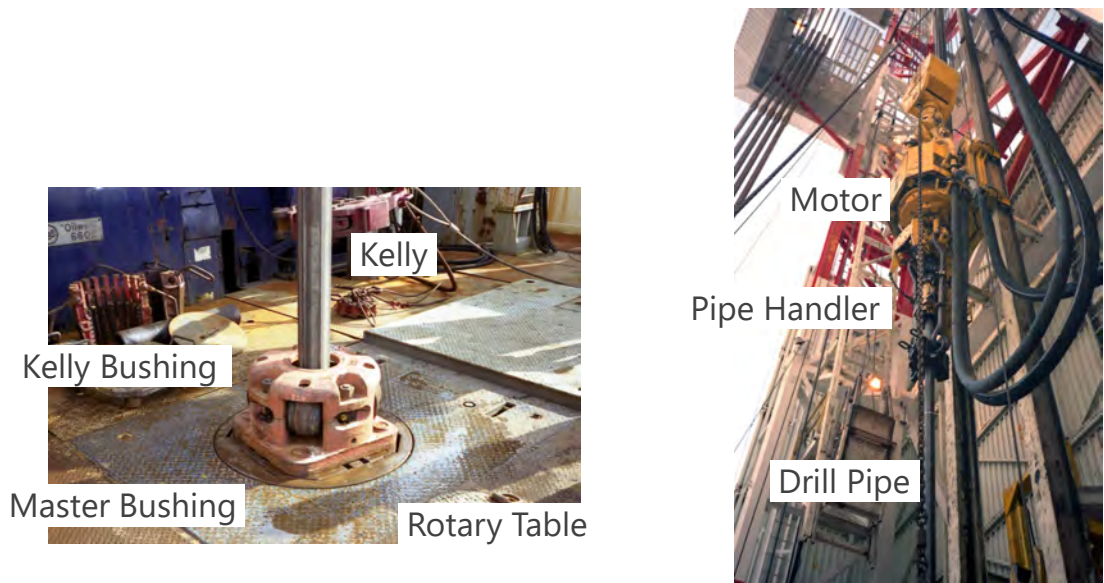


図 3.3.7 ケリードライブ方式（左）とトップドライブ方式（右）（出典：筆者撮影）

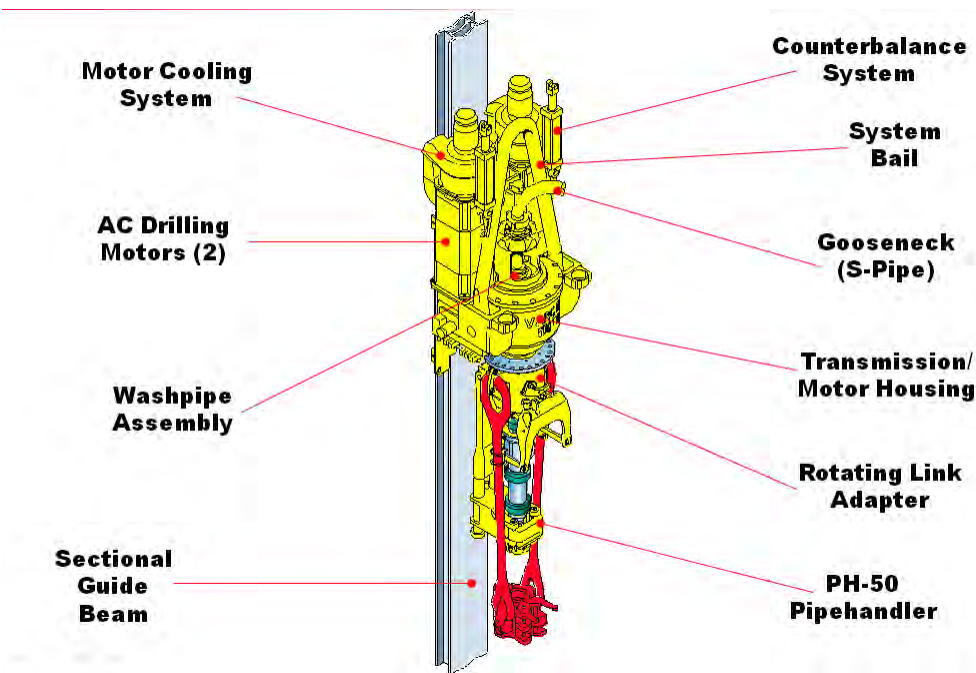


図 3.3.8 トップドライブの例

(出典：Varco 社資料)

(2) ドリルストリング

ドリルストリングを構成する主要なパイプ類は、図 3.3.9 に示すように地上部から順にスイベル (swivel)、ケリー、ドリルパイプ、ドリルカラー (DC : Drill Collar)、ビットである。

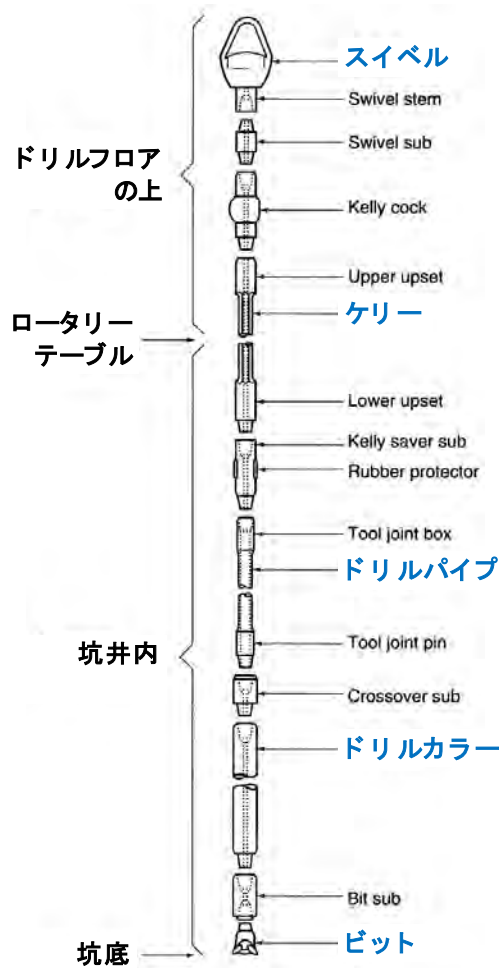


図 3.3.9 ドリルストリング構成要素

(出典：Nguyen, 1996 に加筆)

スイベルは図 3.3.10 に示すような一種の回転継ぎ手で、トラベリングブロックのフックに掛けられ、自由に回転可能な下部のスイベルシステムにケリーパイプをネジ接続する。スイベル内には掘削流体の流路があり、泥水ポンプ (mud pump) から吐出された掘削流体はグーズネックからスイベル内に入り、スイベルシステムを通過してドリルストリング内部へ供給される。ケリーは外形が六角または四角形の断面をした中空パイプで、この角断面の外形によってケリーブッシングと噛み合い、ロータリーテーブルの回転をケリーに伝達できる。ケリーの上下端にはドリルパイプの付替え時に泥水の流れを遮断するケリーコックと呼ばれるボールバルブを接続する。トップドライブシステムにおいては、スイベルとモーター、ケリーコックに相当する遮断弁、ドリルパイプを接続するドライブシャフトが一体となっており、これらが櫓内のガイドレールに沿って昇降する。

ドリルパイプは、いわゆる掘管と呼ばれる中空のパイプで、標準的なもので 1 本の長さが 30 ft、大型櫓を搭載した掘削リグでは 40 ft のものを掘削深度に応じて必要な本数繋ぎ合わせて用いられる。ドリルパイプには通常大きな引張とねじれ (トルク) の力が作用するので、必要な強度を持ったグレードのパイプを選定して用いる。パイプのグレードは API (American Petroleum Institute) の規格で X-95、G-105 などと表示される。またパイプ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

類はネジ接続され、ドリルパイプ両端には管体の径よりも外形の大きなツールジョイント (tool joint) と呼ばれる継手が溶接されている。ツールジョイントのうち、上部のメスねじ側をボックス、下部のオスねじ側をピンと呼ぶ。

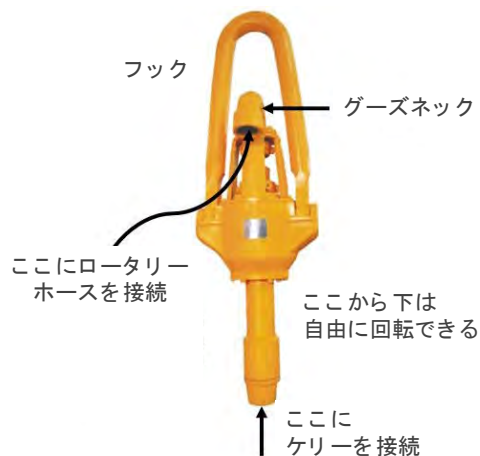


図 3.3.10 スイベル

(出典 : Viscosity Hydrochloric Acid ウェブサイト)

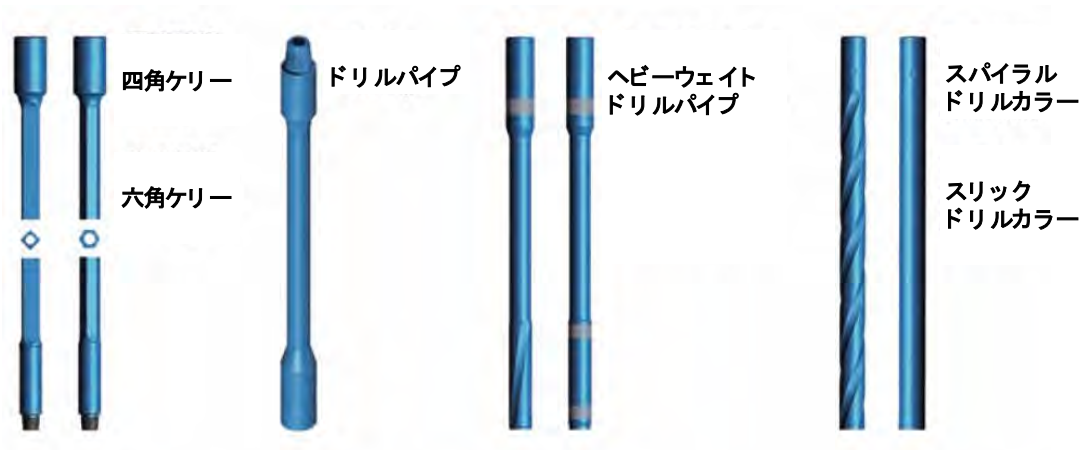


図 3.3.11 ドリルストリングを構成する鋼管

(出典 : Heilongjiang North Shuangjia Drilling Tools ウェブサイト)

ドリルカラーは、重量の重い肉厚のパイプで、ドリルパイプと異なり管体とネジ部は一体となっており外径も同じである。ドリルストリングを坑井内に吊り降ろしている間は、ドリルストリング全体が引張の状態にある。さらにドリルストリングを降下して行ってビットが坑底に接地すると、地上での吊り荷重が減少し、その減少分がビット荷重としてビットに作用する (図 3.3.12)。このとき、ドリルストリングの下部には圧縮状態の領域が発生する。ドリルパイプは引張には強いが圧縮には比較的弱く、圧縮の軸応力によって座屈しやすい。対して、ドリルカラーは圧縮応力に強く作られているので、引張と圧縮の中立点 (ニュートラルポイント) がドリルカラー長の範囲に入るように、ビットに作用さ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

せる必要荷重をもとにドリルカラー長が決定される。

この他に、ヘビーウエイトドリルパイプ (HWDP : Heavy Weight Drill Pipe) と呼ばれる、ドリルパイプ管体中央部に座屈に耐えられるようにアップセットを設けたパイプもしばしば用いられる。HWDP は、強度特性の大きく異なるドリルパイプとドリルカラーの接続部の疲労破壊を防止する目的で両者の間に挿入される他、高傾斜掘削時に圧縮状態でドリルパイプを使用しなければならない場合に用いられる。

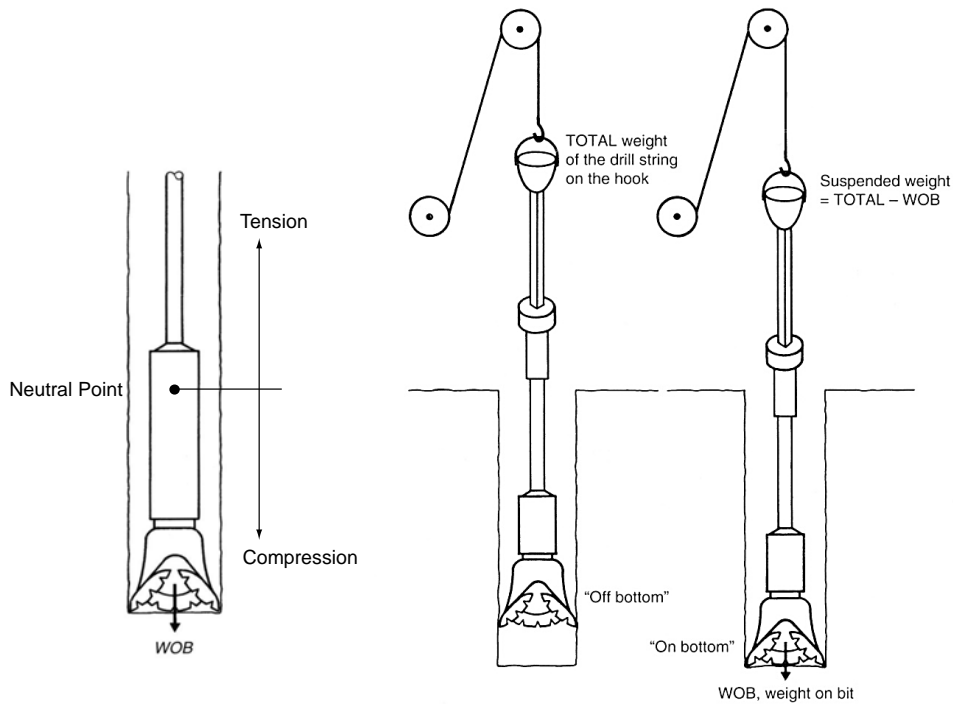


図 3.3.12 ドリルストリングに作用する力

(出典 : Nguyen, 1996)

(3) ビット

ロータリー掘削用ビットは、回転機構の有無によってローラービット (roller bit) とフィックスカッタービット (fixed cutter bit) に大別でき、図 3.3.13 のように分類できる。このなかで、現在もっともよく使われているのはローラーコーンビット (roller cone bit) と PDC (Polycrystalline Diamond Compact) ビットであり、PDC ビットでは掘削の難しい硬質の地層など状況によってインプレグネイテッドビットが使用される。

ローラービットは、ローラーコーンビット、スリーコーンビット、トリコーンビットなどとも呼ばれ、図 3.3.14 のようにベアリング機構を介して自由に回転できる三つのコーンを持っている。ビットの回転に伴い、刃先と坑底面との摩擦によりコーンが強制的に回転させられ、一つひとつの刃先が打撃・圧縮作用と同時に引きずり・すくい作用によって岩石を破砕する。刃先の種類によって、歯車様の形状をした刃先を持つミルドーツビットとタングステンカーバイド合金製のチップをコーンに埋め込んだインサートビットの 2 種類がある。衝撃破壊作用を持つため、とくにインサートタイプのローラービットは非常

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

に硬質の地層の掘削にも有効である。

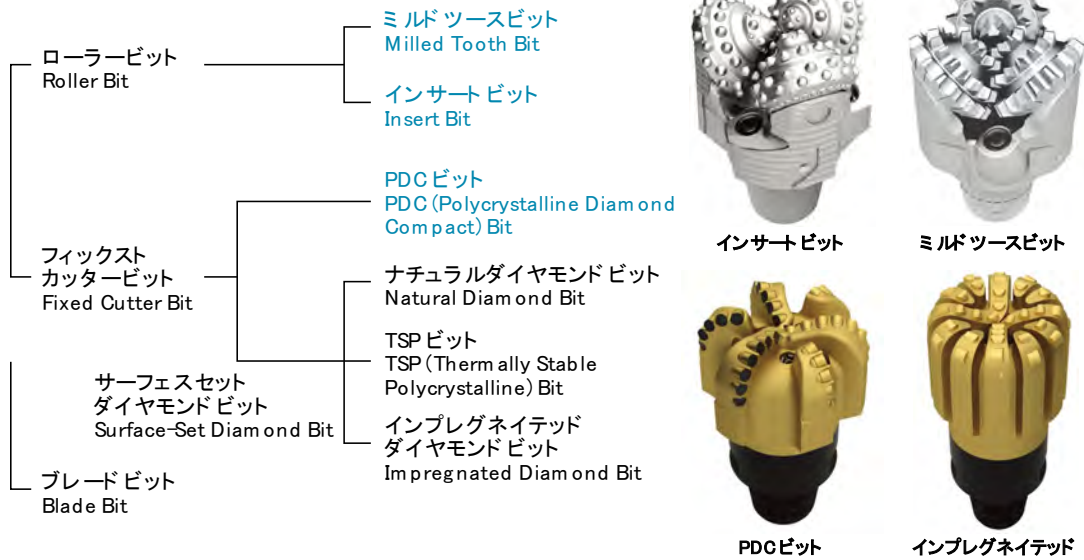


図 3.3.13 ロータリー掘削ビットの分類

(出典 : Baker Hughes 社カタログ)

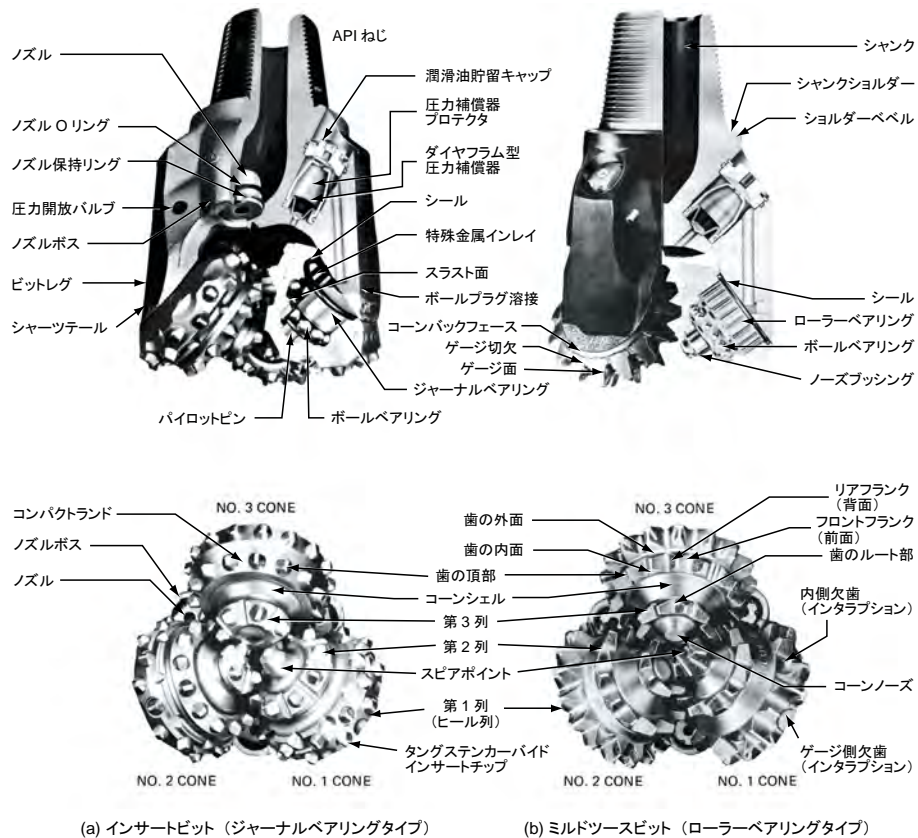


図 3.3.14 ローラーコーンビット

(出典 : Hughes Tool 社カタログに加筆)

フィクストカッタービットは図 3.3.15 のような回転部位を持たないビットで、古くか

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

ら使われているダイヤモンドビットに加えて、近年もっともよく使われるのはPDCビットである。PDCビットは、タングステンカーバイドの母材上に多結晶人工ダイヤモンド焼結体を接合した刃先が、鋼材の機械加工または粉末冶金製法によって形成したボディの表面に埋め込まれている。フィックストカッタービットは、切削あるいはせん断作用のみによって岩石を破壊するので、超硬質の地層には不向きなことが多いが、とくにPDCビットはローラーコーンビットに比べて非常に掘進速度が速く寿命が長い優れたビットである。

