

## 最新の坑井掘削技術（その11）

東京大学 大学院工学系研究科  
エネルギー・資源フロンティアセンター 助教  
長 縄 成 実

石油・天然ガスの掘削では、坑井内にケーシングパイプと呼ばれる鋼管を挿入して坑井を保護します。本連載でもこれまでに、ロータリー掘削法について（本連載その1）や掘削泥水による坑井内の圧力コントロールとケーシングの関係（同その3）、アニユラーガスフローの話（同その7）などの折にケーシングとセメンチングについて断片的に触れてきました。

比較的深度の浅い地下水採取や地質調査などのボーリングでも、同じように掘削中の地層の崩壊などのトラブル回避のためにケーシングパイプが用いられますが、こちらはセメントで固定しない場合がしばしばあるようです。しかし石油・天然ガス坑井の掘削では、ケーシングパイプはセメントによって確実に固定されている必要があり、セメンチングの良否は油の生産挙動をも左右します。今回は、どのようにしてセメンチングを行うのか、その方法について具体的に見てみたいと思います。

### 1. セメント<sup>1-3)</sup>

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すが、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（Portland cement）のことを指します。見た目は灰色の粉末で、これに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す。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ます。硬化した状態の色や硬さがイギ

リスのポルトランド島から産出されるポルトランド石灰岩に似ていることから、ポルトランドセメントと名付けられたとされています。

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、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ます。ベースとなるセメントは、API（American Petroleum Institute）の規格「API SPEC 10A Specification for Cements and Materials for Well」のなかで、次のようなAからHまでの8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ます。

クラス A 地表から1,830 mまでの深度で、特殊な性質が要求されない場合のセメンチングに用いる。

クラス B 地表から1,830 mまでの深度で、中～高耐硫酸塩性が要求される場合のセメンチングに用いる。

クラス C 地表から1,830 mまでの深度で、早期強度が要求される場合のセメンチングに用いる。普通、中、高耐硫酸塩型が利用可能。

クラス D 1,830 m から 3,050 m までの深度の、温度と圧力がある程度高い条件下でのセメンチングに用いる。中および高耐硫酸塩型が利用可能。

クラス E 3,050 m から 4,270 m までの深度の、温度と圧力が高い条件下でのセメンチングに用いる。中および高耐硫酸塩型が利用可能。

クラス F 3,050 m から 4,880 m までの深度の、温度と圧力が非常に高い条件下でのセメンチングに用いる。中および高耐硫酸塩型が利用

可能。

クラス G および H いずれも製造時の状態で地表から 2,440 m までの深度のセメンチングに用いることができ、さらに広範囲の深度および温度条件に適用させるために速硬剤や遅硬剤を添加して使用するための基本セメント。製造の過程ではクリンカーに対して石膏と水以外は加えない。中および高耐硫酸塩型が利用可能。

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ます。逆に、クラス D, E, F は製造の過程で大深度坑井用に成分の調整がなされているためにかえって使い勝手が悪いといえます。このため今日では、クラス D, E, F はあまり使われることがなく、クラス G および H セメントが最も一般的に使用されます。

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ります。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ります。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剤、速硬剤です。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しますが、およそ 1.7 ~ 2.0 程度です。逸泥層がある場合などはもっと比重を下げる必要がありますし、逆に比重を大きくしたい場合もあります。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、これも添加剤によって調整します。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ります。

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

## 2. プライマリセメンチング<sup>1-3)</sup>

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、その後に二次的に行われる補修セメンチング (remedial cementing) の 2 つに大別されます。

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井 (地層) との間隙 (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す。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えます。

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 (two-plug method) とインナーstring方式 (inner-string method) があります。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 (multiple-stage cementing, 単にステージセメンチングともいう) という方法も用いられます。

### 2.1 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間で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 (zonal isolation) することです。

近代石油産業の始まりとされるドレークによる坑井掘削が行われた 1859 年には、石油とともに産出してくる水による生産効率の低下が既に深刻な問題となっていました。この頃の掘削法は機械式の綱掘りでしたが、1860 年代の終わりごろにはケーシングパイプを挿入して遮水することが行われるようになりました。しかし、当初はケーシングパイプを確実に地中に固定する手法は確立されていませんでした。

遮水にポルトランドセメントが初めて用いられたのは、ロータリー掘削法によって掘削されたスピンドルトップでの大噴出井からすぐ後の 1903 年のことです。このときはダンプベイラー (dump bailer) と呼ばれる一種の「つるべ」のような機器を使って坑底にセメントを運び降ろ