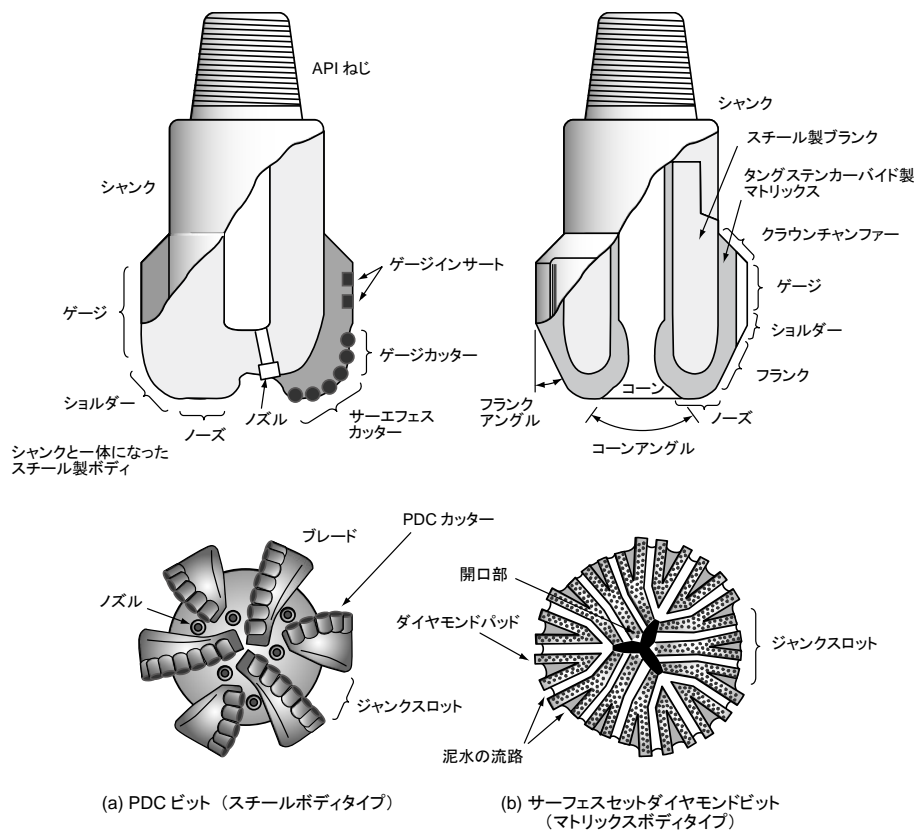


図 3.3.15 PDC ビットとダイヤモンドビット

(4) 泥水循環システム

泥水は地上のポンプからドリルストリングの中を通過して坑底まで送られ、ビットのノズルから排出される噴流が掘屑を伴って、ドリルストリング外側の坑壁との間のアニュラスを通過して地上まで戻る。戻ってきた泥水は、掘屑を取り除き粘性・比重などの性状を調べた後、再びポンプによって坑底へ送られる (図 3.3.16)。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

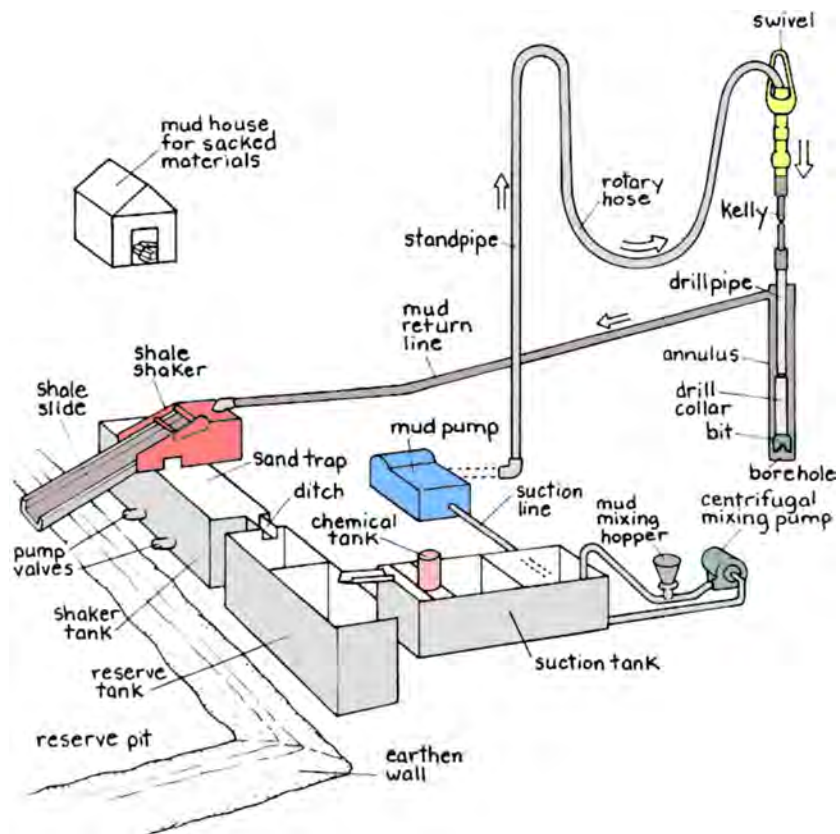


図 3.3.16 泥水循環システム

(出典：Government of Alberta, Employment and Immigration, 2009)

泥水ポンプは、大馬力、高吐出圧、大吐出量の横置き式ピストンポンプで三筒単動型（トリプレックス）がよく用いられる。ライナー径とピストンのストローク数から吐出量と最大使用圧力が決まる。ポンプのサクション（吸い込み）側は泥水タンク（ピット）に、デリベリ（吐出）側は配管、スタンドパイプ、ロータリーホースを通してスイベルに繋がる。

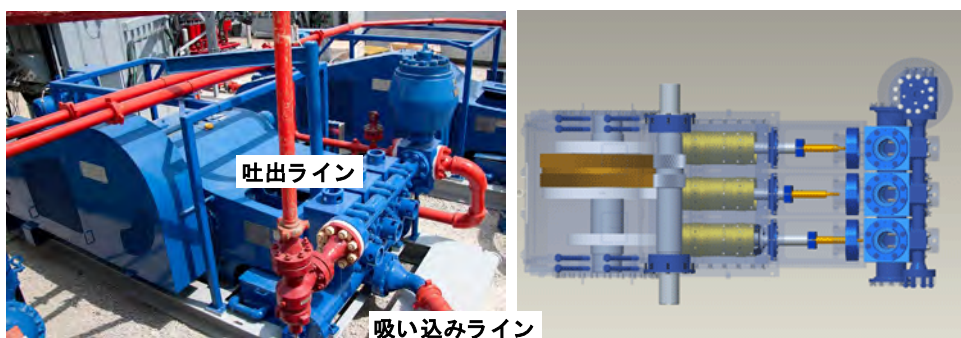


図 3.3.17 トリプレックスポンプ

(出典：(左) NOV社ウェブサイト (右) Upstream Pumping ウェブサイト)

泥水の作液および坑井から地上に戻ってきた泥水の処理・調整には、アクティブマッドシステムが採用されることが多い。リムーバルセクション、アディションセクション、サクション/チェックセクションの三つにタンクエリアが分かれる。リムーバルセクション

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

では、坑井から戻ってきた泥水からソリッド分とガスを分離・除去する。ソリッドコントロール機器として、最初に掘屑等を取り除く振動ふるい装置であるシェールシェーカー (shale shaker)、より細かい粒子を取り除くためのハイドロサイクロン、マッドクリーナー、セントリフュージなどが用いられる (図 3.3.18)。アディクションセクションでは、泥水添加剤いわゆる調泥剤を加え、十分に攪拌して循環中の泥水の性状の調整や新規に泥水を作液する。最終段となるサクション/チェックセクションでは、泥水は十分に均質化され、泥水試験にてチェックされる。

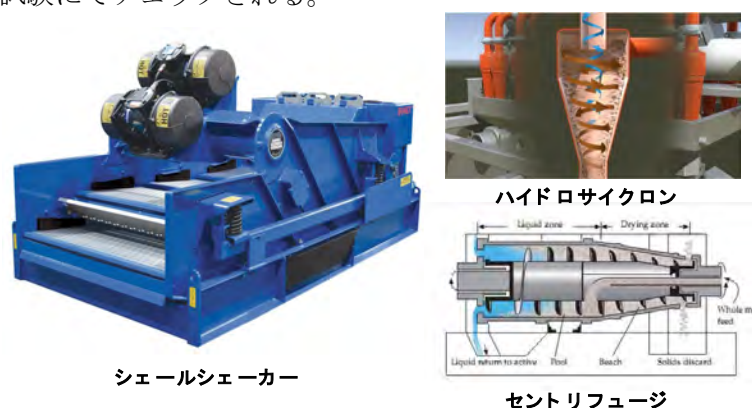


図 3.3.18 ソリッドコントロール機器

(出典：(左) NOV 社ウェブサイト

(右上) Drying Shaker ウェブサイト (右下) MI-SWACO 社カタログ)

(5) 噴出防止装置 (BOP : Blowout Preventer)

坑井内の泥水圧力が地層圧力より小さくなると地層内の油やガス、水といった流体が坑井内に流入し、これを放置すれば高圧の流体が地上まで噴き上げてくる暴噴事故につながる。暴噴を防ぐために、坑口には坑井を密閉できる高耐圧の噴出防止装置と呼ばれる装置が必ず備え付けられる。BOP はアニューラー型とラム型の 2 種類に分けられる。

アニューラー型 BOP はドリルパイプの周囲をぐるりと囲んだリング状の弾性体 (強化合成ゴム) を、油圧によって締め付けるようにしてアニューラス部分を密閉する (図 3.3.19)。ドリルパイプの直径によらずアニューラスを密閉でき、油圧の加減によっては締め付けた状態でドリルパイプを動かすことも可能である。

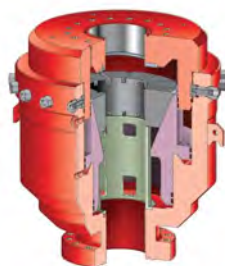


図 3.3.19 アニューラー型 BOP

(出典：Hydraulic & Pneumatics ウェブサイト)

ラム型 BOP は、スライド弁のような機構によって二つのラムで両横から挟むようにして

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

坑井を密閉する（図 3.3.20）。標準的なラムであるパイプラムは使用するドリルパイプの直径にあわせた半円形の切り欠きがあるもので、ドリルパイプを挟んでアニュラス部分のみを密閉するため使用するドリルパイプの直径に合ったラムを選択する必要がある。この他にもラムのタイプには様々なものがあり、複数のパイプ径に対応したラムはバリアブルポアラムという。ブラインドラムはラムの先端に切り欠きがなく、ドリルパイプが無い状態でも坑井を完全に密閉できるものである。シアラムはラムの先端部が刃のように鋭くなっていてドリルパイプなどを切断できるものである。パイプを切断して完全に坑井を密閉できるタイプはブラインドシアラムという。

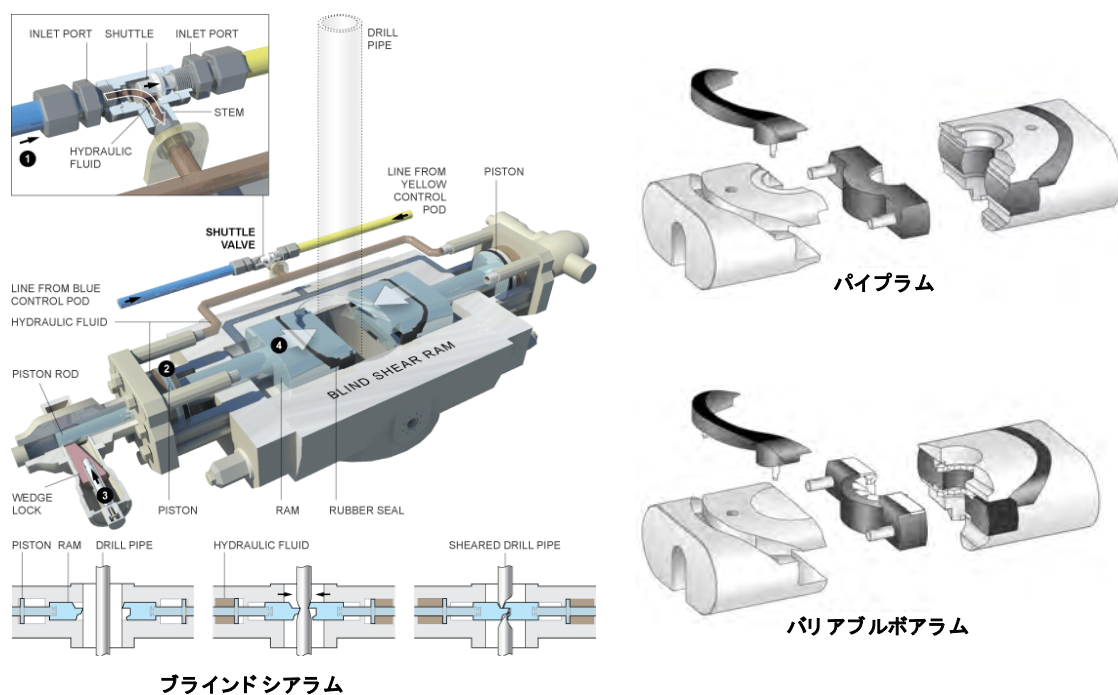


図 3.3.20 ラム型 BOP

(出典：(左) New York Times ウェブサイト (右) Worldwide Oilfield Machine 社カタログ)

BOP はサブストラクチャ内部のドリルフロア下に設置され、さまざまな状況に対応できるように複数の BOP を積み上げて構成した BOP スタックの形で用いる（図 3.3.21）。また、以上のような構造上の理由により、一般にラム型に比べてアニュラー型は耐圧が低い。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

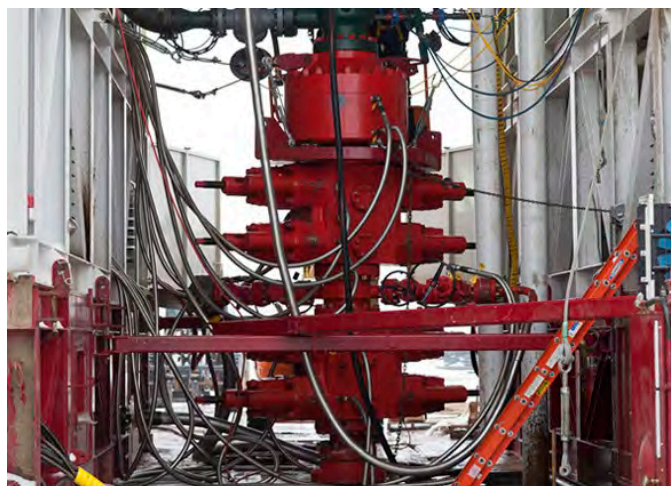
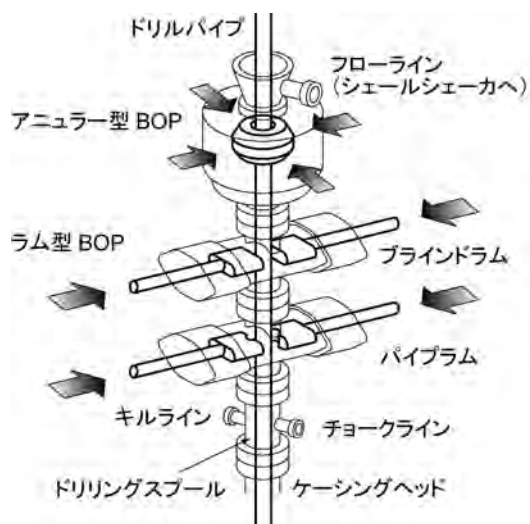


図 3.3.21 噴出防止装置 (BOP)

(出典：(左) 筆者作成 (右) Nevada Museum of Art ウェブサイト)

3.3.3 掘削流体 (泥水)

(1) 掘削流体の機能と性質

掘削流体は掘削の運搬以外にも、次のような重要な役割を持っている。

- 坑井内の圧力を制御し地層流体の坑井内への流入や地上への噴出を防止する
- 坑壁を保護し地層の崩壊を防ぐ
- ドリルストリングと坑壁との摩擦を減らす
- 坑井内機器を冷却する
- 地下の情報を得る

掘削流体は、主に水系泥水 (WBM: Water Base Mud) と油系泥水 (OBM: Oil Base Mud) に分けられる。水系泥水は水に粘土などの添加物を混合して懸濁液 (液体中に粘土の粒子が浮遊している状態の溶液) とした泥水、油系泥水は水の代わりに軽油などの油をベース流体として作った泥水である。掘削泥水は非ニュートン流体であり、一般に流動の速度が大きくなるに従って粘度が低下するシアニング性のレオロジー特性を持っている。また、攪拌したり流路の中を流動したりして流体を変形させる力が加えられている間は流動性が高い反面、静置すると高粘度のゲル状になるチキソトロピーと呼ばれる性質をも併せ持っている。これらの性質のために、循環中は十分な流動性がありポンピングし易く、泥水ポンプを停止したときには直ちに掘削が坑井内を沈降してしまうことがない。

通常は地層圧よりも坑井内の泥水の圧力の方が大きくなるようにして掘削するが、このために掘削中は坑井から地層の孔隙の中へとわずかながら泥水が侵入していく。このとき、泥水の成分である粘土鉱物は孔隙を目詰まりさせながら侵入することで、坑壁の表面に泥壁 (マッドケーキ、mud cake) と呼ばれる一種のろ過膜を形成する。泥壁を通して地層内にもろ過水が浸透していく現象を脱水 (filtration loss) と表現し、ろ過水の量を脱水量という。泥壁は坑壁を安定に保って崩壊を防ぎ、ドリルストリングとの摩擦を小さくするなど重要な役割を果たす一方で、油層部分の掘削では坑井近傍の地層の孔隙を目詰まりさせ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

て油やガスの生産能力を低下させる生産性障害 (formation damage) を起こすという副作用も併せ持つ。一般に薄くて強固な泥壁を形成し、なおかつ脱水量の少ない泥水が良い泥水であるとされる。

(2) ベントナイト (bentonite) と分散効果

ベントナイトは掘削流体に添加する添加剤の主剤として用いられ、モンモリロナイトと呼ばれる粘土鉱物を主成分とし、その他に石英や長石などの鉱物が混ざりものとして含んでいる。モンモリロナイトは、結晶構造として3層の膨張性格子をもったスメクタイト類と呼ばれる粘土鉱物の一つであり、八面体の結晶構造をもった Al-O-OH (アルミニウムと酸素と水酸基) の層とそれを挟む二つの四面体結晶構造をもった Si-O (ケイ素と酸素) の層から成る3層をひとつの単位層とし、これが積み重なった薄い不定形の板状結晶構造をしている。3層構造の真ん中の層の Al³⁺イオンの一部が電荷の低い Mg²⁺イオンに置き換わっているために陽電荷が不足し、ベントナイト粒子全体としては負電荷を持っており、この負電荷に対応する Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺などの陽イオンが単位層の表面に吸着されて電氣的に中性を保っている。吸着されている陽イオンの種類によって、Na モンモリロナイトや Ca モンモリロナイトなどの種類に分けられる。

モンモリロナイトは、清水中に入れられると、隣接した単位層の間に水が入り、単位層の間隔が著しく広げられる特性がある。この現象を膨潤という。一般的に坑井掘削用の泥水材料には、膨潤能力の大きい Na モンモリロナイトを主成分とした Na ベントナイトが用いられる。

板状のベントナイト粒子は先に述べたような結晶構造のために、その粒子表面は負電荷を、端面は正電荷を帯びている。水中に懸濁されたベントナイト粒子は、これらの電荷の状態変化によって四つの状態をとる。

- 分散：粒子表面の負電荷が大きいため、粒子が互いに反発しあって個々の粒子がよく分離している状態
- 集合：粒子表面の負電荷が小さいために、粒子の表面同士が接触して大きな粒子となっている状態
- 凝集：負電荷を帯びた粒子表面と正電荷を帯びた端面とが、または端面同士が接触してくっついている状態
- 解膠：粒子端面の正電荷が中和されたり負電荷を帯びたりして表面と端面または端面同士の接触が減少し分離した状態

分散と集合や解膠と凝集の状態は、泥水の粘性、脱水特性、泥壁形成性に密接に関係し、高比重泥水における粘度の増加をうまくコントロールするためには、ベントナイト粒子が適度に分散あるいは解膠していることが望ましい。

(3) 代表的な水系泥水

① ベントナイト泥水

最もシンプルな水系泥水はベントナイトを水に混ぜて懸濁させたベントナイト泥水である。一般に泥水中に微細な固形分が多くなると、ベントナイト泥水は掘削をしている

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

うちに粘性が大きくなったりゲル化しやすくなったりする。ベントナイト泥水は、より深く高圧の地層を掘削するために加重剤としてバライト (barite) を添加した高比重の泥水を使用する必要がある場合に、泥水の性質のコントロールが非常に難しい。その他にも崩壊防止能力が小さい、塩分やセメントに弱くゲル化しやすい、高温に対して不安定であるなどの欠点があり、ベントナイト泥水は、安価で取り扱いが容易であるものの、現在は主に浅層の掘削に使用される。

② リグノスルホネート泥水

ベントナイト粒子の分散や解膠を助けるはたらきをもった添加剤を分散剤 (dispersant) あるいは分散解膠剤といい、分散剤を使用した泥水を分散系泥水、分散剤を一切使用しないベントナイト主体の泥水を非分散系泥水と呼ぶ。リグノスルホネート泥水は、リグノスルホン酸の誘導体 (元の化合物の一部を他の原子や原子群に置換したもの) を分散剤として使用した泥水で、ベントナイト泥水の欠点を補うべく 1960 年代の初めに開発された。この泥水は、一般的には水をベースにして次のような添加物を加えて作液する。

- ベントナイト
- リグノスルホン酸誘導体
- リグナイト (=フミン酸誘導体)
- 苛性ソーダ (=水酸化ナトリウム、pH 調整剤)
- バライト (加重剤)