す方法が用いられました。1905年には、チューピングを坑底まで降ろし、それを通してセメントをポンプで送入する方法が用いられ、これによってケーシングの下端の坑底付近に送入されたセメントスラリーはそこからケーシングパイプと坑井（地層）との間のアニュラスを上昇し、その間に充填できるようになりました。

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、1910年に初めて用いられた二栓式セメンチングです。上述のようなチューピングは用いず、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します。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、坑井内にあった泥水や後押しする置換流体（泥水）と混ざらないようにします。図1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12m）、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します。

- (1) 第一栓（ボトムプラグ）を投入する
- (2) 先行水を送入する
- (3) セメントを送入する
- (4) 第二栓（トッププラグ）を投入する

- (5) 置換流体（泥水）で後押しする
- (6) 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います。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ます。

先行水はセメントスラリーに泥水が混ざらないようにケーシング内壁をきれいに掃除する役目を持っています。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ります。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しますが、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、ケーシング外側アニュラスへと送出されていきます。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します。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ぎます。

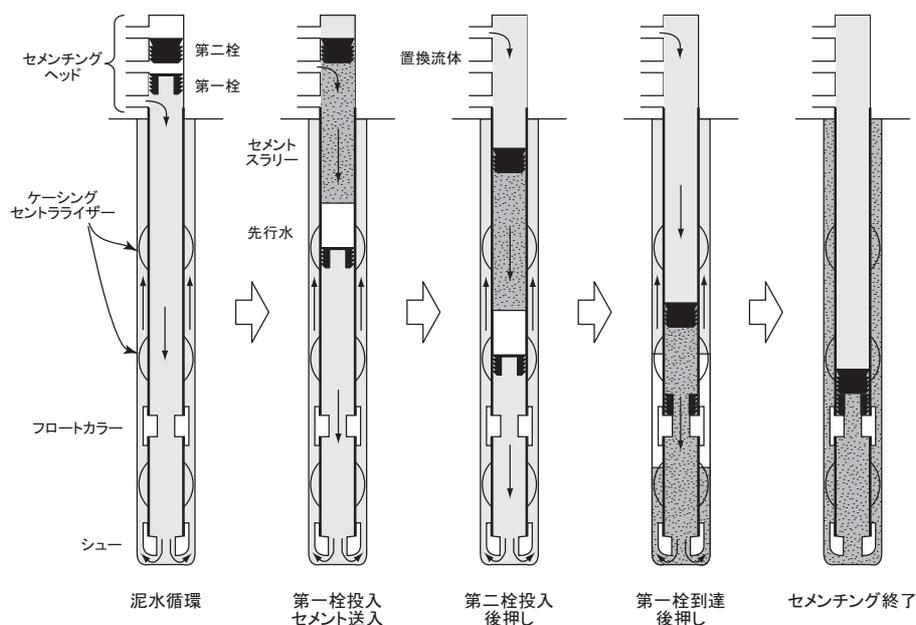


図1 二栓式セメンチング

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す。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します。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操作(管動)も行います。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すが、回転は必須ともいわれています。

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します。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します。

日本では、大正元年(1912年)に当時の最新式ロータリー掘削機一式がアメリカから輸入されたときに、それと同時にセメントを用いた二栓式セメンチングがアメリカ人技師によって伝えられたと記録されています<sup>4)</sup>。

## 2.2 インナーstringセメンチング

図2のようにケーシングパイプの中にセメント送入用のパイプを別に降下して行うセメンチングをインナーstringセメンチングといいます。大口径のケーシングを通常二栓式でセメンチングすると、後押し流体が大量に必要なためオペレーションに長時間を要します。また、セメント硬化時間の調整も困難となるため、その対策としてしばしば用いられます。巨大なセメンチングプラグや地上装置を用いずに済むという利点もあります。

インナーstringには、ドリルパイプ(またはヘビーウェイトドリルパイプ)が用いられます。インナーstringの下端にはシーリングアダプタ(スティングーなどと呼ばれるものもある)と呼ばれるシール機構のついたパイプが取り付けられます。シーリングアダプタは、

坑井内に降下してフロートカラー部に接続されると、それより上部のケーシングパイプとインナーstringの間隙にセメントが回らないようにシールする役割を持ちます。インナーstring内のセメントの送入には、二栓式と同様の方法が用いられます。

通常二栓式セメンチングでは、必要なセメント量をできるだけ正確に見積もった上で適切なタイミングで第二栓を投入する必要があります。これに対して、大口径で比較的浅い深度のケーシングに使用されるインナーstringセメンチングでは、事前の正確なセメント量の見積もりが不要であるというメリットもあります。インナーstringセメンチングでは、セメントを充填すべきケーシング外側アニュラスの容量に比べてセメント送入に用いるstring内の容量が小さいため、セメントがアニュラスを地上まで上昇してきたのを確認してから第二栓を投入しても、アニュラスからあふれて余分となるセメントは少量で済むからです。

## 2.3 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ります。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ります。さらに、高粘

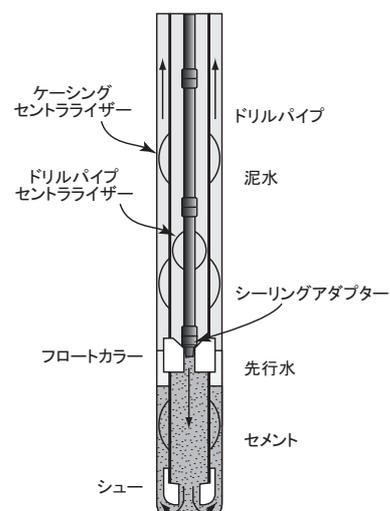


図2 インナーstringセメンチング

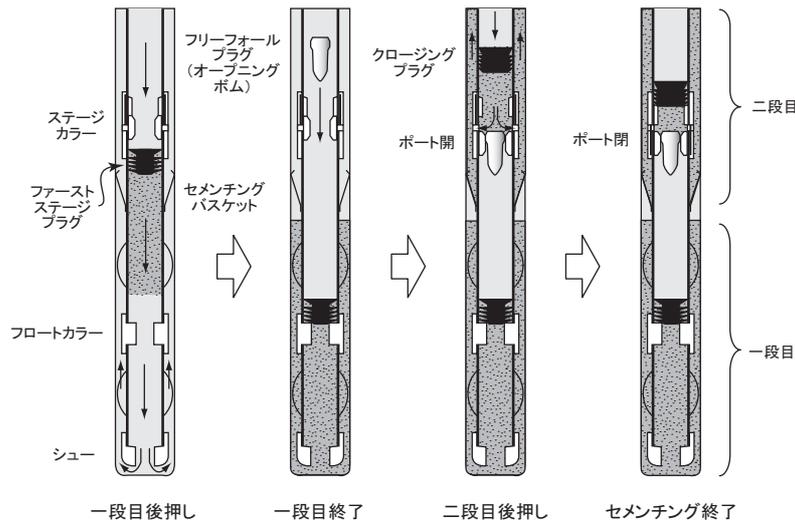


図3 二段式セメントリング

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、セメントリング区間が長くなる程送込作業に高いポンプ圧力が必要となります。このような場合には、セメントリングを複数区間に分けて行う多段式セメントリングが採用されます。

一般的な二段式セメントリング (two-stage cementing) の手順を図3に示します。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します。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トリングを行います。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きます。ステージカラー直下付近のケーシング外周部にはセメントリ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します。

ここに示した方法では、それぞれのステージは二栓式の第一栓を省略した手順とほぼ同じですが、一段目にバイパスプラグと呼ばれる第一栓に相当するプラグを用いる方法や2段目にも第一栓を使用する方法など、いくつかのバリエー

ションがあります。

高傾斜坑井のセメントリングでは、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の使用ができません。このため、一段目のセメントリ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ます。また、高傾斜坑井ではどうしても完全なセメントリングが難しいため、機械的にケーシング外側アニュラスを閉塞するケーシングパッカー (ECP, external casing packer) が併用されることもあります<sup>5)</sup>。

#### 2.4 ライナーセメントリング

既に設置されているケーシングの下端付近の内側にぶら下げるようにして、それ以深に設置される形式のケーシングをライナーと呼びます。ライナー部とその上部の既存ケーシングとで内径が異なるため、ライナーケーシングのセメントリングには、通常二栓式は適用できません。インナーストリングセメントリングのように、ドリルパイプなどの作業ストリングをライナー頭部に接続してセメントを送入する方法を用います。

図4にライナーセメントリングの手順を示します。インナーストリングセメントリングと違って、ライナーパイプ内でもセメントを後押しする必要があるため、ライナー内径に合った大きさのライナープラグが作業ストリングの先端にあらかじめ組み込まれています。二栓式の第二栓に