リグノスルホネート泥水は、泥岩の保護機能が比較的優れている、粘性や比重のコントロールが容易、温度に対する安定性が大きい、塩水やセメントなどの汚染物質に対する耐力が大きい、さらには作液や調泥が容易などの長所があり、安定した泥水として現在にわたって広く用いられている。

③ KCl ポリマー泥水

砂よりも細かい粒子が堆積してできた泥岩、あるいは泥岩の中でも堆積した層面に沿って層状に剥離しやすい性質を持った頁岩 (shale) にはモンモリロナイトのような粘土鉱物が含まれている。泥岩中のモンモリロナイトも掘削泥水中の水に反応して膨潤を起こすので、泥岩層の掘削では坑井内へ迫り出してきたり崩れてきたりといったトラブルが発生し得る。

このため、泥岩層の水和膨潤を抑制して崩壊を防ぐ機能を持った泥水の開発が行われてきた。このような泥水をインヒビテッド泥水 (inhibited mud) と総称する。リグノスルホネート泥水もインヒビテッド泥水の一つであるが、リグノスルホネート泥水の水和膨潤抑制作用や崩壊防止能力は十分ではない。

そこで 1980 年頃に開発されたのが、K イオンが粘土類の膨潤や分散を抑制する作用に非常に優れていることから、KCl (塩化カリウム) を添加剤とした KCl ポリマー泥水である。モンモリロナイトに電気的に吸着され得る陽イオンのうちで K イオンの膨潤抑制力が最も優れていることは以前から知られていたが、凝集力が強すぎるために、従来の泥水添加物では流動性のコントロールが難しいという問題があった。K イオンを多量

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

に含んだ水中でも優れた増粘性や保護コロイド性（ベントナイト粒子を被膜して安定したコロイド状態を維持し泥壁形成性を改善する特性）を発揮するキサントガムのようなバイオポリマーやPHPAなどのポリマーが開発されたことにより優れたインヒビテッド泥水として実用化された。

一般に KCl ポリマー泥水は高比重になると粘性のコントロールが難しくなるため、KCl ポリマー泥水に分散剤であるリグノスルホン酸を添加することもある。KCl ポリマー泥水は現在も広く用いられている優れた泥水である。

(4) 油系泥水

一般的に、経済性や粘性の調整、取り扱いなどの点から主にインバートエマルジョンオイルマッドが使われていて、これを単にオイルマッドあるいはオイルベースマッドといふことが多い。狭義には、油が95%以上の泥水をオイルマッド、15～35%程度の水を加えて乳化剤の添加により油中水滴型のエマルジョン（emulsion）にしたものをインバートエマルジョンオイルマッドという。水中に油滴が分散する水中油滴型に対して水相と油相の関係が逆であるという意味からインバートエマルジョンと呼ばれる。

水系泥水に比べて油系泥水は次のような利点を備えている。

- 泥岩層（あるいは頁岩層）の水和、膨潤を抑制する作用が大きい
- 高温安定性が非常に優れている
- 潤滑性が優れている（水平掘削（horizontal drilling）、大偏距掘削に有効）
- 油層への水の侵入が無いので生産性障害を起こし難い
- 硫化水素や炭酸ガスなどによるケーシングなどの金属腐食を起こし難い
- 腐敗による泥水の劣化が少ない

油系泥水は KCl ポリマー泥水よりもさらに泥岩層の水和、膨潤抑制力が大きく、300℃程度までの高温下で使用可能とされている。また、ベース流体の比重が水より小さいので、低比重の泥水調整が可能である。

(5) SBM（Synthetic Base Mud）

油系泥水には水系泥水を上回る利点があるが、1980年頃から環境に対する規制が厳しくなり、世界的に使用に制限がかけられてきた。従来油系泥水に用いられてきた軽油は非常に毒性が高く、メキシコ湾や北海では軽油ベースの泥水を海洋に投棄することは早くから禁止されてきた。軽油の毒性は、20%以上含まれる芳香族炭化水素に由来するとされる。芳香族成分を含まない飽和炭化水素からなる油のうち石油から作られるものは鉱物油と呼ばれ、比較的毒性であるとされるが、わずかに芳香族炭化水素が含まれる。油系泥水の利点を損なわず芳香族炭化水素を全く含まない、より毒性の低い合成油をベースとした泥水 SBM の開発が進められ、現在では油系泥水に代わって多くの SBM が使用されている。

3.3.4 泥水比重のコントロールと坑壁安定性

(1) 等価泥水比重（EMW：Equivalent Mud Weight）の概念

ある密度をもった均質な泥水によって、坑井内が地表まで満たされているとする。ある深度において泥水に作用している圧力は、地表からその深度までの泥水の静水圧で表される。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

圧力の勾配（深度の変化に対する圧力の変化の割合）を考えると、重力単位系では重力加速度の項が省略されるので、圧力を深度で除した圧力勾配は密度と同じ次元になる。掘削工学では圧力勾配はそれに等価な泥水の密度または比重で表現することが多く、これを等価泥水比重という。密度と比重とは本質的に異なるものであるが、CGS 単位系 g/cm^3 で表した密度と比重の値がほぼ同じになるため、掘削工学では混乱のない範囲で泥水密度と泥水比重は同じ意味で用いられる。また、比重の英略語である「SG」を単位のように用いて、本来無次元量である比重を 1.2 SG などと表現することも便宜上行われる。

坑井内に静止している泥水に対して、循環中の泥水は流動による摩擦圧力損失や掘削によって発生した掘屑の濃度上昇による密度の増加が生じる。これらをすべて含めた泥水循環中の圧力勾配を密度に換算したものを、等価循環泥水比重（ECD：Equivalent Circulating Density）という。

坑内の泥水圧力が坑井周囲の地層の間隙水圧よりも小さいと、地層流体が坑内へ流入し、場合によっては暴噴事故につながる。逆に坑井内の圧力が過大になり地層破壊圧力（formation fracture pressure）を超えると、地層に亀裂が生じ、地層中へ泥水が侵入して泥水循環が正常に行えなくなる逸泥トラブルが発生する。このため、掘削流体の比重を調整して坑内の泥水圧力をコントロールする必要がある（図 3.3.22）。泥水比重を大きくするためには、バライトとよばれる高比重（ケイ素を主成分とした普通の岩石の比重が 2.6 前後であるのに対してバライトの比重は 4.2 以上）の鉱物である重晶石の微粉末を加重剤として添加する。

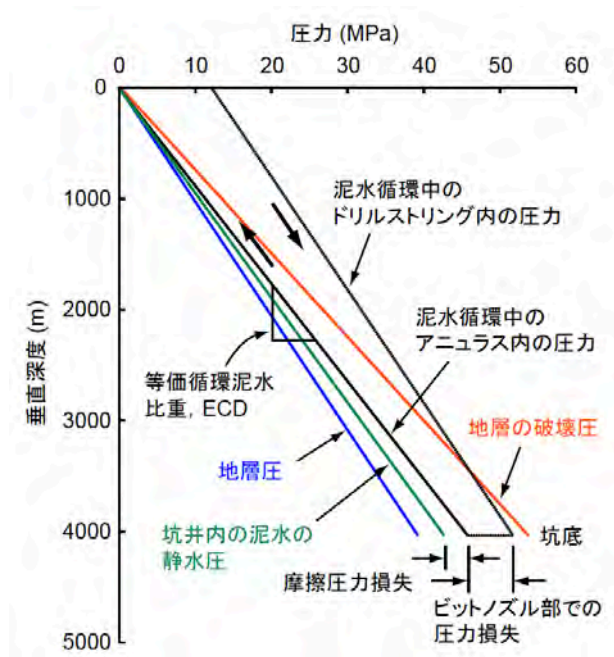


図 3.3.22 坑井内の泥水圧力の制御

(2) 地層が有する圧力

① 岩圧（overburden pressure）

地層は岩石粒子とその隙間を満たしている地層流体とで構成されている。ある深度より上方に堆積している岩石およびその中に含まれる地層流体の荷重として作用している

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

圧力を岩圧という。オーバーバーデン圧、自荷重圧、累積荷重圧などとも呼ばれる。岩圧は地表からその深度までの地層のかさ密度（岩石粒子と孔隙流体をあわせた全体の密度）の総和に重力加速度を掛けた形で表される。

② 地層圧 (formation pressure)

地層の孔隙を満たしている流体に作用している圧力を地層圧という。地層圧が地表からその深度までの地層水 (formation water) の静水圧に等しいような地層を正常圧層といい、地層圧が静水圧より大きい地層を異常高压層 (abnormal pressure formation)、小さい地層を異常低压層という。

③ 破壊圧

厳密な定義ではないが、地層の破壊圧は孔隙内の流体にそれ以上の圧力をかけると地層にき裂が生じてしまう圧力であるといえる。掘削作業においては、坑井内の泥水によって破壊圧より大きい圧力を地層にかけると、逸泥の危険が生じる。逸泥とは、坑井内の泥水が地層内の割れ目や空洞、浸透性の高い地層中などに失われる現象をいう。崩壊や掘管の抑留、噴出や暴噴などの重大な掘削障害を引き起こす原因ともなるので、十分な対策が必要になる。掘削計画を立てる際には、あらかじめ地層の破壊圧を知っておく必要がある。

(3) 泥水比重ウィンドウ

掘削中の泥水圧力は、地層流体が侵入したり坑壁が崩壊することの無いように十分に高く、かつ地層にき裂を生じて逸泥を起こさないように十分低い必要がある。したがって、旧来、泥水比重、正確には泥水循環中の ECD を地層圧と破壊圧の間に収まるようにコントロールすると言われてきた。しかし、これは古典的な地層の圧力に関する理論に基づくものであり、近年ではジオメカニクスと呼ばれる坑井周囲の作用する応力解析に基づく坑壁安定性理論が展開されている。坑壁を安定させるための泥水圧力は、地層圧よりも大きな値をとるブレイクアウト圧力（圧潰圧力、collapse pressure）よりも大きく、掘削誘発引張破壊 (DITF : Drilling Induced Tensile Failure) 圧よりも小さくコントロールすることが推奨されている。DITF 圧は古典理論では明確に定義しきれなかった破壊圧の代わりに用いられるもので、応力解析における定義も明確で、リークオフテスト (LOT : Leak Off Test) から値を求めることができる。DITF 圧力として、同じくリークオフテストから求めることができる地層の最小主応力を用いることもできる。

以上の概念を、泥水比重をコントロールすべきウィンドウとして表現したものが図 3.3.23 である。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

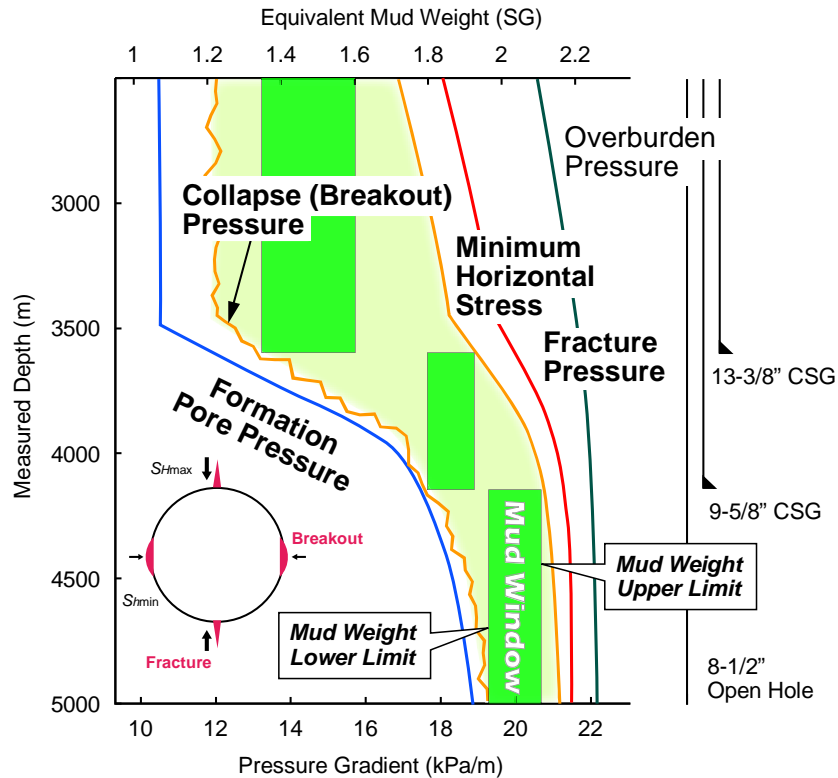


図 3.3.23 泥水比重ウィンドウ

3.3.5 ケーシング計画

(1) ケーシングの種類

ケーシングには次のような役割がある。

- 坑壁の崩壊防止
- 逸泥層、湧水層、ガス層の遮断 (zonal isolation)
- 坑口装置 (wellhead assembly) ・防噴装置の支持
- ドリルストリング回転トルクの軽減
- 生産層の仕上げ

これらの役割、目的ごとに接地するケーシングの深度が異なり、それぞれに次のような呼び名がつけられている。

- コンダクターパイプ (conductor pipe) : 坑口装置等の支持
- サーフェスケーシング (surface casing) : 地表付近の帯水層などの保護
- 中間ケーシング (intermediate casing) : 高圧層や崩壊層の対策として必要な段数
- プロダクションケーシング (production casing) : 生産層の仕上げ
- ライナーケーシング (liner casing) : 地上の坑口から繋がっておらず、前段のケーシング下部の内側に吊り下げられるように設置されるタイプのケーシング
- タイバックケーシング (tie-back casing) : ライナーケーシング頭部から坑口装置までを後から繋ぐ

坑径とケーシング径は、必要な中間ケーシングの数が決まっていれば、最終の生産層の坑径から決定していくことができる。標準的な坑径とケーシング径の組合せをチャートに

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

したものが図 3.3.24 であり、例えば生産層を 8-1/2 inch 径のビットで掘削して 7 inch プロダクションライナーで仕上げたいとすれば、その上部は 12-1/4 inch 径のビットで掘削して 9-5/8 inch 中間ケーシングをセット、17-1/2”径のビットで掘削して 13-3/8 inch 中間ケーシングをセット、26 inch 径ビットで掘削して 20 inch サーフエスケージングをセット、コンダクターパイプは 30 inch、のようになる。

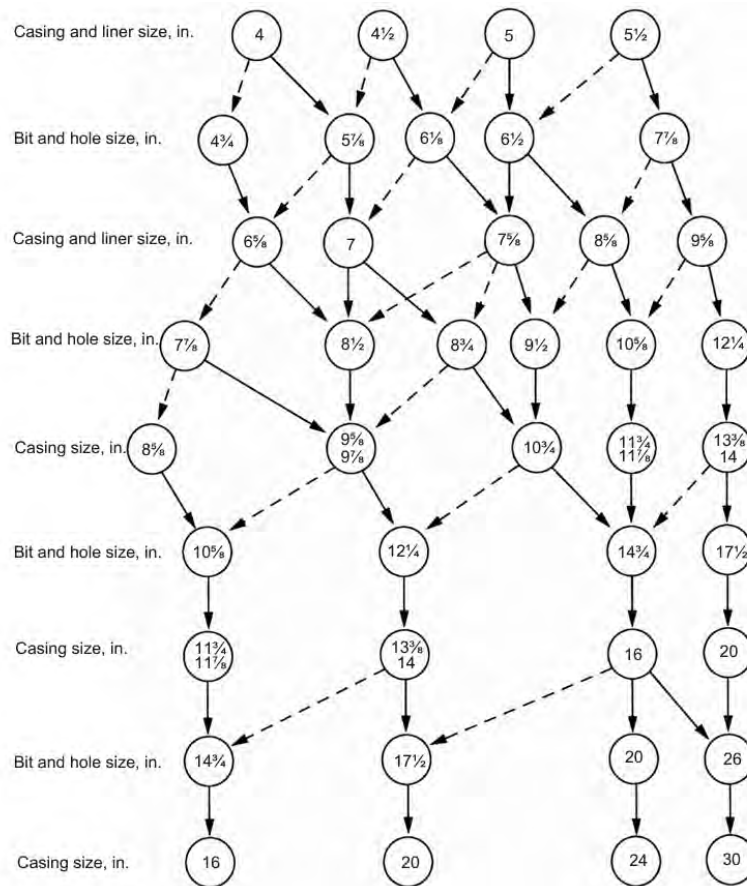


図 3.3.24 坑径およびケーシング径選択チャートの一例

(出典 : Mitchell and Miska, 2011)

(2) ケーシング深度の決定

ケーシングの設置深度および設置数を決めるときの基本的な考え方は、泥水比重と地層の破壊圧との関係に基づいている。これを図で表したものが図 3.3.25 で、グラフの縦軸には坑井の垂直深度を、横軸には圧力勾配を等価泥水比重による表示と併せて示してある。深度 3,000 m ぐらいまでの地層圧は正常圧で、それより以深は異常高压層になっている。

いま、深度 4,600 m に油・ガスを生産するためのプロダクションケーシングを設置して坑井を仕上げたいとする。深度 4,600 m を掘削するためには、4,600 m における地層圧力勾配の値に若干の余裕をみて比重約 2.0 の泥水を使う必要があることがグラフから読み取れる。このとき、地上から深度 4,600 m までのあいだの坑井内はすべて比重 2.0 の泥水が満たされていて、これは点 1 から垂直に立ち上げた直線 (1→2 をさらに上方に延長した直線) によって表される。すると、破壊圧勾配曲線の交点 (点 2) である深度 3,500 m より

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

浅いところでは、泥水圧が破壊圧を超えてしまうことが分かる。したがって、深度 4,600 m を比重 2.0 で掘削するためには、深度 3,500 m 以浅をケーシングで保護しておく必要がある。このような手順を、目標深度から地上方向に向かって 1→2→3→4 と繰り返していくことで、必要なケーシングの本数と深度を決定することができる。実際には、図に示したように破壊圧勾配にも余裕を持たせて設計する。

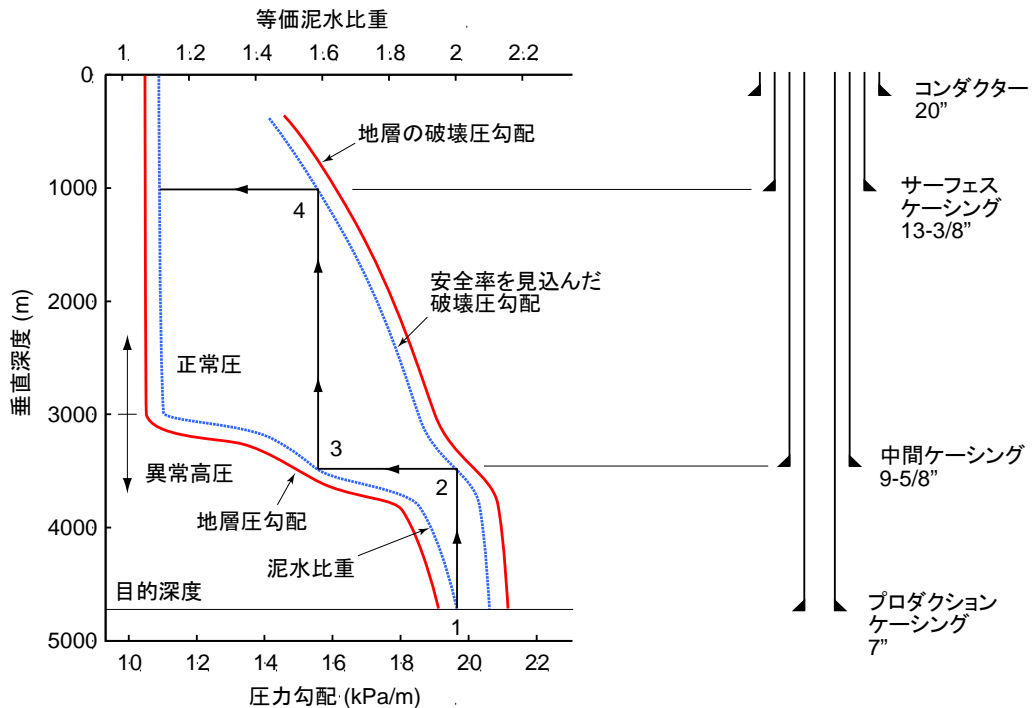


図 3.3.25 ケーシング深度の決め方

(3) ケーシング強度設計

ケーシングパイプに用いられる炭素鋼およびステンレス鋼の引張試験における応力-ひずみ線図は図 3.3.26 のようである。API の規格では炭素鋼の挙動に基づいてケーシングパイプのグレードが決められている。例えば、グレード L-80 のパイプは管の最小耐力が 80 kpsi ($10^3 \times \text{lbf/in}^2$)、最大耐力が 95 kpsi であり、これら二つの耐力は応力-ひずみ線図上の二つの降伏点に相当する。さらに API 規格では L-80 の引張強度は 95 kpsi、破断までの最大の伸びは 19.5%と決められている。つまり、材料試験をした結果この性能に当てはまる特性が得られたものはグレード L-80 となる。

ケーシングの強度設計においては、ケーシングを坑井内に降下して設置するまでに考え得るケーシングパイプに作用するあらゆる最大の力に耐えられるグレードのパイプを選定する必要がある。ケーシングに作用する力および必要な強度として

- 圧潰圧力
- 内圧力またはバースト圧力 (internal or burst pressure)
- 管体強度または引張強度 (casing tensile strength)
- ジョイント強度 (joint strength)