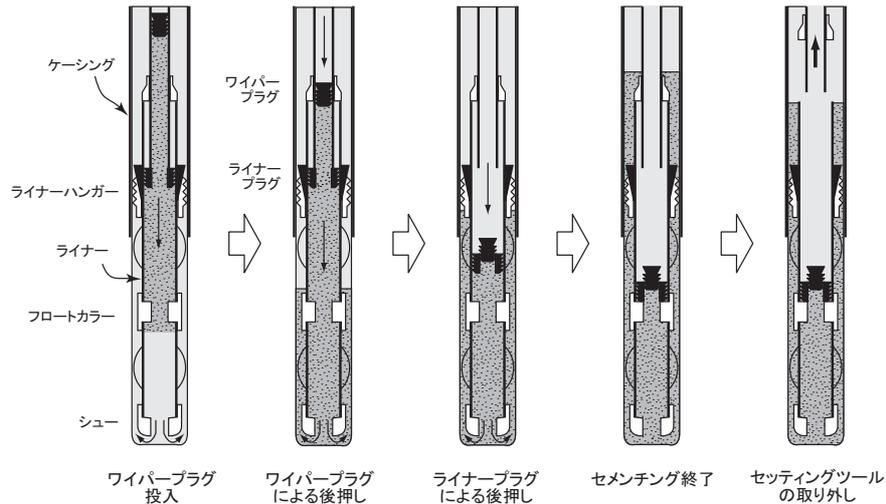


図4 ライナーセメンチング

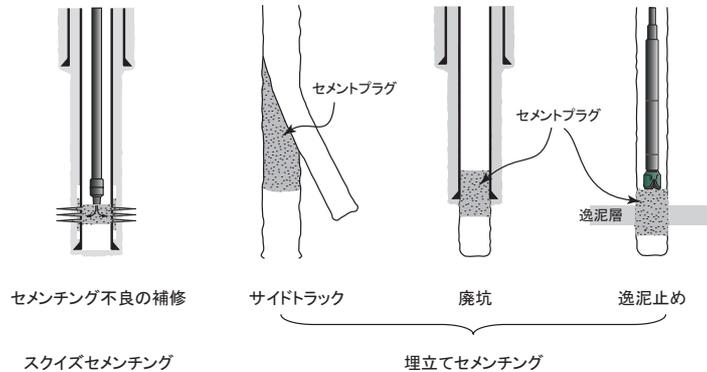


図5 補修セメンチング

相当するワイパープラグが作業ストリング内に投下されライナープラグまで到達すると、二つのプラグが一体になってライナーケーシング内で第二栓の役割を果たします。

通常、ライナーは外側のケーシングと数十 m 程度の区間が重なるように設置されますが、この重なり部分の間隙をセメントで十分に固定することがライナーセメンチングでは重要になります。また、一旦ライナーとして設置したケーシングの上部から坑口までをライナーと同径のケーシングパイプで接続することをタイバック (tie back) といいます。タイバックしたケーシングも多くの場合セメンチングされます。

### 3. 補修セメンチング<sup>1-3)</sup>

プライマリセメンチングによってケーシングを固定して坑井を構築した後に、何らかの理由

あるいは目的のために坑井内の特定の部分にセメントを充填する作業を補修セメンチングといいます。これには大きく、スクイズセメンチング (squeeze cementing) と埋立てセメンチング (plug-back cementing あるいは plug cementing) の 2 つの種類があります。

#### 3.1 スクイズセメンチング

図5のように、プライマリセメンチングの不良や経年劣化によって生じたセメントの亀裂、ケーシングや地層からの剥離などの補修、逸泥対策、生産に伴って生じる隣接した水層やガス層との遮蔽などのために、問題となっている間隙やパーフォレーション孔などにセメントを圧入・充填するセメンチングをスクイズセメンチングといいます。

スクイズセメンチングは、作業ストリングを

通してポンプで加圧しながらセメントスラリーを必要な箇所に圧入します。圧入の際に作業ストリングとケーシングの間のアニュラスをパッカーで密閉して加圧する方法と、パッカーを用いないで坑口でBOPを閉めて加圧するブレードンヘッド法があります。パッカーを用いる方法はセメンチング区間を限定でき、高い圧力をかけられるという利点がありますが、ブレードンヘッド法のほうが用いる機器や方法が単純であり、したがってトラブルの危険性が少ないために好まれることが多いようです。

### 3.2 埋立てセメンチング

図6のように、傾斜坑井やサイドトラック(枝掘り)のためのキックオフ作業、廃坑、逸泥対策などさまざまな目的で坑井内の必要箇所にセメントスラリーをスポット的に送入して坑井を埋める作業を埋立てセメンチングといいます。