を考慮し、想定されるこれらの最大値に安全率を加えた強度に耐えられるグレードを選

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

択する。

また、石油・天然ガス井では、地層のなかに H_2S や CO_2 が含まれることもあり、腐食対策として、 CO_2 分圧の高いスイート環境 (sweet environment) では高クロム鋼や二相ステンレス鋼が、 H_2S 分圧の高いサワー環境 (sour environment) では応力腐食割れを防ぐためにも低強度の API 規格グレードかクロム・モリブデン鋼が用いられる。 CO_2 と H_2S ともに高濃度の環境では、ニッケル基高合金の使用も検討される (図 3.3.27)。

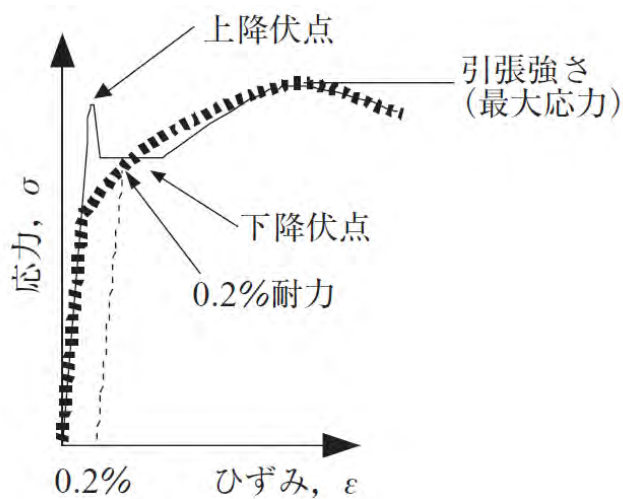


図 3.3.26 鉄鋼の応力-ひずみ線図の例 (実線：炭素鋼、破線：ステンレス鋼)

(出典：正村, 2007)

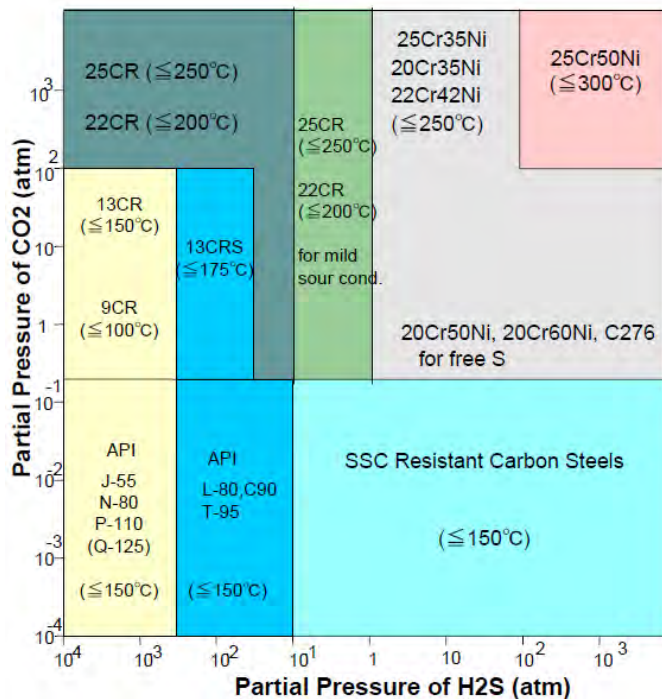


図 3.3.27 鋼管材料選定チャートの一例

(出典：巴・宮田, 2001)

3.3.6 セメンチング (cementing)

(1) 油井用セメント

セメントとは、一般には水で練ったときに硬化する性質を有した無機物質のことであるが、通常は土木・建築用のコンクリートやモルタルの材料となるポルトランドセメントのことを指す。見た目は灰色の粉末で、これに骨材として砂を混ぜて水で練ったものがモルタル、砂と砂利を混ぜて水で練ったものがコンクリートである。ポルトランドセメントは、まず石灰石、粘土、ケイ石、酸化鉄などの原料を粉砕、混合したものを焼成してクリンカーと呼ばれる中間製品を作り、これに石膏を加えて粉砕して製造される。

油井用のセメントは、土木・建築用と違って高温高压下での使用が前提となるため、基本的には骨材を使用せず、高品質のポルトランドセメントに様々な添加剤を加えて、比重や粘性、硬化に要する時間、強度などの性質を調整して用いる。ベースとなるセメントは、APIの規格のなかでA～DおよびG、Hの六つのクラスが定められ、それぞれについて化学成分や物理的性質が規定されている。このうちクラスGおよびHセメントは製造の過程で混ぜものを加えることが禁じられているため、後から添加剤を加えても薬剤の作用の干渉の心配が無く、様々な坑井条件に柔軟に対応できる。このため、クラスGセメントが最も一般的に使用される。

セメントスラリーはポンプで坑井内に送入している間は十分な流動性を保っている必要がある。一方で、坑井内のケーシングの外側に充填された後の硬化時間があまりに長いと作業が中断されコスト増につながる。これらの時間をコントロールする添加剤がそれぞれ遅硬化剤、速硬化剤である。また、セメントスラリーの比重は主に水セメント比に依存するが、およそ1.7～2.0程度である。逸泥層がある場合などはもっと比重を下げる必要があるし、逆に比重を大きくしたい場合もある。しかし、比重調整のために水セメント比を変えるとセメントスラリーの性状が変わってしまうので、水セメント比で調整可能な範囲以上の比重調整は添加剤によって行う。この他にも、主なセメント添加剤には次のような種類のものがある。

- 遅硬化剤・速硬化剤
- 分散剤
- 脱水減少剤
- 低比重添加剤・高比重添加剤

(2) セメンチング方法の種類

セメンチングと呼ばれる作業は、ケーシングパイプを固定するために行われるプライマリセメンチング (primary cementing) と、その後二次的に行われる補修セメンチング (remedial cementing) の二つに大別される。

プライマリセメンチングは、坑井内に挿入したケーシングパイプの外側の坑壁との間の間隙 (アニュラス) にセメントを充填し、ケーシングパイプを固定するものである。プライマリセメンチングは、ケーシングセメンチングとも呼ばれ、ケーシングの種類がライナーの場合にはライナーセメンチングという。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

プライマリセメンチングにおいてセメントを坑井内に送入する方式には、二栓式とインナーストリング方式がある。また、必要な深度区間のケーシングの外側アニュラスを一度にセメンチングしてしまわないで、何段階かに分けて行う多段式セメンチング（multi-stage cementing）または単にステージセメンチングといわれる方法も用いられる。

(3) 二栓式セメンチング

セメンチング、とくにプライマリセメンチングの最も重要な役割は、(1) ケーシングパイプを支持すること、(2) 掘削した坑井が貫いている複数の地層の導通や地層間での地層流体の移動が起こらないようにそれぞれの層を互いに分離あるいは隔離することである。

現在のプライマリセメンチングの基本となっている方法は二栓式セメンチングで、ケーシングパイプの中を通して地上から坑底へセメントを送入する。このときセメントスラリーの前後をセメンチングプラグと呼ばれる二つの栓で挟んで、坑井内の泥水や後押しする置換流体（泥水）と混ざらないようにする。図 3.3.28 に示すように、ケーシングシュー、ケーシングパイプ（通常は 1~2 本分、ケーシングパイプ 1 本の長さは約 12 m）、フロートカラー、必要本数のケーシングパイプの順に接続して坑井内に降下し、以下の手順でセメンチングを実施する。

- 先行水を送入する
- 第一栓（ボトムプラグ）を投入する
- セメントを送入する
- 第二栓（トッププラグ）を投入する
- 置換流体（泥水）で後押しする
- セメントが硬化するまで待機する

セメンチングポンプからの出力をケーシングパイプの最上部に接続する機器をセメンチングヘッドという。二栓式セメンチングのセメンチングヘッドはプラグコンテナと呼ばれる。セメンチングプラグをこの中にあらかじめ格納した状態で接続し、送入流体をバルブ操作によって切替えるときに作業を中断することなく連続的にセメンチングプラグを投入することができる。

先行水はセメントスラリーと泥水が混ざらないようにするとともにケーシング内壁をきれいに掃除する役目を持っている。先行水を先に送入してからセメントとの間に第一栓を投入する方法もある。投入された第一栓はフロートカラーに到達するとその位置で停止するが、加圧によってその栓が破れて、セメントスラリーはケーシングシューを通してケーシング外側アニュラスへと送出されていく。第二栓がフロートカラーに到達したところでセメントスラリーの送入が終了する。フロートシューと呼ばれるタイプのケーシングシューやフロートカラーには逆止弁が内蔵されていて、セメントスラリーが逆流するのを防ぐ。

ケーシングの外側アニュラスに満遍なくセメントを充填するためには、ケーシングパイプが坑井と同心にあって、アニュラスの間隔に偏りがないことが必要である。このため、ケーシングパイプの外側にはケーシングセントライザーと呼ばれる機器を適当な間隔で取り付けて坑井内に降下する。また、セメント送入時にケーシングパイプを動かしてやる

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

操作（管動）も行う。ケーシングパイプの上下動は場合によってはケーシングパイプの抑留などのトラブルの原因となるため慎重な判断が必要であるが、回転は必須ともいわれている。

セメントが硬化するまで待機した後、ポンプによる加圧試験をしてセメントの硬化と漏洩の有無を確認する。また、ケーシングパイプ内に残っているセメントやセメンチングプラグ、フロートカラーおよびケーシングシューのケーシングパイプの内側に張り出している部分をビットで掘削してきれいに浚渫する。

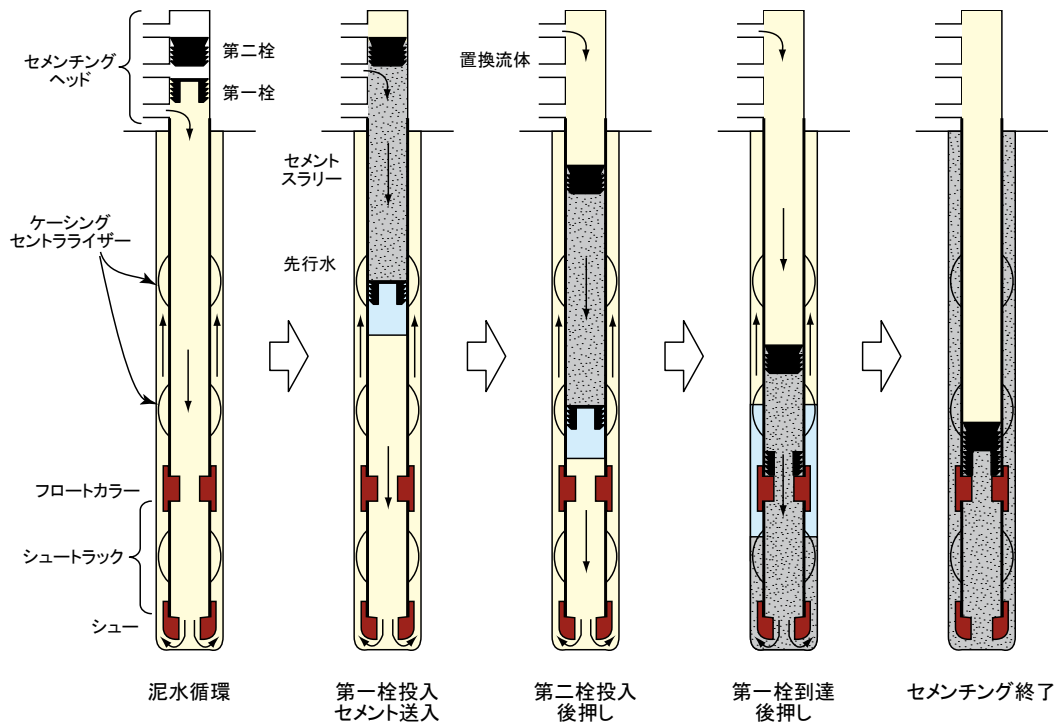


図 3.3.28 二栓式セメンチング

(4) 多段式セメンチング

中間ケーシングはセメンチングを行う深度区間が非常に長くなることが多く、セメンチング作業は難しくなる。まずセメントスラリーが大量に必要となり、またセメント送入作業にも時間がかかるためにセメントが硬化する時間を調整するのが困難になる。さらに、高粘度のセメントスラリーがケーシング外側の狭いアニュラス空間を上昇するときの摩擦圧力損失は大きく、セメンチング区間が長くなる程送入作業に高いポンプ圧力が必要となる。このような場合には、セメンチングを複数区間に分けて行う多段式セメンチングが採用される。

一般的な二段式セメンチングの手順を図 3.3.29 に示す。一段目では、二栓式と同様にプラグを利用してセメントスラリーを送入し、坑底のケーシングシューからケーシング外側アニュラスにセメントを上昇させて充填する。二段目では、あらかじめケーシングの中間部分に組み込まれたステージカラーより上部の区間にセメンチングを行う。ステージカラーには側面にケーシング内部と外部を導通させる開閉口（ポート）がついていて、オープニングボムと呼ばれるフリーフォールプラグを投下してポートを開く。ステージカラー

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

直下付近のケーシング外周部にはセメンチングバスケットと呼ばれる機器が取り付けられ、ポートからケーシング外部に出たセメントがそれより下に移動しないようになっている。

高傾斜坑井のセメンチングでは、二段目に移る際に自由落下で投入するオープニングボムを使用できない。このため、一段目のセメンチングが終了した後に、ポンプによる加圧によってステージカラーのポートが開くシステムも開発されている。

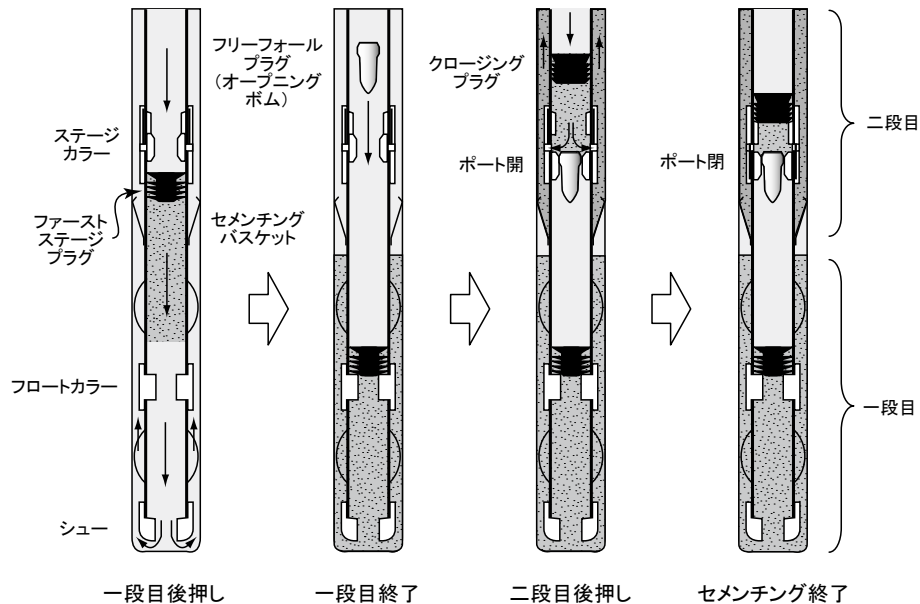


図 3.3.29 二段式セメンチング

3.3.7 傾斜掘削

(1) 傾斜坑井の概要

人類がもっとも深く掘った坑井の深度は、ロシアの科学掘削プロジェクトにおけるコラ SG-3 号井における 12,261m であるが、石油開発を目的とした深度掘削の深度記録は米国オクラホマ州で 1974 年に掘削された Bertha Rogers 1 号井の 9,583 m である。これらの坑井は垂直に掘削されたものであるが、意図的に坑井の軌跡（坑跡）を曲げて、つまりコントロールしながら傾斜した坑井を掘削することを傾斜掘削という。傾斜坑井には目的は形状によって図 3.3.30 のような種類がある。水平坑井（horizontal well）は、油ガス層のより広い範囲をカバーするように水平方向に分布する油ガス層に沿って坑井を水平に掘り抜き、生産効率を向上させることを目的としている。そのため、MRC（Maximum Reservoir Contact）坑井という呼び方をすることもある。深度の異なる複数の油ガス層が広がっているときには、地上から 1 本の坑井を掘削し、そこからそれぞれの油ガス層にアクセスするように水平坑井を複数掘削するマルチラテラル坑井（multilateral well）が掘られることもある。また、経済性や環境保全などの問題から、目的の貯留層の真上から掘削することが困難である場合に、ターゲットとなる油ガス層までの水平偏距が大きくなるように掘削される坑井を大偏距坑井（ERW：Extended Reach Well）という。

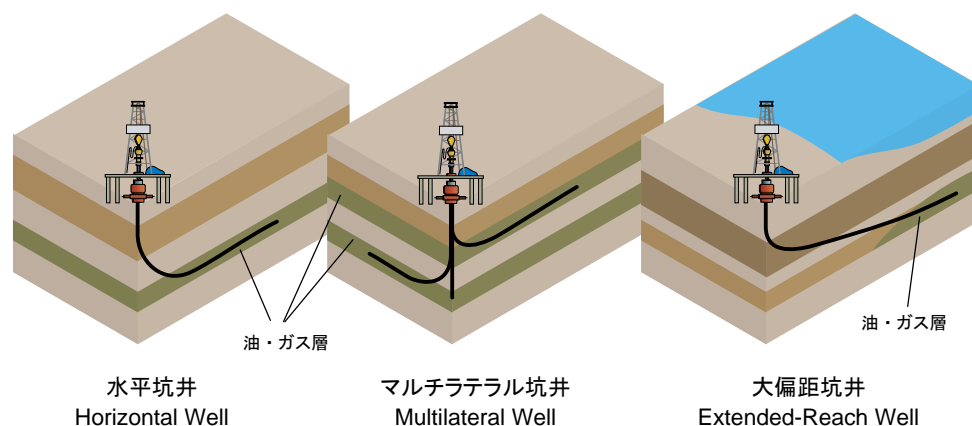


図 3.3.30 さまざまなタイプの傾斜坑井

これまでに傾斜掘削によって掘削されたおもな坑井の最終到達地点の垂直深度と水平偏距をプロットしたのが図 3.3.31 である。大偏距坑井の定義は、一般に、水平偏距が垂直深度の 2 倍以上の坑井とされているが、それよりもはるかに偏距の大きい坑井が既にいくつも掘削されている。2008 年に中東カタール沖の Al Shaheen 油田において掘削された水平坑井 BD-04A は水平区間長が 10,902 m にも達している。大偏距坑井では、英国 Wytch Farm 油田における M-16Z 坑井の偏距 10,728 m、掘削深度 11,278 m が長らく記録となっていたが、サハリン I プロジェクトにおいて、2014 年に z-42 坑井で偏距 11,739 m、掘削深度 12,700 m を達成し、ロシア科学掘削の深度記録を更新した。さらに同じサハリン I において 2015 年には、o-14 坑井で偏距 12,130 m、掘削深度 13,000 m の記録を達成している。

ここで、傾斜坑井での深度の表し方に触れておくと、図 3.3.32 に示すように坑井の到達地点は垂直深度と水平偏距によって一意に決定され、掘削深度 (measured depth) あるいは単に深度といったときは、坑井の長さを指す。坑井は鉛直方向傾斜しているだけでなく水平方向にも曲げて掘削されるので、掘削地点の位置を知るには坑井の傾斜角 (inclination) と方位角 (azimuth) の情報も必要になる。坑井の傾斜角は垂直からの角度で、方位角は北からの角度で表される。また、図 3.3.33 に示すように、地上から垂直に掘削してきた坑井を傾斜させ始める深度をキックオフポイント (kick off point)、傾斜角が増加していく区間の掘削を増角 (build) 掘削、減少していく区間の掘削を減角 (drop) 掘削という。坑井の傾斜を一定に保持して掘削することを沿角 (hold) 掘削、増角・減角区間から沿角区間に移る深度をエンドオブカーブ (end of curve) またはエンドオブビルド (end of build) という。水平坑井特有の表現として、水平区間の先端つまり坑底側をトゥ (toe)、根元つまり坑口側をヒール (heel) と呼ぶこともある。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

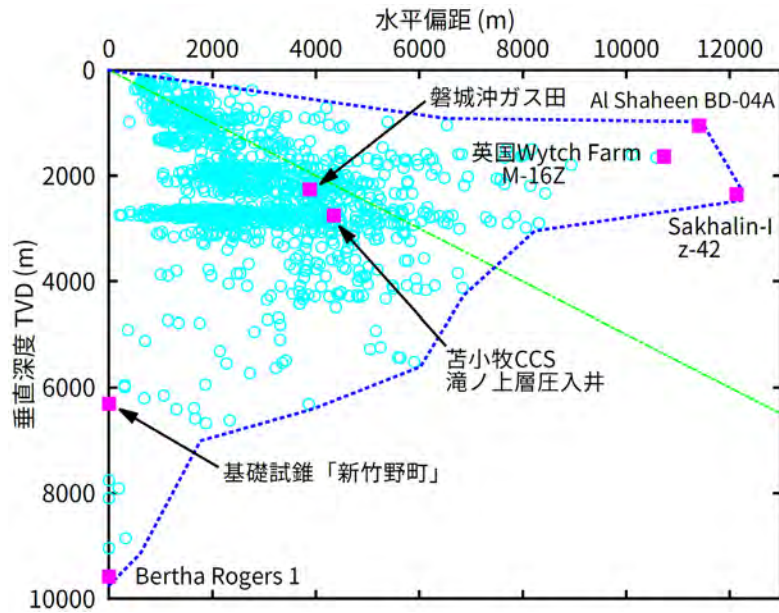


図 3.3.31 石油開発における傾斜掘削の実績

(出典：BP 社などのデータを基に作成)

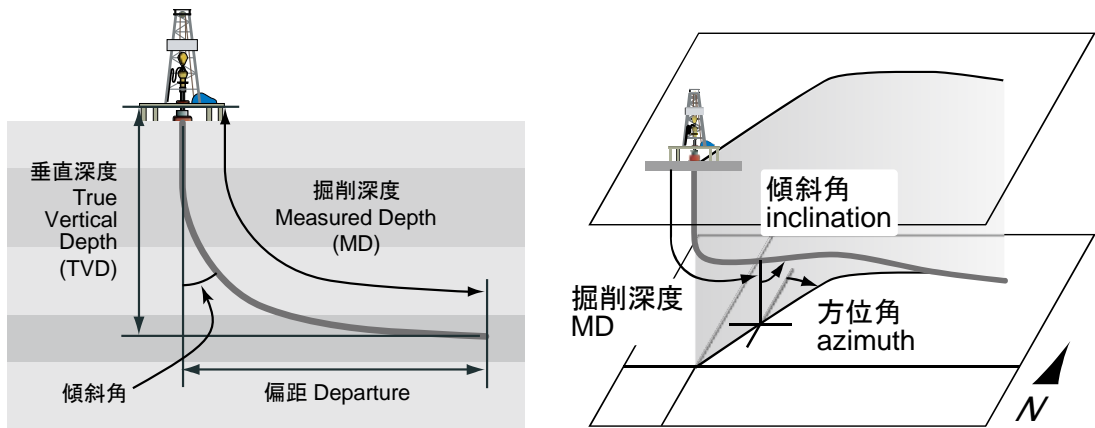


図 3.3.32 坑井の深度・偏距、傾斜角、方位角の表し方

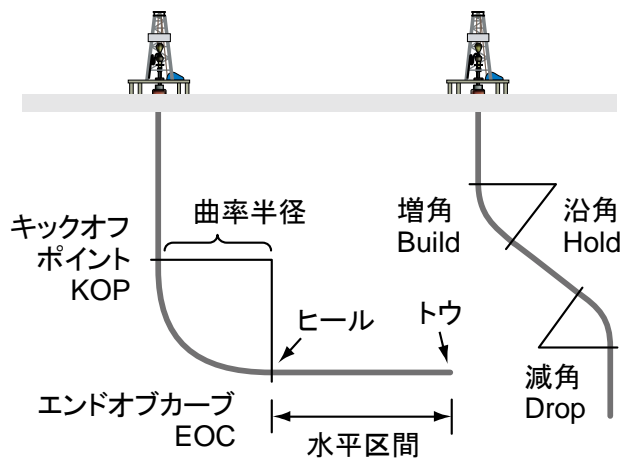


図 3.3.33 傾斜坑井の坑跡の表現に関する用語

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

以上のような傾斜坑井を掘削するには、ビットの進行方向をドリルストリングの中心軸から一定の方向に偏向させて掘削する必要がある。これまで述べてきたロータリーテーブルやトップドライブによって地上でドリルストリング全体に回転を与える方法では、例えばビットの上部に曲げ角のついたパイプを挿入したとしてもそのパイプも回転してしまい、一定の方向にビットを変更することはできない。傾斜掘削には次のような特殊な機器と方法を用いる。

(2) マッドモーター (mud motor)

マッドモーターは、通常のロータリー掘削のようにドリルストリングを回転させることをしないで、泥水の水力を利用してビットのみを回転させる坑内機器である。代表的なマッドモーターは容積型モーター (PDM : Positive Displacement Motor) と呼ばれるもので、らせん状に溝の切った弾性体製の筒状ステーターと、その内部のらせん状のシャフトである鋼製ローターから構成される。図 3.3.34 に示すように、ローターのらせんのローブ数がステーターのローブ数よりもひとつ少なく、ローターとステーターの間に一定の容積の空間が存在する。ここに掘削流体を流すとその水力によってこの空間を前へ押し出そうとしローターが回転させられる。容積型モーターは、泥水流量が一定であれば回転速度は一定で高いトルクが得られるのが特徴で、ローブの数が多いほど高トルクが、ローブの数が少ないほど高回転が得られる。

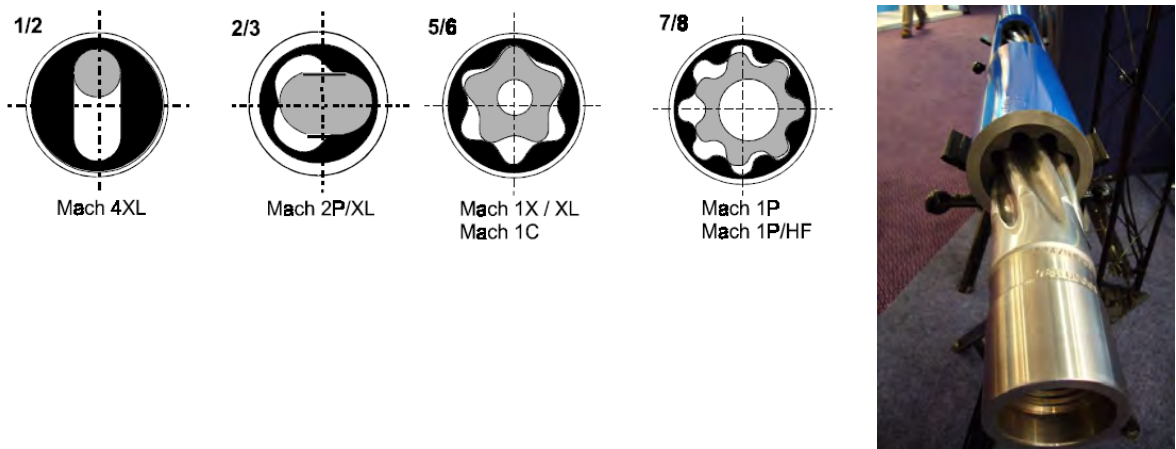


図 3.3.34 容積型マッドモーター

(出典：(左) Baker Hughes Inc., 2016 (右) 筆者撮影)

(3) ステアラブルモーター (steerable motor)

ステアラブルモーターは、マッドモーターのハウジング (外筒) 下部が屈曲したベントハウジングの構造になったもので、ビットの偏向オフセットが小さく作られているため、ドリルストリングを回転しながら掘削することも可能である。図 3.3.35 に示すようにドリルストリングを回転しない掘削をスライドモード、回転させる掘削モードをロータリーモードと呼び、ロータリーモードではマッドモーター部分はいわゆる振れ回りのような状態で回転し、全体としてはほぼ真っ直ぐに掘進できる。編成を組み替えるために揚降管す

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

ることなく、これら二つのモードを切り替えながら、柔軟に坑跡を制御することが可能である。

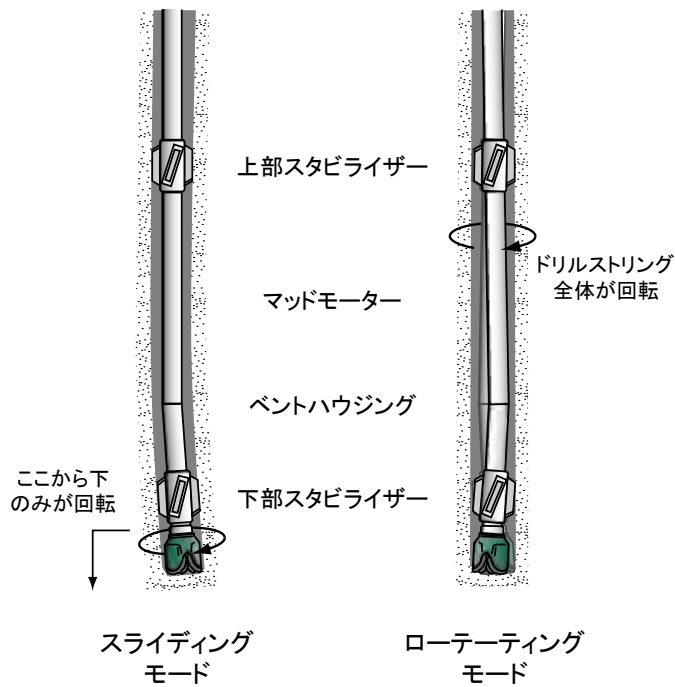


図 3.3.35 ステアラブルモーター

(4) ロータリーステアラブルシステム (RSS : Rotary Steerable System)

ステアラブルモーターの欠点は、スライドモードとロータリーモードを繰り返すことにより、坑跡に屈曲あるいはねじれが生じ易く、またスライドモード時にホールクリーニング（掘屑の運搬）が十分に行えないなどの問題が生じることである。そこで新しく開発されたのが、スライドモードを用いないで常にドリルストリングを回転させながら、なおかつ傾斜制御掘削が可能なシステムがロータリーステアラブルシステムである。RSSは、ドリルストリングを回転させたまま一定の方向へビットを偏向させるために、非回転ハウジング部にビットの偏向機構が内蔵されており、その機構は図 3.3.36 に示すような二つの方式に大別できる。ひとつは非回転ハウジングに取り付けられた偏向ユニットによってドリルストリングをある一方向の坑壁側へ押し付け、サイドフォースを発生させてビットを偏向させる方式である。もう一つの方式は、ドライブシャフトをハウジングの中で偏心させることによってビットを傾けて偏向させるものである。

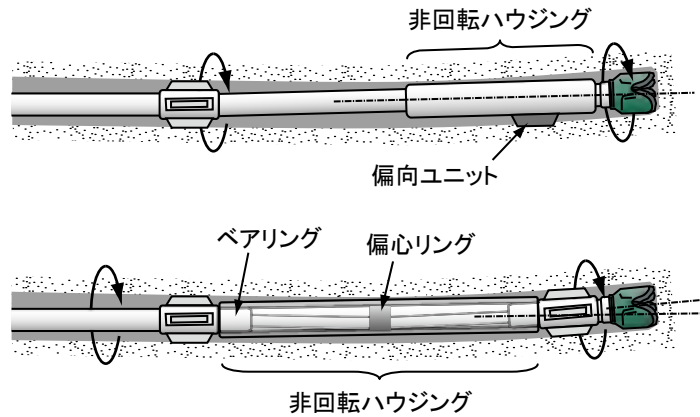


図 3.3.36 ロータリーステアラブルシステム

(5) 傾斜測定と MWD (Measurement While Drilling) 技術

傾斜掘削においては、坑井が計画した軌跡どおりに掘削されているのか、あるいは適切な偏向作業を行うためにベントサブやベントハウジングなどの偏向機器がどの方向を向いているのかなどを常に把握する必要がある。前述のように、坑跡を求めるためには、(1) 掘削深度、(2) 傾斜角（垂直からの角度で表す）、(3) 方位角（北から時計回りに計り、0～360° で表す）、の3種類のデータを一定の掘削深度間隔（30 m あるいは 100 ft ごと）で測定し、最小曲率法（minimum curvature method）と呼ばれる計算法によって計算する。

MWD は各種計測センサーを組み込んだ坑内ツールを BHA (Bottom Hole Assembly) の編成に組み込み、測定したデータをリアルタイムに地上に伝送する技術で、1978年に初めて泥水圧力波を利用したデータ伝送方式の MWD システムが商用化された。泥水圧力波によるデータ伝送は、坑井内を循環する泥水に圧力波を発生させ、それにデジタル変換した計測信号を乗せる方式である。伝送レートは 20 bps 程度と非常に小容量かつ低速である。泡や気体を混合した特殊な泥水を用いる場合には伝送媒体が不連続相になるために泥水圧力波による方式は使えなくなるため、電磁波を用いた方式など泥水によらない方法も用いられる。

3.3.8 坑井の仕上げと廃止

坑井を掘削する技術そのものではないが、坑井掘削と密接に関係し、掘削リグを用いて作業を行う坑井の仕上げと廃止（廃坑）についてここでは触れる。

(1) 坑井の仕上げ

坑井の仕上げは、貯留層までの掘削を終えた後に石油やガスを生産できるようにする作業である。仕上げは、図 3.3.37 に示すような方法がある。もっとも標準的な仕上げ方法は穿孔仕上げで、仕上げ層にプロダクションケーシングを設置してセメンチングし、鋼管およびセメントに穿孔して貯留層と坑井内の導通をとる。プロダクションケーシングをライナーケーシングにしたものをライナーハンガー仕上げと呼ぶこともある。もう一つの代表的な仕上げ方法は仕上げ区間に孔明管を設置する方法である。フルストリングのプロダクションケーシングの先端に孔明管を接続して降下して仕上げ層より上部のみをセメンチングする方法や最終ケーシングから孔明管をライナー（perforated liner あるいは slotted

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

liner) として設置してセメンチングを行わない方法をアンカー仕上げという。この他に、仕上げ層にケーシングや孔明管を設置しないで裸孔で仕上げる裸孔仕上げがあるが、これは仕上げ区間が短く、生産時に崩壊の恐れのない地層に限って用いられる。

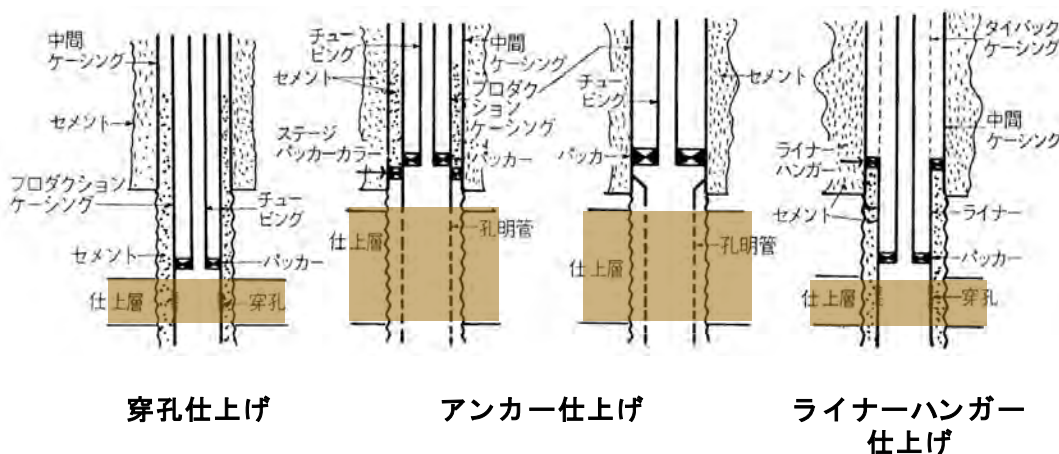


図 3.3.37 一般的な坑井の仕上げ方法

(出典：石油鉱業便覧, 1983)

こうして仕上げられた坑井の地表の坑口にクリスマスツリー (xmas tree) と呼ばれる坑口装置を取り付けると、掘削リグは撤去される。

(2) 廃坑

試掘などで生産に至らなかった坑井や生産を終えた坑井は適切に埋め戻して地表部分を原状復帰して廃止する必要がある。坑井の廃止に関する具体的な方法は鉱山保安法に記述されているが、図 3.3.38 のように貯留層に残存している圧力を適切に抑えるために、坑井内を高比重の泥水で満たし、坑井内の要所にセメントでプラグを設置する。

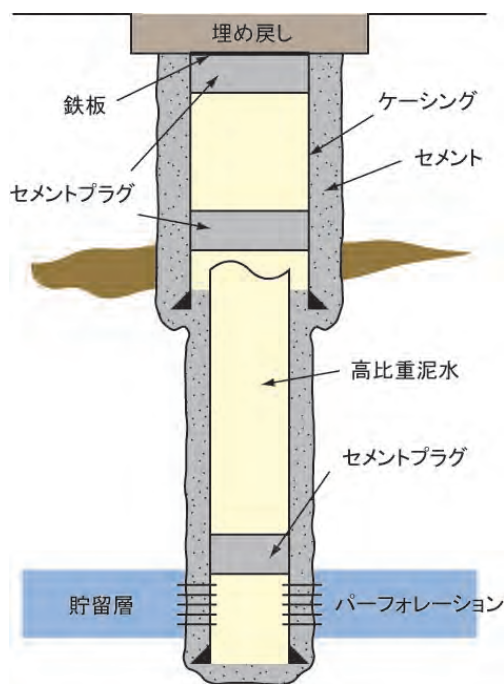


図 3.3.38 坑井の廃止方法

3.4 物理検層技術（ロギング）

3.4.1 概説

物理検層とは、坑井内に測定器を降ろし、物理的な手法により坑井近傍の物理特性（比抵抗、密度、弾性波速度、孔隙率、浸透率など）を深度の関数として連続的に記録する測定法の総称であり、坑井内での種々の物理検層も広義の物理探査に入る。単に検層と呼ばれることもあり、また電気検層が物理検層の出発点となった技術であったため、現在でも物理検層を「電検（電気検層の略）」と呼称されることもある。各種物理量が細長い紙に深度に対して表示されたものをログ（log）と呼ぶ。地層を部分的に岩石サンプリングするコアリング（coring）や坑井の掘削作業にともなう掘屑を分析する手法と比較して、坑井に沿った物理的变化を連続的かつ高分解能で取得できる利点を有する。さらに、岩石コア試料（rock core sample）や掘屑は室内実験で分析されるが、物理検層では原位置での物理特性を測定できる利点もある。

掘削が終了し掘削用のツールを引き上げた後に、ワイヤラインと呼ばれるデータ転送機能を備えたアーマードケーブルに坑井内センサ（ゾンデあるいはプローブとも呼ばれる）を接続して実施されるワイヤライン検層（wireline logging）が一般的である。図 3.4.1 に物理検層の測定概念図を示す。ケーシングを坑井に挿入する前の裸坑（open-hole）の状態を実施することが一般的である。その一方で、損失リグ時間の短縮、泥水侵入領域影響の軽減、高傾斜井での適用の場合には、掘進中に物理検層を実施する掘削同時検層（LWD: Logging While Drilling）が行われる。測定されたデータはマッドパルスと呼ばれる泥水を媒体とする圧力波信号により地上へ伝送する等の方法により、リアルタイムで掘進中の状態や地層の情報を取

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

得できるため、ターゲットへの到達判断などが即時に可能となる。

ワイヤライン検層に対し、LWDは測定機器が掘削アセンブリに装備されており掘進しながら測定を実施するが、基本的な測定原理はワイヤライン検層と同様である。ただし、深度の測定方法に違いがあり、物理検層の深度は坑井に送り込むワイヤの長さを測定するのに対して、LWDの深度は地表で計測されたドリルパイプの長さの積算値である。このような深度はMD (Measured Depth) と呼ばれるが、坑井の方位傾斜情報を利用して、TVD (True Vertical Depth) に変換される場合もある。また、測定深度の基準面がどこに設定されるかについても、他の調査データと比較する際には留意を要する。

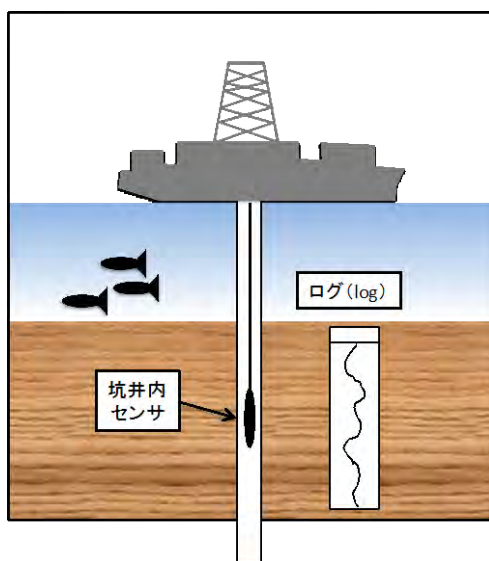


図 3.4.1 物理検層の測定概念図

使用された掘削泥水の種類に関する情報も重要で、特に泥水の塩分濃度や油ベースの泥水は地層の電気的抵抗特性を大きく変化させてしまう可能性がある。また、一般に泥水の圧力は地層の孔隙圧を超えている必要があり、この条件が満たされていれば泥水が地層に浸入することを意味している。泥水の浸入に伴い、坑壁表面に泥の層が形成され（図 3.4.2）、これを泥壁あるいはマッドケーキと呼ぶ。泥壁よりさらに外側には、泥水置換領域 (flushed zone)、遷移領域、非侵入領域が形成される（図 3.4.2）。浸透性のある砂岩層ではこのような泥水侵入の影響が大きい。頁岩層や緻密な砂岩など低浸透性を有する地層では、この影響はむしろ限定的である。ただし、後述するように、この性質を利用して定性的に地層の浸透性を評価することも可能となる。

物理検層は、その測定原理及び目的により多種存在し、対象層、坑井の状態等を考慮し、物理検層の測定仕様を決定する。表 3.4.1 に検層の種類と用途を示す。また、一般的な解析方法の流れは、物理検層で得られた測定値から、地盤の性状、地層の岩相、地質構造、地層中の炭化水素の存在・量・成分などの解析を行う。一般的な手順は、データの編集、坑井環境補正、パラメータや地層モデル設定、計算とその評価、結果表示である（物理探査学会、2005）。ここでは、主要な物理検層について説明する。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