セメントスラリーの送入方法には

- ダンプベイラー法
- バランストコラム法
- 二栓式法

などがあります。このうちバランストコラム法が最も一般的で、ドリルパイプを坑井内のセメントプラグ設置予定深度の下端まで降下し、ドリルパイプ先端から管外に出たセメントと管内に残っているセメントの高さがちょうど釣り合うようにセメントスラリーを送入する方法です。ダンプベイラー法と二栓式法は、プライマリセメンチングの項で説明したものと同様の方法です。

### 4. セメンチング作業の評価

ケーシングセメントを実施した後は圧力試験を行って漏洩の有無を確認しますが、圧力試験だけではセメンチングを行った深度区間全域にわたってセメントが良好に充填されているかどうかは分かりません。

そこで、セメンチング作業が終了した後に、セメントとケーシングパイプの膠着状態(bonding)を評価する方法に、セメントボンドログ(CBL, cement bond log)と呼ばれる方法があ

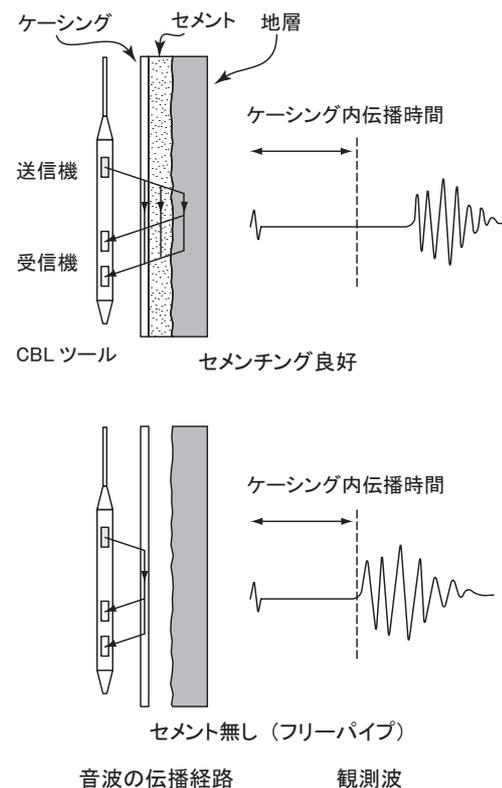


図6 セメントボンドログの原理

ります。これは一種の音波検層で、原理は図6に示すとおりです。坑井内にワイヤーラインで降下したツールからケーシングの内壁に向かって音波を送信し、その反射波を受信機で観測します。膠着状態が良好であると、音波は鋼管からセメントに伝わり地層中に散逸して減衰します。セメントが充填されていなくて鋼管がフリーの状態に比べて、鋼管内を伝播した受信波の振幅は小さくなり、セメントや地層内を伝播して戻ってきた音波が遅れて観測されます。

CBLの元来の原理どおりに受信波の第1波の到達時間だけを観測するだけではセメントとその外側の地層との膠着状態は分かりません。通常は、観測される後続波形を振幅に応じて濃淡表示したVDL(variable density log)と呼ばれる記録を同時に解析することによって、セメントの外側の地層との膠着状態をも評価することが一般的になっています。

セメンチング作業そのものの評価ではありませんが、地層が破壊する圧力まで加圧を行うリークオフテスト(LOT, leak-off test)と呼ばれる

圧力試験があります。ケーシングセメンチング終了後に、ケーシングシュー以下を数 m 程度掘削し、その裸坑部分に対して耐圧テストを行うものです。ケーシングシュー直下の地層破壊圧を求めることで、それ以深を掘進する際の最大許容泥水比重を求めることができます(本連載その3を参照)。また LOT と同じ手法で、地層が破壊して生じたき裂が進展するまでさらに加圧を続け、そのき裂が閉じるときの圧力を計測して最小主応力などのより詳細な地層の機械的性質を求める試験も行われます。これは Extended Leak-off Test と呼ばれます。

## 文献

- 1) 石油技術協会編, 1983: 石油鉱業便覧, 8.2.9 セメンチング, pp. 401-416, 石油技術協会.
- 2) Nelson, E. B., ed., 1990: *Well Cementing*, Elsevier.
- 3) Nelson, E. B. and Guillot, D., eds., 2006: *Well Cementing*, second edition, Schlumberger.
- 4) 松澤傳太郎, 1934: 本邦に於ける鑿井技術の進歩(其の二). 石油技術協会誌, 第2巻, 第4号, pp. 34-52.
- 5) 石油技術協会編, 1993: 最近の我が国の石油開発, 第III編 2.5 セメンチング, pp. 292-299, 石油技術協会.