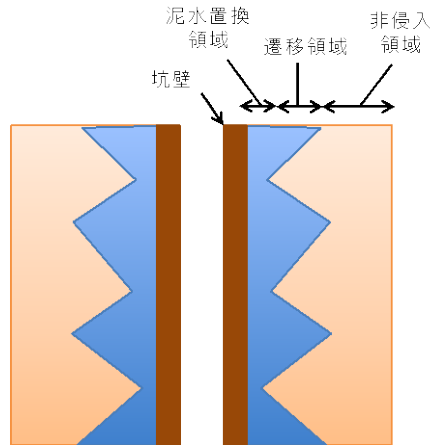


図 3.4.2 坑井周辺における泥水の浸入状況

表 3.4.1 検層の種類と用途

測定項目	比抵抗	孔隙率	岩相	鉱物種	飽和率	浸透率	流体特性	岩盤力学特性	地質構造	層理
ラテロ	直接				直接					
イントロダクション	直接				直接				部分	部分
マイクロラテロ	直接				直接					
自然電位										
密度		直接	部分	部分			直接	部分		
中性子		直接	部分	部分			直接			
ガンマ線			部分	部分						
核磁気共鳴		直接	部分	部分	直接	直接	直接			
音波		直接	部分	部分	部分	直接	直接	部分		
地層傾斜、 イメージング	直接							部分	部分	部分

直接的な情報を提供する
 感度は高くないが状況によっては情報を提供できる

部分的な情報を提供し、ほかの測定と組み合わせる必要がある

(出典：Anderson,2011 を参考に作成)

3.4.2 使用する検層機器、手法

(1) 比抵抗検層 (resistivity logging)

坑井内に測定器を降ろし、地層に電流を流すことによって地層の比抵抗を深度に応じて連続的に計測する検層であり、電気（ノルマル、ラテラル）、ラテロ、マイクロ、インダクション検層などがある。図 3.4.3 に示すように、断面積 S 、長さ L の円柱に流れる電流を A 、電圧を V とすればオームの法則により電気抵抗 r は V/A (Ω) となる。物体の電気抵抗は断面積に反比例し長さに比例するので、 $r=R \times 1/S \times L$ と表現され、その比例定数を

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

R とすれば物質固有の電気抵抗を表すものとなり、これを比抵抗と呼び単位は Ωm となる。比抵抗は電気伝導率の逆数である。

ほとんどの岩石は絶縁体であるため、岩石の比抵抗は孔隙水の量とそのイオン電導に支配されることを仮定している。ただし、粘土鉱物や塩化物 (KCl、NaCl など) は電気伝導性を有することに留意が必要である。さらに、孔隙同士つながりを電流の経路と考え、そのつながり方や形態に注目して、孔隙率、水飽和率 (water saturation)、浸透率、地層水の比抵抗などを求めることができる。

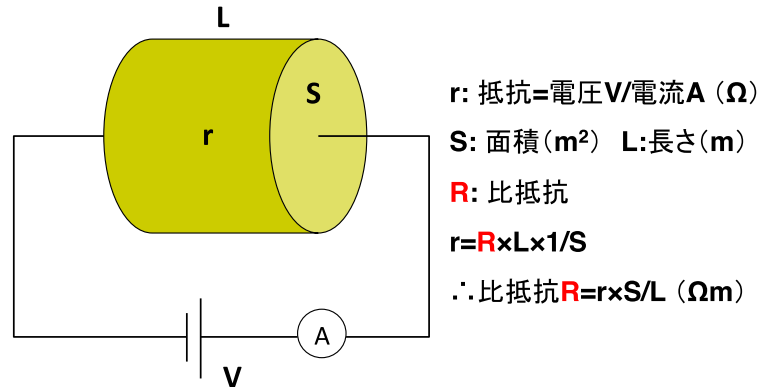


図 3.4.3 比抵抗の定義

地層比抵抗係数 (formation resistivity factor) あるいは地層係数 (フォーメーションファクタ (formation factor)) F と呼ばれる地層に固有 (孔隙水の比抵抗に依存しない) のパラメータがあり以下の式で表せる。

$$F = R_0/R_w \quad (3.4.1)$$

ここで、 R_0 は岩石の比抵抗 (測定される比抵抗) であり、 R_w は岩石を飽和している孔隙水の比抵抗である。この地層係数 F は地層の孔隙の特性 (孔隙率や浸透率) に依存する。図 3.4.4 に、グレイン粒子 (絶縁物質) の配置は同じで異なる比抵抗 (r_1 、 r_2) の孔隙水で飽和されている二つの系において測定される比抵抗がそれぞれ R_1 、 R_2 であると以下の式が成立し、グレイン粒子 (絶縁物質) の配置に固有であり、孔隙水の比抵抗には依らないことがわかる。

$$F = R_1/r_1 = R_2/r_2 \quad (3.4.2)$$

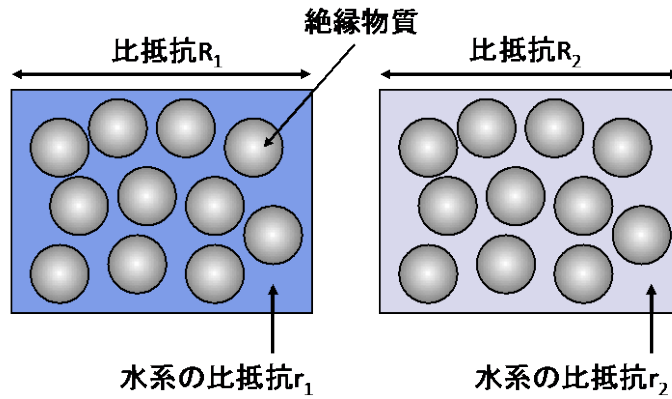


図 3.4.4 地層係数の概念図

Archie (1942) は多数のコアを用いて孔隙率 ϕ と地層係数 F の関係を調べ、以下の経験式を得た。

$$F = a/\phi^m \quad (3.4.3)$$

ここで、 m は膠結係数 (cementation factor) と呼ばれ、岩石の続成作用 (diagenesis) と関連し孔隙同士つながり状況を表し、孔隙性を有する岩石の場合は 1、続成作用が進んだ状態で 3 の値と仮定される。また、 a は迂回係数 (tortuosity factor) と呼ばれ、岩石内を流れる電流の通路に関連し (図 3.4.5)、孔隙の形状や分布状態が複雑になるほど迂回係数は大きくなる。

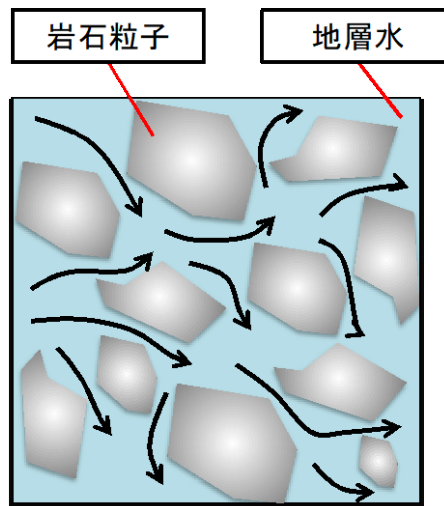


図 3.4.5 岩石内を流れる電流の通路

さらに、Archie (1942) は孔隙水の飽和率 (S_w) は完全飽和している場合の岩石の比抵抗 (R_0) と部分的に飽和している場合の岩石の比抵抗 (R_t) の関係について、以下の経験式を導いた。

$$S_w = (R_0/R_t)^{1/n} \quad (3.4.4)$$

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

ここで n は飽和指数 (saturation exponent) と呼ばれ通常 1.8 から 2.5 の間の値が使用される。さらに、 $R_0 = (F \cdot R_w)$ であることから以下を得る。

$$S_w = (F \cdot R_w / R_t)^{1/n} \quad (3.4.5)$$

この式はアーチーの式 (Archie's formulas) と呼ばれ、比抵抗検層において重要な式である。

① ラテロ検層 (latero logging) (集束型電気検層)

前述したように、地層の比抵抗を計測する際には、掘削泥水の侵入の影響を強く受けることになる。ラテロ検層 (集束型電気検層) は、できるだけ坑壁から離れた箇所での比抵抗測定を行えるように設計されている。測定電流を薄い円盤状にして流すことにより電流を集束させ、地層に対して電流経路の指向性を調整することができる。また、デュアルラテロ検層では電流の指向性を調整することにより探査深度の異なる 2 種類の比抵抗値を測定することができる (図 3.4.6)。坑壁や対象層の周囲の地層の影響を小さくし、薄い地層の解析に適している。また、高塩分泥水環境において高比抵抗地層の比抵抗値を求めるのに適しているが、油を使用した泥水は電流を通しにくいいため、この種の泥水の際には適用できない。

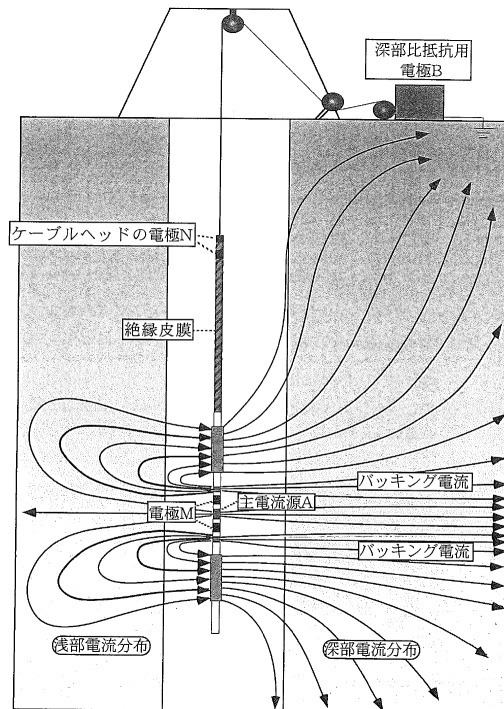


図 3.4.6 デュアルラテロ検層の測定概念図 (出典：物理探査学会, 2016)

② インダクション検層 (induction logging)

油ベースの泥水が使用された際に有効な比抵抗検層法としてインダクション検層があ

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

る。電磁誘導現象を利用して地層の比抵抗を連続的に測定する比抵抗検層の一種。発信コイルに交流磁場を励起させる（一次磁場（primary magnetic field））ことにより導電性の地層中に誘導される渦電流（二次磁場（secondary magnetic field））を受信コイルで測定する（図 3.4.7）。この電流の大きさは地層の比抵抗に反比例する。電磁波を使用するため、泥水や泥水侵入域の影響を受けにくく、また油を使用した泥水等の非導電性の坑井条件でも測定可能である。また、デュアルインダクション検層では、2種類の異なる発信・受信コイルをアレイ配列し、探査深度の異なる2種類の比抵抗値を測定することができる。

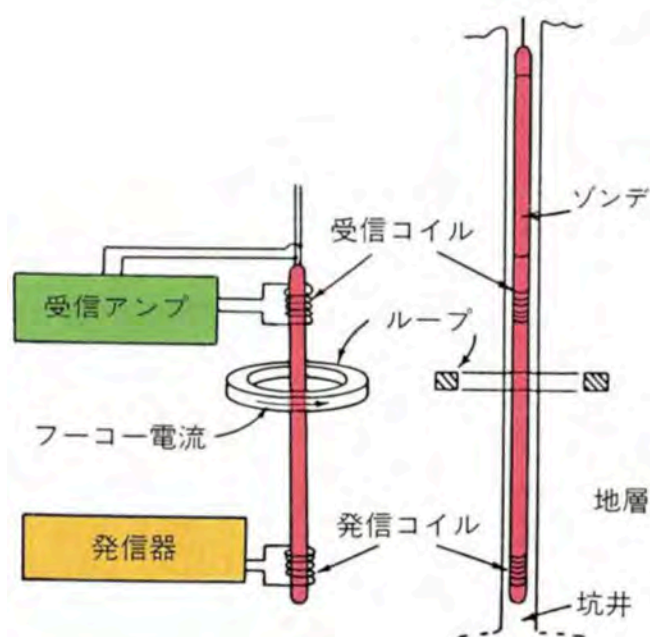


図 3.4.7 インダクション検層の測定概念図（出典：物理探査学会, 1989）

③ マイクロ比抵抗検層（microresistivity logging）

泥水置換領域の比抵抗を測定する検層としてマイクロ比抵抗検層がある。スプリングアームによって電極を坑壁に圧着して、比抵抗を連続的に測定する（図 3.4.8）。泥水浸入に伴い置換された領域の抵抗値を測定するため、置換された地層流体の量を評価することができる。地層の浸透率の定性的評価、残留炭化水素の飽和率や可動性、有効層厚の算定に利用される。またアームの伸縮を利用して坑径変化の測定も可能である。

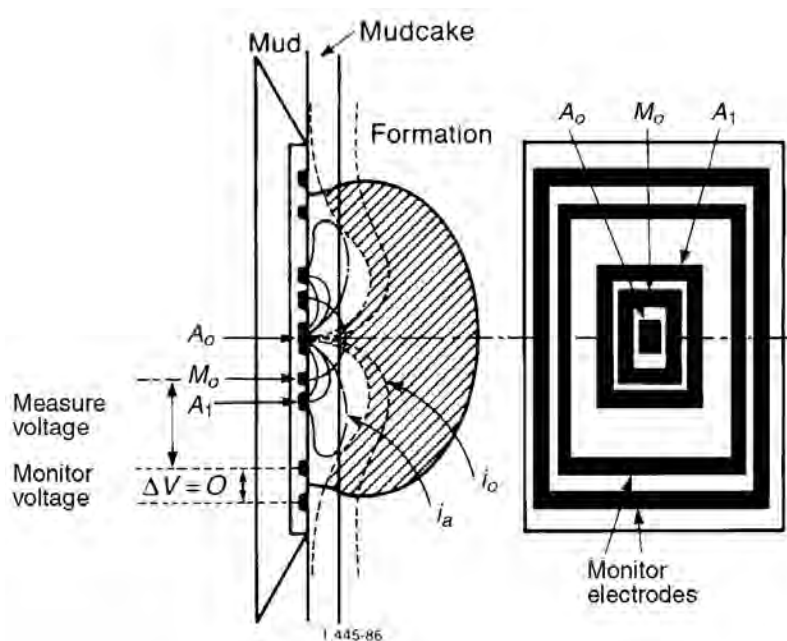


図 3.4.8 マイクロ比抵抗検層の測定概念図 (出典: Society of Petroleum Engineers)

(2) 自然電位 (SP: Spontaneous Potential あるいは Self-Potential) 検層 (spontaneous potential logging)

自然電位とは、様々な原因により自然に発生して時間的に安定して存在する電位差であり、自然電位検層の対象となる自然電位は地層境界における拡散電位 (diffusion potential) や膜電位 (membrane potential) を原因として発生する。拡散電位の発生においては、濃度の異なる電解液を接触させると砂岩のように浸透性の岩石では濃度の高い方から低い方へイオンの移動拡散が生じるが、この際、陽イオンに比べて陰イオンの移動度 (易動度) が大きい場合、濃度の低い方は陰イオンが優勢になり電位差が生じる (図 3.4.9 (a))。一方、膜電位の発生においては、濃度の異なる電解液が頁岩のようにイオン交換膜として機能する場合に生ずる。この場合、頁岩層は陽イオン交換膜となり、陽イオンのみが移動できるため、濃度の低い方は陽イオンが優勢になり電位差が生じる (図 3.4.9 (b))。

自然電位の測定には、地上に置いた参照電位電極と坑井内に降ろした可動電位電極との自然電位差を連続的に測定する (図 3.4.10)。自然電位には、上述の拡散電位ならびに膜電位などの電気化学的に起因する自然電位と電解液流動に伴う流動電位 (streaming potential) とがあるが、大部分は電気化学的電位の効果で説明される。地層変化の把握、地層水の塩分濃度評価、地層に含まれる粘土量推定などに利用される。

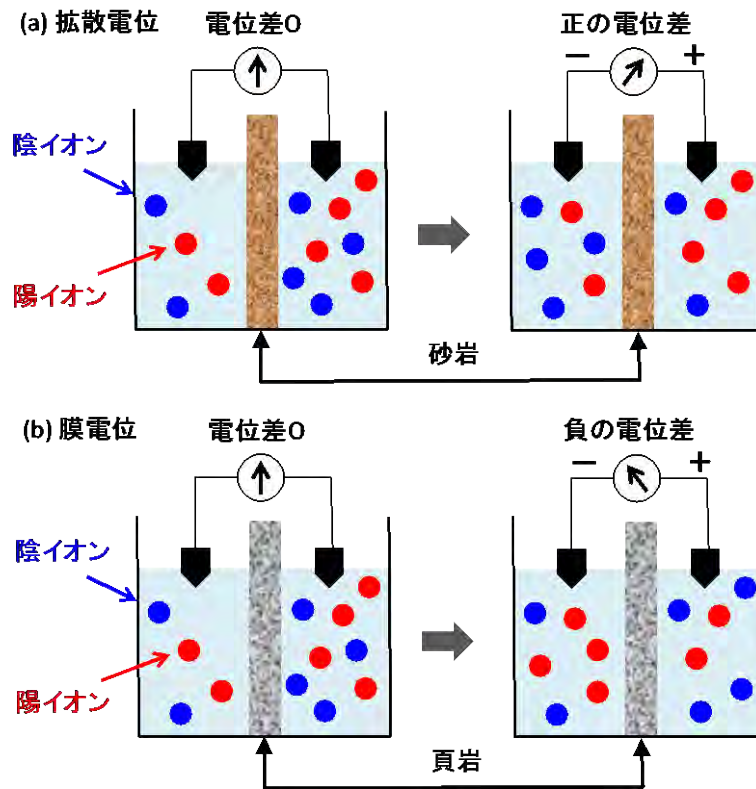


図 3.4.9 自然電位のメカニズム

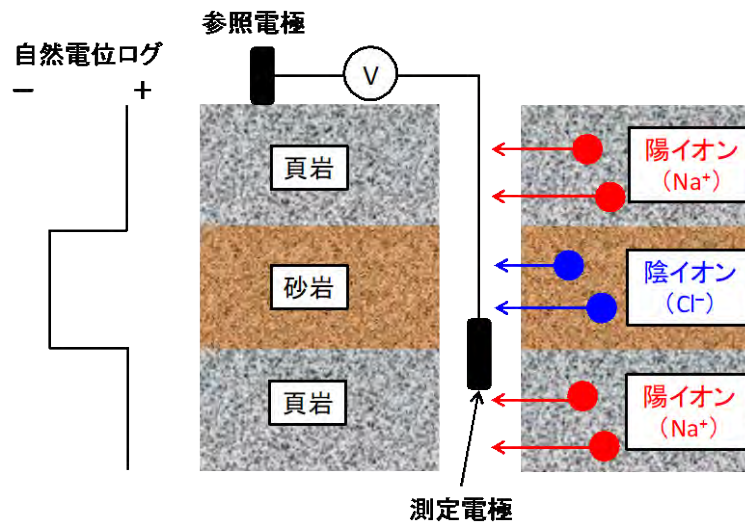


図 3.4.10 SP 検層の測定概念図

(3) 放射能検層 (radioactivity logging)

地層中に含まれる自然放射性物質あるいは放射線源から発生される放射線を用いて、地層特性を連続的に測定する検層手法である。放射線検層には、地層に含まれる放射性物質から自然放射するガンマ線の強度から地層中の頁岩含有量あるいは粘土含有量を推定するガンマ検層、地層に照射した中性子が反応して発生する二次ガンマ線の強度から地層中の水分含有量さらには孔隙率を求める中性子検層、地層に照射したガンマ線が物質原子との

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

物理的反応を起こすことによる減衰から岩石密度あるいは孔隙率を求める密度検層 (density logging) がある。

① ガンマ線検層 (gamma ray logging)

ガンマ線検層とは、地層中に含まれる放射性物質から放出される自然ガンマ線を坑井内にて連続的に測定する物理検層である (図 3.4.11)。人工的にガンマ線を地層に向けて放射して地層密度を測定するガンマ-ガンマ線検層とは区別されるため自然ガンマ検層とも呼ばれる。通常の堆積岩における主要な自然ガンマ線源はカリウム、トリウム、ウランであり、頁岩はこれらの要素を含んでいるため、頁岩は通常、砂岩よりガンマ線強度が高い。そのため、砂岩層と頁岩層の判別や頁岩含有率の算定に利用される。石油根源岩は通常ウランの含有率が比較的多く、しばしば“hot shale”と称される。これは酸化水に溶解したウランが有機物に濃縮されるためである。また、多くの場合、自然電位検層と類似したログの傾向となる。石灰岩 (limestone) では、主要な自然ガンマ線源の含有量は一般的に少ないが、蒸発岩層においてガンマ線測定はカリウム塩に良く反応する。ケーシング存在下でも計測可能であり、各種検層の深度同定・補正にも利用されるため、他のツールとコンビネーションで使用されることが一般的である。

放射線検出器としては、ガイガー・ミュラー計数管あるいはシンチレーション計数管を用いて自然ガンマ線強度が測定されるが、エネルギー・スペクトルを計測することができるヨウ化ナトリウムシンチレーション検出器により、カリウム、ウラン、トリウムの自然ガンマ線強度への相対的寄与をも区別できる (この手法はスペクトラル・ガンマ線検層と呼ばれる) ため、より複雑な岩相の判別が可能となっている。例えば、スペクトラル・ガンマ線検層において、トリウムのログのみを使用して頁岩含有量を推定することがしばしば可能である。これは、頁岩層におけるトリウム含有量がウランやカリウムの含有量より多いためである。

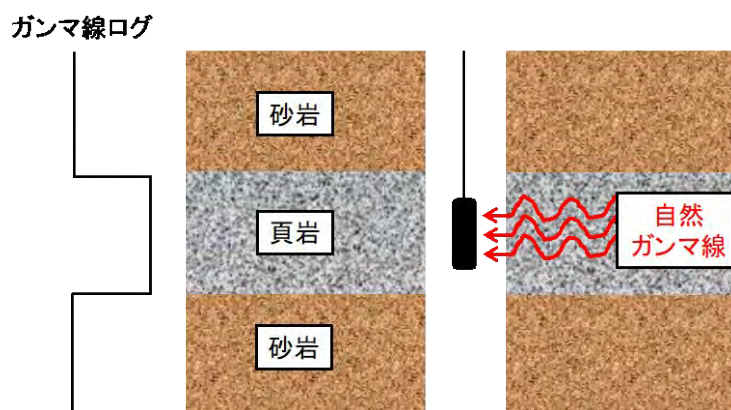


図 3.4.11 ガンマ線検層の測定概念図

② 中性子検層 (neutron logging)

中性子検層は、ゾンデの中性子源から連続的に照射される高速中性子の地層中における減衰を、高速中性子源と一定距離だけ離して設置された中性子束の検出器で測定し、地層の孔隙率を求める方法である。中性子は地層中の核子と衝突することで中性子自身

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

の運動エネルギーを減じていくが、その損失割合は同等質量の核子に衝突した場合に最も大きくなる。図 3.4.12 は、中性子と様々な質量の原子との弾性衝突過程を示している。中性子は同じ質量の水素原子核との弾性散乱によって最も効率的に減衰していき、やがてその系の中で熱平衡状態に達する（この状態になった中性子を熱中性子と呼ぶ）。なお、減衰の割合は地層の水素原子密度に比例する。最終的に熱中性子は塩素原子などに吸収されてガンマ線を放出する。この際に、2種類の検出器（近距離と遠距離）で得られた計数率の比によって中性子の減衰量を推定する（図 3.4.13）。地層に含まれるほとんどの水素原子は孔隙内の水に含まれると仮定すれば、中性子の減衰量より水分含有量がわかる。従って、孔隙が水で飽和されている場合には、孔隙率を求めることができる。中性子検層では通常、中性子減衰量を、水で孔隙が飽和された石灰岩の孔隙率に換算し、孔隙率でログを表示する。また、孔隙がガスで満たされている場合には水素密度（HI: Hydrogen Index）が小さくなるため、測定された孔隙率は見掛け上減少することになり、逆にこの現象を利用してガス層の検出も行うことができる。

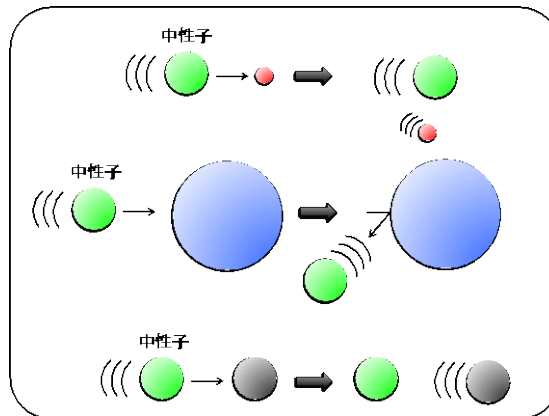


図 3.4.12 中性子と様々な質量の原子との弾性衝突過程（バルーンの大きさは質量を示す）

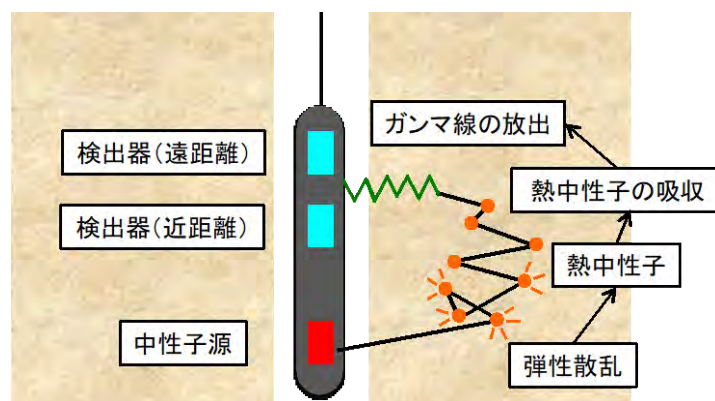


図 3.4.13 中性子検層の測定概念図

③ 密度検層(density logging)

密度検層（ガンマ-ガンマ検層とも呼ぶ）は、坑井内に降ろした測定器から放射されたガンマ線が、地層を構成する原子核の軌道電子に衝突して、測定器に戻って来る強度が

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

地層の電子密度に比例することを利用して地層密度を連続的に測定する物理検層である。ガンマ線などの短波長電磁波が物質中を通過する場合、光電効果・コンプトン効果・電子対生成により、物質中の電子と衝突してこれにエネルギーの一部を与えたり、電離や励起を引き起こすことでそのエネルギーを消失する(図 3.4.14)。ガンマ線のエネルギーがある程度大きい場合(1 MeV 程度)にはコンプトン散乱(Compton scattering)が起こりやすく、散乱された分だけエネルギーが減少するとともに波長が少し長くなった電磁波となり別の方向に散乱される。コンプトン散乱の確率は物質の電子密度に比例し、さらに物質の電子密度は物質の密度に比例するため、コンプトン散乱と密度を関係づけることができる。

典型的な密度検層測定はツールを坑壁に圧着して実施される(図 3.4.15)。ガンマ線源としては ^{60}Co や ^{137}Cs などが使用され、これらの線源から放射されたガンマ線は地層中においてコンプトン散乱を繰り返しながら伝わって、距離が異なる2種類のシンチレーションカウンター測定器でガンマ線のエネルギースペクトルが測定される。2種類の測定器を使用することによりマッドケーキや微小な坑径変化の影響を補正することができる。

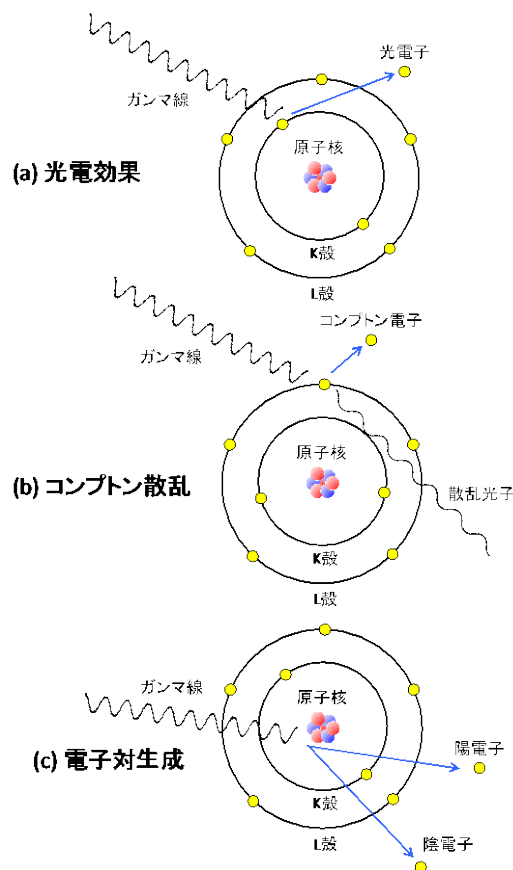


図 3.4.14 ガンマ線のエネルギー消失過程の種類

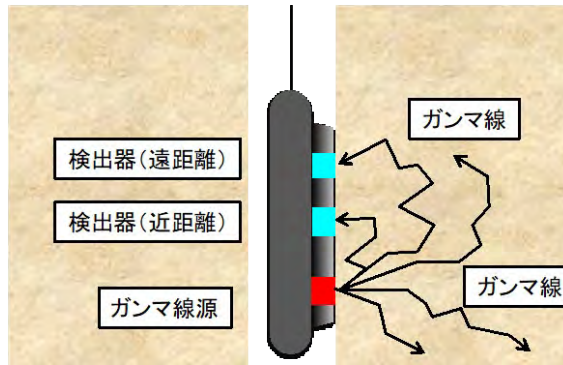


図 3.4.15 密度検層の測定概念図

(4) 速度検層 (velocity logging)

坑井を利用して坑軸方向の弾性波速度を連続して測定する物理検層で、音波検層 (sonic logging) 及び VSP (Vertical Seismic Profiling) 法に分類できる。

① 音波検層

音波検層は、圧電型の発振器および受振器が組み込まれた検層機を坑井内に降ろし、発振器から発した弾性波が地層内を伝播して受振される波形を連続的に測定する検層を指す。液体で満たされた坑井内において等方放射型震源 (図 3.4.16(a)) より励起された P 波は坑壁に斜めに入射するとスネルの法則に従って屈折 P 波を生じ、入射角が臨界角に達すると屈折 P 波は坑壁に沿って伝播し、その波から生ずる屈折 P 波はヘッドウェーブとして液体中を伝播するのでこの波を測定することで地層の P 波伝播特性を把握することができる (図 3.4.17)。一方、P 波の場合と同様な考えで S 波についての測定を行うことができない。これは液体で満たされた坑井内において S 波を励起することが不可能なことによる。そこで、図 3.4.16 (a)に示した等方放射型震源とは逆極性の等方放射型震源 (図 3.4.16(b)) とを組み合わせるとともに、図 3.4.16(c)に示した指向型震源を使うことにより、坑井に flexural (たわみ) 波 (flexural wave) (図 3.4.16(d)) を励起させる。この flexural 波は実体波ではなく分散性を有する境界波の一種であるが、波長に対して坑井の直径サイズが無視できるようになると (すなわち低周波数領域において)、flexural 波は実体波である S 波とみなすことができる。なお、上記において等方放射型震源ならびに指向型震源はそれぞれモノポール震源 (monopole source) ならびにダイポール震源 (dipole source) と呼ばれる。

なお、広義の音波検層には、ケーシングと地層の膠着度を評価するセメントボンド検層、モノポール震源を低周波数にシフトさせて発振するストーンレー波 (Stoneley wave) 検層、超音波を坑壁に向けて発振し坑壁状態を画像化するボアホールテレビュア、坑井周辺の反射面イメージングを可能にする単坑井イメージング検層などがある。ここでは、P 波速度と S 波速度を求める手法について説明する。

音波検層ツールについては、いくつかの種類が存在するが、ここでは DSI (Dipole Shear Sonic Imager) と呼ばれるツールを例にとる。DSI ツールの模式図を図 3.4.18 に

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

示す。一つのモノポール震源と二つのダイポール震源（upper と lower）が存在する。ダイポール震源における upper と lower はそれぞれの指向性が互いに直交しており、S波伝播の異方性を解析できるように設計されている。一方、受振側については八つ受振深度を有する受振アレイで構成され、各受振深度においてダイポール震源の指向性と一致するように四つの圧電型 hidroフォンにより構成される。モノポール震源による発振の際には、各受振レベルにおける四つの圧電型 hidroフォンで計測された記録を単純加算し、ダイポール震源による発振の際には、震源の指向性の方向にある二つの圧電型 hidroフォンで計測された記録の差をとることによりデータを取得する。なお、ある深度での発振が終了すると受振レベル間隔（この場合では約 15 cm）を移動して次の発振を行う。

各深度において受振アレイで取得されたモノポール発震による波形記録例を図 3.4.19 (a)に示す。この記録には P 波、S 波、ストーンレー波（坑井内を伝播する境界波の一種）が観測されており、それぞれ直線状のイベントとして観測される。直線のそれぞれの傾きは、それぞれの波の速度の大小と関連しているため、解析窓を設定し、その窓内における直線状のイベントの傾きをセンブランス値などにより定量的に評価し、その結果を2次元で表現する（図 3.4.19 (b)）。図 3.4.19 (b)で示された結果において、時間方向にデータを加算すると、それぞれの波においてピーク値を検出できるので、そのピーク値を与える速度がその深度での速度である（図 3.4.19 (c)）。なお、音波検層においては、速度の逆数であるスローネス（slowness）が単位として一般的に使用される。

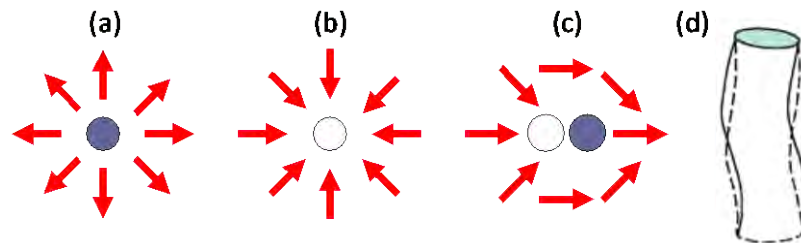


図 3.4.16 音波検層で使用されるモノポール震源(a)ならびにダイポール震源(c)

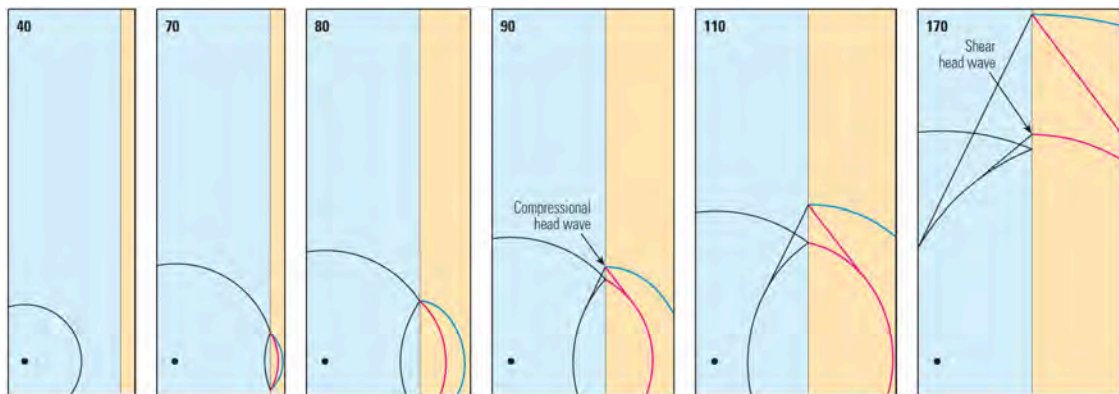


図 3.4.17 液体で満たされた坑井内で発震された P 波の波面伝播過程（出典：Haldorsen et al., 2006）

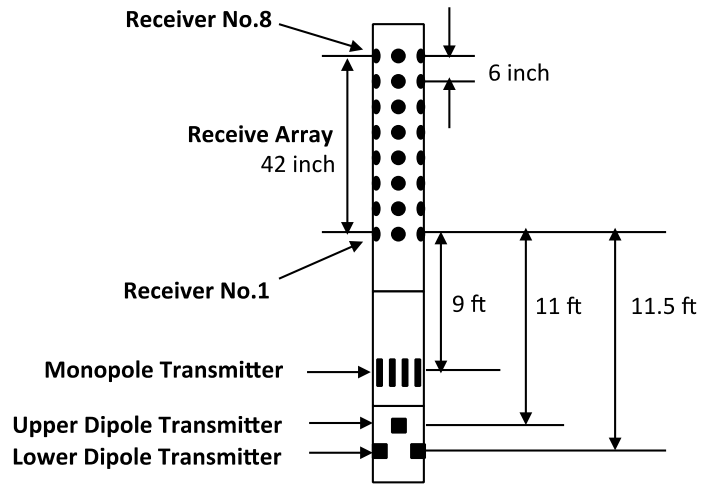


図 3.4.18 典型的な音波検層ツールの模式図

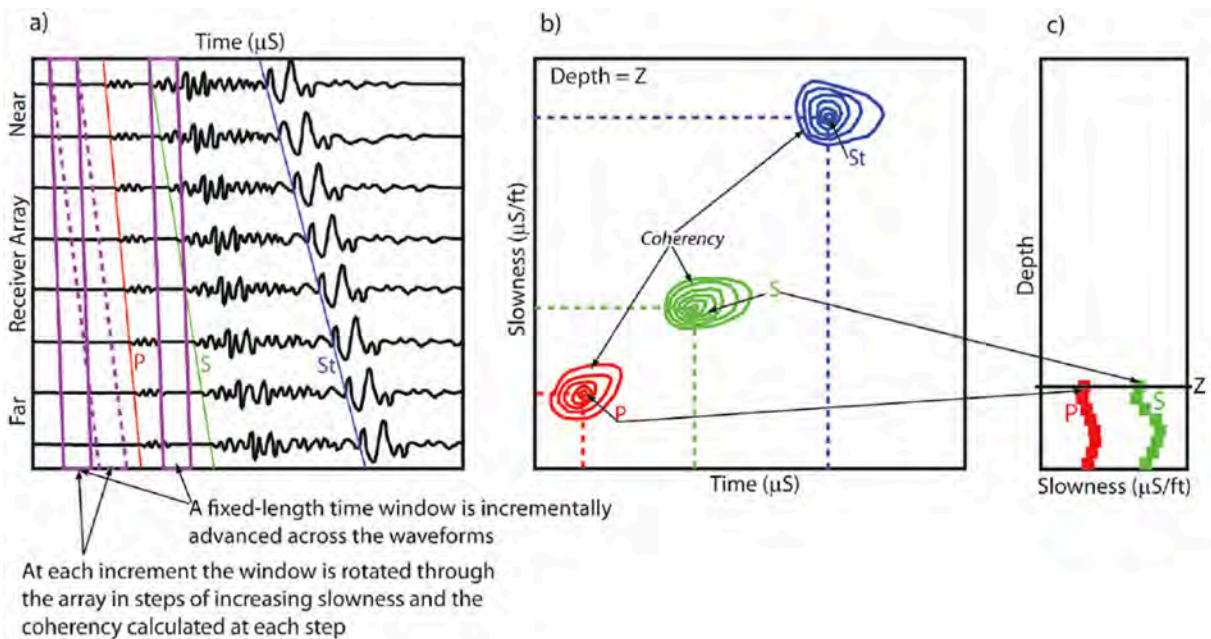


図 3.4.19 音波検層波形記録から速度情報を得る過程 (出典: Close et al., 2009)

② VSP 法

VSP 法では、発震を地表（海上での探査では海面）で行い、受振器は坑井内に展開して観測を実施するため、海上反射法地震探査と比較した場合、幾何的発散効果、反射面における透過減衰、地層伝播に伴う減衰等の影響を片道分に軽減することができる特徴である。

海上での反射法地震探査においては、発震ならびに受振を海面に展開して観測が実施されるのに対して、VSP 法では、発震を海面で行い、受振器は坑井内に展開して観測を実施する。反射法地震探査においては、上方進行波をデータ取得するのに対して、VSP 法では、下方進行波（震源から下に向かう直接波、多重反射）ならびに上方進行波（主に反射波）が観測記録に含まれる。また、VSP 法において取得される記録には、チューブ波 (tube wave) と呼ばれる、流体中を孔井軸方向にほとんど減衰することなく伝播

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

する境界波が含まれることが特徴である。海上での発震には通常、エアガンが使用されることが多く、受振器には、3成分ジオフォンあるいはハイドロフォンが使用される。ジオフォンは坑壁に圧着してデータ取得をするのでデータ品質が良い。一方、ハイドロフォンの利点は多連が可能なことと、ジオフォンのように坑壁への圧着作業が必要ないので作業効率が良い。しかしハイドロフォンの欠点はチューブ波の影響を受けやすいことがあるため、データ品質を確保するためにはジオフォンを使用することが一般的である。発震と受振器の幾何学的配置の違いにより、(a) Zero-offset VSP、(b) Offset VSP、(c) Walk-away VSP、(d) Deviated-well VSP、(e) 3D VSPの五つの形態のVSPがある(図3.4.20)。Zero-offset VSP(図3.4.20(a))は坑井近傍で発震を行い、坑井の深度方向に展開された受振器で観測を実施する。Offset VSP(図3.4.20(b))の基本的な考え方はZero-offset VSPと同じであるが、Offset VSPの場合には震源を坑井からある程度の距離をおいて発震させる。このことにより、Zero-offset VSPの場合に比べて、より広範な反射イメージを得ることができる。また、複数の震源位置を設定する場合をMulti-offset VSP、異なる方向に震源位置を設定する場合をマルチアジマスVSPと呼ぶ。Walk-away VSP(図3.4.20(c))は、Offset VSPと同様に坑井周辺の地層を評価する手法である。反射断面のS/N比を向上させるために、Multi-offset VSPが受振器を多く設置するのに対して、Walk-away VSPでは発震の位置を多く設置する点が異なる。Deviated-well VSP(図3.4.20(d))は、傾斜井内に設置された受振器の直上で、発震を行う調査であり、地層の横方向速度変化の測定、傾斜井下方の反射イメージングが可能となる。3D VSPはMulti-offset VSPの形態の三次元化である(図3.4.20(e))。図3.4.21にZero-offset VSPにおける波形記録例を示す。下方進行波(震源から下に向かう直接波)と上方進行波(反射波)が明瞭に確認できる。

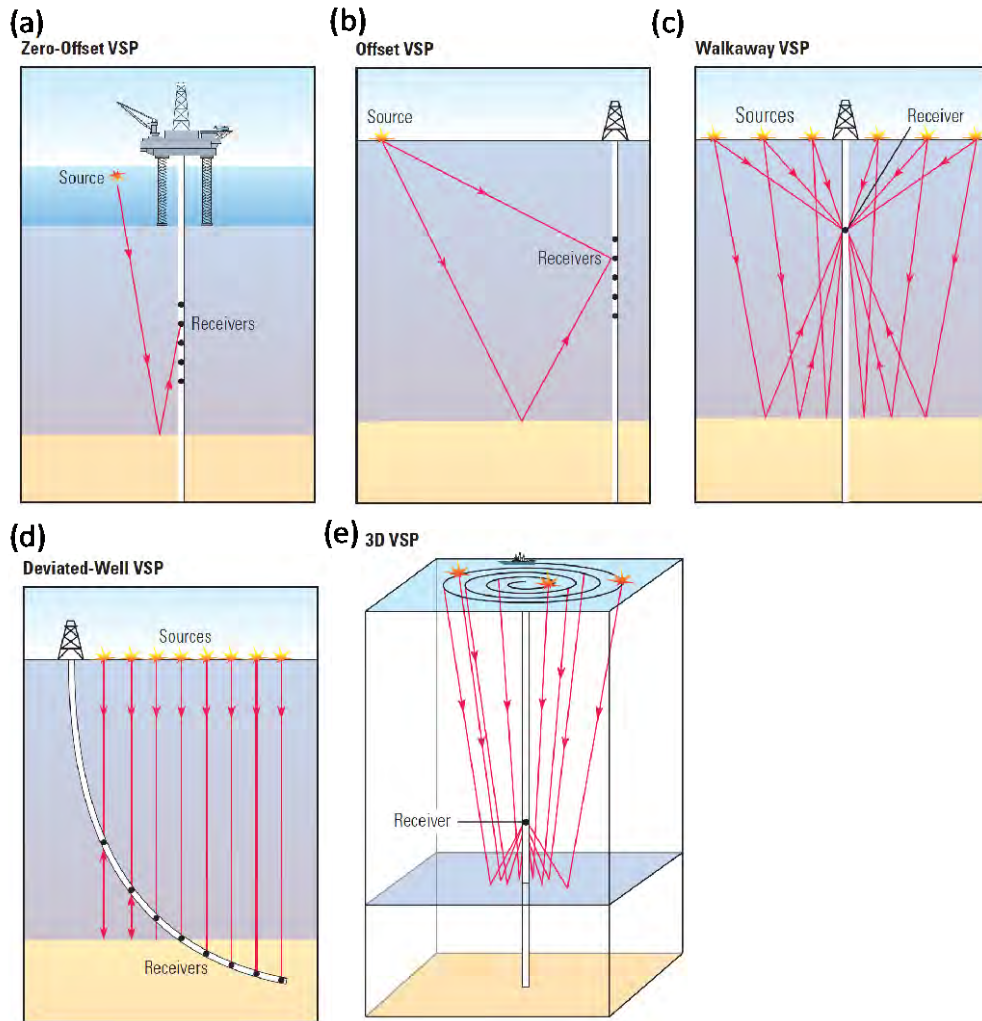


図 3.4.20 様々な VSP 法 (出典: Blackburn et al, 2007)

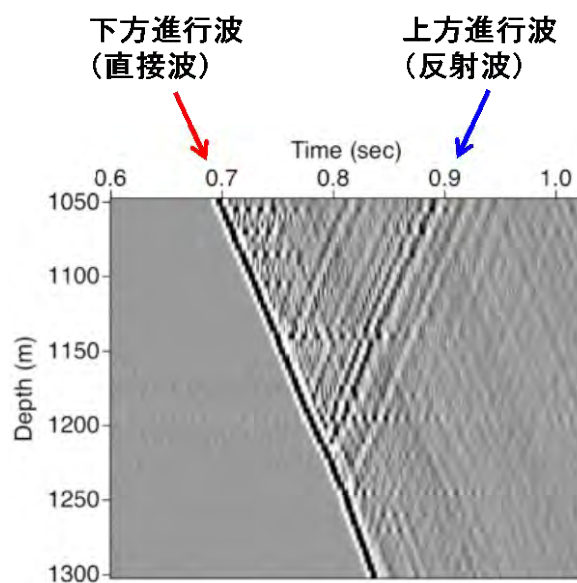


図 3.4.21 Zero-offset VSP における波形記録例 (出典: Matsushima, 2006)

3.4.3 得られる情報とその解釈

実際の検層は地層に掘られた坑井の中に検層機器を降下させて測定するため、その測定量は検層機器をとりまく環境からの影響を多少なりとも受けざるを得ない。さらに、それらの環境は、坑径、坑内温度、泥水浸入領域の有無などのように、測定される深度によっても異なる。通常、検層機器はこれらの検層環境に起因する影響も考慮して、ある特定の環境でより正確に地層の物性値を測定値として出力するように設計されている。実際の検層時の環境が標準条件と大きく異なる場合、検層サービス会社が提供するチャートやソフトウェアを用いて測定量の補正を行うことが必要となる。その一方で、いくつかの最新の検層機器では検層環境による影響を極力減らし、補正が必要な場合も検層時にリアルタイムで行えるように、センサの位置や数および検層機器の機械的な設計や補正のアルゴリズムに数々の改良が施され成果をあげている（物理探査学会, 2016）。以上のようなデータ補正の終了後には、各検層データから得られた測定量の深度を一致させるための深度補正を行う。

ここでは、石油・天然ガス探査を例にとり、各種物理検層において測定・補正されたデータから貯留層を特徴付ける情報へと変換する方法について述べる。この場合、最終的に知りたい情報は、地下に賦存する石油・天然ガスの量（いわゆる資源量）とそこから技術的に取り出せる量（いわゆる埋蔵量）である。これらの量を決定するための方法にはいくつか存在するが、重要なパラメータは、貯留層の層厚、孔隙率、炭化水素飽和率（hydrocarbon saturation）、浸透率の四つである。従って、検層で測定されたデータはこのようなパラメータの同定に資する情報に変換する必要がある。また、検層ログの解釈を行う場合には、各種検層において空間分解能と探査深度の程度が異なることに注意する必要がある。

(1) 貯留層の層厚

ほとんどの油ガス貯留層では、孔隙率ならびに浸透率が小さい場合、水飽和率が大きい場合など油ガスを含んでいない非貯留層が含まれている。全体の貯留層の層厚に対する生産性のある貯留層の層厚の比をネット・グロス比（net-gross ratio）と呼ぶ。ネット・グロス比を決定する最も一般的な方法はガンマ線検層である。頁岩のような非油ガス生産層と頁岩質成分を含まない砂岩から構成される層は、自然ガンマ線を測定・比較することにより明瞭に区別することができる（図 3.4.22）。この場合、自然ガンマ線ログにおいて、頁岩成分が 0%（砂岩基線）と 100%（頁岩基線）を定義できれば、50%などの閾値を使用することにより、貯留層と非貯留層とを区別することができる。

貯留層の層厚を決定する別の方法として、地層の浸透性に着目した自然電位検層を使用できる。一般的に、泥水の塩分濃度が地層水塩分濃度よりも低い場合には、頁岩層に比べて砂岩層は負の自然電位値となる（図 3.4.22）。すなわち、砂岩層の分級程度、浸透率、粘土含有量など電導率に関連したパラメータの良い指標となる。さらにこの場合、上方粗粒化や上方細粒化などの岩相解釈にも役立つ。油ガスを高飽和度で含む砂岩層は孔隙水の比抵抗が大きくなるため自然電位のレスポンスは低くなる。石灰岩層の場合は、その孔隙率にも依るが、概ね頁岩層と砂岩層の間の値をとるのが一般的である。多くの場合、自然電位検層とガンマ線検層は類似したログの傾向となる。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

比抵抗検層においては、孔隙流体の比抵抗特性に大きく依存する。油ガスの存在は水で飽和された地層に比べ比抵抗値を増加させる（図 3.4.22）。また、石灰岩も一般的に絶縁体であり、低孔隙率かつ低浸透率の場合は大きな比抵抗値を示し、薄層の石灰岩を検知する際に有用な情報となる。図 3.4.22 に示すようにガス水接触面（GWC: Gas Water Contact）の特定が可能であるばかりでなく、同様に油水接触面（OWC: Oil Water Contact）、ガス油接触面（GOC: Gas Oil Contact）の特定にも利用できる。

中性子検層においては、水や油に比べてガスの単位体積当たりの水素原子量は少ないため、孔隙がガスで満たされている場合には水素密度が小さくなるため、油とガスの区別を行うことができる。また、砂岩では、石灰岩に比べ中性子の減衰量が小さくなるため、中性子検層のログの値は小さくなる（図 3.4.22）。

音波検層においては、音波検層による速度データと密度検層による密度データ（密度データが得られなかった場合には、密度を一定と仮定）をもとに合成地震記録を作成する。合成地震記録とは、最も単純には基本波形と反射係数列とのコンボリューション操作により作成される。反射係数列は、一次反射のみならず、多重反射を考慮する場合もある。さらには地層の減衰効果、構造傾斜効果、発震・受振器オフセット効果も組み入れることができる。実際の反射地震記録と比較することにより、特定の地層境界からの反射波の同定、岩相変化の推測、多重反射波の判別などが可能であり、反射法地震探査断面における貯留層の層厚の空間的な連続性評価に資する情報を提供する。

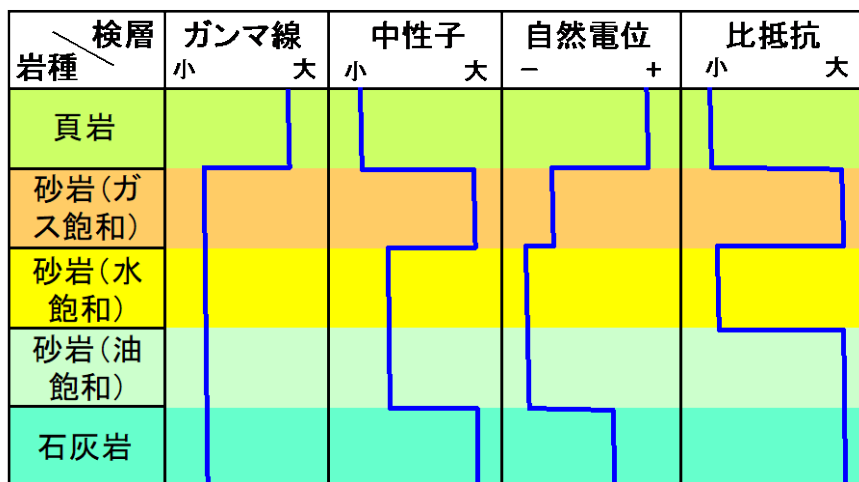


図 3.4.22 比抵抗検層および放射線検層を使用して得られる貯留層の層厚や特性評価の概念図

(2) 孔隙率

孔隙率の測定は、コア試料を用いて直接的に測定する場合と、物理検層を用いて間接的に測定する場合に分けられるが、コア試料は部分的なサンプルであるため、物理検層を用いて孔隙率を測定することが一般的であり、コア試料による測定は比較・検証の位置づけとなる。密度検層が孔隙率を測定する主要な方法である。地層においてコンプトン散乱を繰り返して検出器でカウントされるガンマ線が少なければ密度が大きいことを示唆する。

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

以下の式に示すように、孔隙率 ϕ を有する地層において測定される嵩密度 (ρ_b) は岩石部分密度 (ρ_{ma}) と流体部分密度 (ρ_f) のそれぞれの重み付き平均となる。

$$\rho_b = \rho_f \phi + \rho_{ma}(1 - \phi) \quad (3.4.6)$$

地層の嵩密度 (ρ_b) は密度検層測定により直接得られる値である。その他の測定により地層を構成する岩石とその孔隙を満たす流体を特定できれば、岩石部分密度 (ρ_{ma}) と流体部分密度 (ρ_f) のそれぞれの値においては典型的な値をそれぞれ使用することができ、最終的に以下の式により孔隙率 ϕ を決定することができる。

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (3.4.7)$$

中性子検層においては、高い水素密度の場合は水分量が多いことを示唆するため高い孔隙率が得られる。また、油ガス、特にガスは低水素密度であるため、ガス貯留層において算出される孔隙率は見かけ上、小さく見積もられる。一方、スメクタイトやカオリナイト等の粘土鉱物を多く含む頁岩や砂岩においては、水素が粘土鉱物に含まれるため、算出される孔隙率は見かけ上、大きく見積もられる。既述の通り、中性子検層の値は、水で飽和された石灰岩の場合孔隙率とほぼ等しくなる。

音波検層においては、密度検層の場合と同様に、重み付き平均の考えを用いて孔隙率を求めることができる。岩石部分速度 (v_{ma}) と流体部分密度 (v_f) のそれぞれの値を既知とすれば測定された速度のログ (v_r) から以下の式を用いて孔隙率 ϕ を算出できる。

$$\phi = \frac{v_{ma} - v_r}{v_{ma} - v_f} \cdot \frac{v_f}{v_r} \quad (3.4.8)$$

しかしながら、音波検層によって測定される速度が孔隙率のみの関数であれば、上記のような方法で求められるが、例えば砂岩の場合において孔隙率が大きくても砂粒子同士がごく微量だが強固なフレーム（石英セメントなど）で結合されている場合では、孔隙率は大きくてもその砂岩の速度は大きくなるので適用性に留意する必要がある。

(3) 炭化水素飽和率

ほとんどの油ガス貯留層の孔隙中において、炭化水素が溜まる前に地層水が存在し、炭化水素がトラップに移動してきた際に、水と置換するが完全ではなく部分的に地層水が残る。上述したように、Archie (1942) は貯留岩の比抵抗と孔隙率と孔隙水の特性の関係式を導いた。アーチーの式では電流が孔隙水部分だけを流れることを仮定し、最終的に孔隙水の飽和率 (S_w) を以下の式より求めることができる。

$$S_w = (a/\phi^m \cdot R_w/R_t)^{1/n} \quad (3.4.9)$$

上述したように、 a は迂回係数、 m は膠結係数、 ϕ は孔隙率、 R_w は孔隙水の比抵抗、 R_t は部分的に飽和している場合の岩石の比抵抗（すなわち比抵抗検層により得られる値）、 n は飽和指数である。ひとたび孔隙水の飽和率 (S_w) が算出されれば、以下の式により炭化水素の飽和率 (S_h) が算出される。

$$S_h = 1 - S_w \quad (3.4.10)$$

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

地層の比抵抗を測定する最も一般的な手法はラテロ検層であるが、油ベースの泥水の場合には電磁誘導現象を利用したインダクション検層が使用される。

(4) 浸透率

浸透率は、流体の流れやすさの指標であり、炭化水素の生産性、回収率 (recovery factor)、貯留層性能などの評価の際に重要なパラメータである (2.1.3 (3) 及び 3.5.2 も参照)。坑井周辺の地層の浸透率はコア試料を用いた室内実験測定あるいは坑井試験によって求めることが一般的であるが、物理検層を用いて間接的に求めることも可能である (近年では、直接的に浸透率を求める検層も適用されるがここでは割愛する)。泥水の地層への侵入領域は、浸透率の大小によって差が生じる。探査深度の異なる手法で侵入領域と非侵入領域の比抵抗差を観測できれば、浸透性の良い地層を検知することができる (図 3.4.23)。図 3.4.23 では、低浸透率の頁岩層に、浸透率の大きい砂岩層 (石油を含んでいる) が挟まれている状態を考える。浸透率の大きい砂岩層では泥水が侵入することにより、坑井付近に低比抵抗の泥水侵入領域が形成されるため、探査深度の浅い比抵抗調査では、頁岩に比べて低い比抵抗が得られる。その一方で、この砂岩層には石油が胚胎しているため非侵入領域は高比抵抗となる。

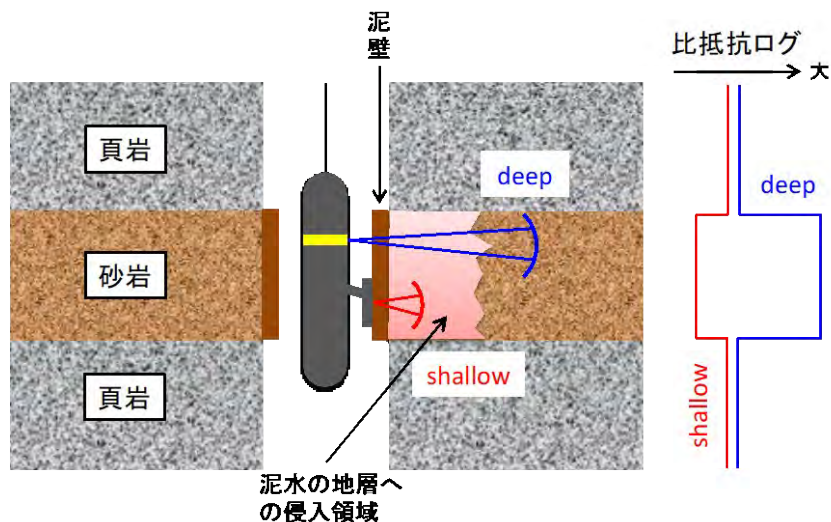


図 3.4.23 探査深度の異なる比抵抗調査による高浸透率層の検知

(5) VSP 法

その他の情報として、VSP 法により得られる情報について述べる。

Zero-offset VSP では、発震により励起された弾性波の初動走時を利用して、時間-深度曲線を作成する。この曲線から、反射法地震探査断面の時間軸を深度に変換することができる。また、この曲線から深度-区間速度も得ることができる。一方、初動以降の記録には、下方進行波と上方進行波が含まれており、これらを分離し反射波を強調する処理を行うことによって、坑井位置での反射面イメージが得られる。この処理は以下のように行う。各

第3章 探鉱から生産までの基礎技術

深度における直達P波の走時分を、その深度で取得された記録において時間方向にシフトさせる。このことにより、反射波を垂直往復走時にあわせ、反射面近傍のみを深度方向にスタックする。この操作により得られる記録はコリドースタック (corridor stack) と呼ばれる (図 3.4.24)。VSP 調査では、探査対象により近づいて地震波を受振するため波動の減衰・擾乱が少ないため、反射法地震探査に比べてより高分解能な反射記録が取得できる。

Offset VSP では、Zero-offset VSP の場合に比べて、より広範な坑井位置から離れた反射イメージを得ることができる。イメージング技術としては、VSP-CDP 変換と呼ばれるデータ処理法やマイグレーション処理法が用いられる。また、複数の震源位置を面的に発震する 3D VSP を適用すれば、三次元反射イメージングが可能となる。

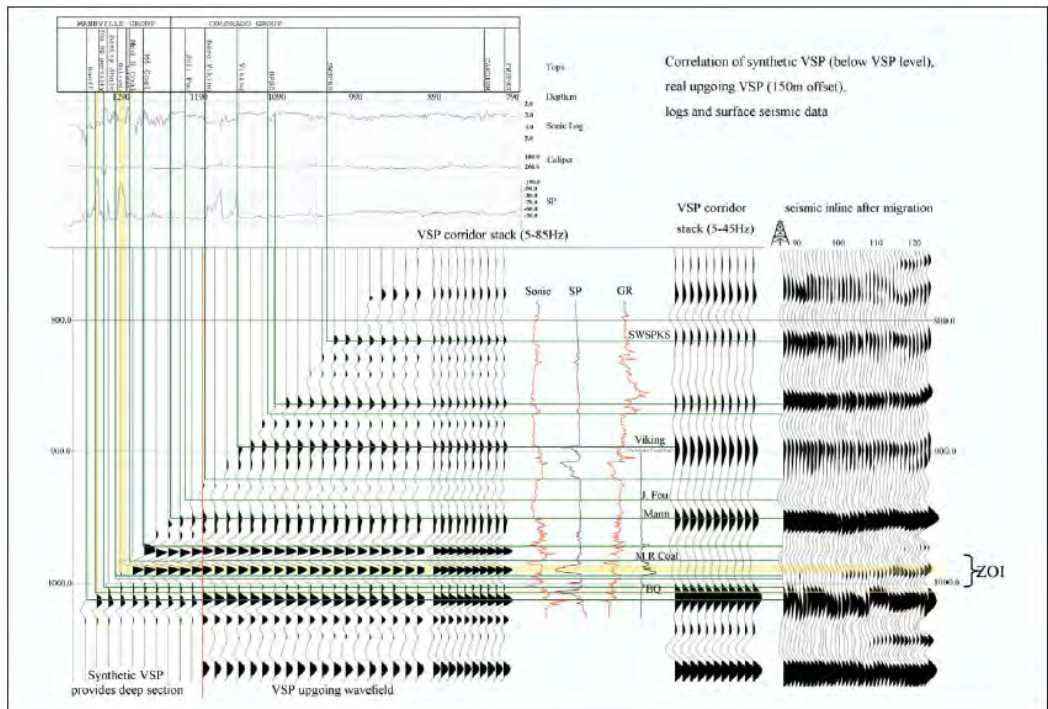


図 3.4.24 Zero-offset VSP 記録から作成されるコリドースタックと他の検層ログとの対比

(出典 : Chopra et al., 2004)