

最新の坑井掘削技術（その5）

東京大学 大学院工学系研究科
地球システム工学専攻 助手
長 縄 成 実

今回は、地層や岩石を破壊し、坑井を掘削していくためのツールであるビットおよびその周辺の技術を取り上げます。

1. ビット開発の歴史

初回にお話したテキサス州コーシカナでの世界初のロータリー掘削や、その後のスピンドルトップでのルーカスの大噴出井の掘削などが行われた1900年頃の初期のロータリー掘削では、フィッシュテイルビット（fishtail bit）と呼ばれる魚の尾びれのような形状の刃を持った掘削ビットが用いられていました¹⁾。

現在用いられているローラーコーンビットの原型となるツーコーンタイプのロータリーロックビットは、1909年にハワード・ヒューズ（Howard Hughes, Sr.）によって発明されました。この発明をもとに、ハワード・ヒューズは一大ビット

メーカー Hughes Christensen 社のルーツとなる Hughes Tool 社を創設しました。ハワード・ヒューズといえば、飛行家として歴史に名を残し、その半生が「アビエイター」という映画（2005年公開）にもなった息子 Jr. のほうが一般の方々には有名ですが、ローラーコーンビットを発明したのはその父親です。

ローラーコーンビットの登場以降、表1に示すように、新しいタイプのビットの開発とローラーコーンビットの性能向上のための技術革新が現在まで続いています。もうだいぶ前になりますが、筆者が以前に訪れたヒューストン郊外の Hughes Christensen 社の本社工場ロビーには、これらの技術開発の変遷が一目で分かるように歴史的なビットの実物が展示されていました（図1）。

表1 ビット開発の主な歴史

	新しいビットの登場	ローラービットの新技术
1909年	ローラーコーンビット（ツーコーン）	
1932年		ボールベアリング及びローラーベアリング
1933年	トリコーンビット	
1946年	ダイヤモンドコアビット	
1951年	タングステンカーバイドインサートビット	
1952年	ダイヤモンドビット	
1959年		自動注油方式のシールドベアリング
1960年	インプレグネーテッドダイヤモンドビット	
1970年		ジャーナルベアリング
1976年	PDC ビット	
1981年	TSP ビット	
1987年		メタルシールベアリング

2. ビットの種類と掘削機構²⁾

現在の石油・天然ガス開発に用いられる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とフィックスカッタービットの2種類に分けられます(図2)。ローラー



図1 Hughes Christensen 本社工場のロビーに展示されている歴史的なビット(左列一番手前が1920年頃に製造されていた Hughes Reaming Cone Bit)

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、ベアリング機構を介して自由に回転できる3つのコーン(2つや1つのものもある)を持っています。一方、フィックスカッタービットは名前のおり回転部位を持たないビットで、ソリッドビットまたはドラッグビットと呼ばれることもあります。このほかにブレードビットと呼ばれるソリッドビットの一種もありますが、現在はほとんど使われていません。先のフィッシュテイルビットはブレードビットに分類されます。

2.1 ローラーコーンビット

ローラーコーンビットは図3に示すような構造をしています。刃先の種類によってミルドーツースビットとインサートビットの2つのタイプに分けられます。ミルドーツースは、円錐形の鋼材から削り出しによる機械加工で刃先を形成する製造工程がとられ、歯先の材質から鋼歯ビットやスチールーツースビットと呼ばれることもあります。インサートビットは、タングステンカーバイド合金製のチップ状の刃先をコーンに埋め込んだタイプのもので、チップインサートビット、タングステンカーバイドインサート(tungsten carbide insert, TCI) ビットなどとも呼ばれま

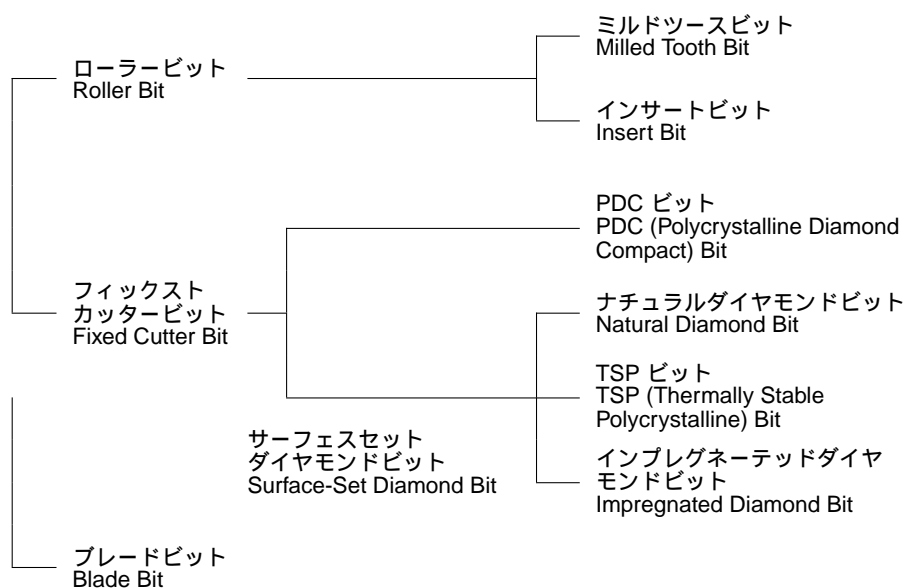
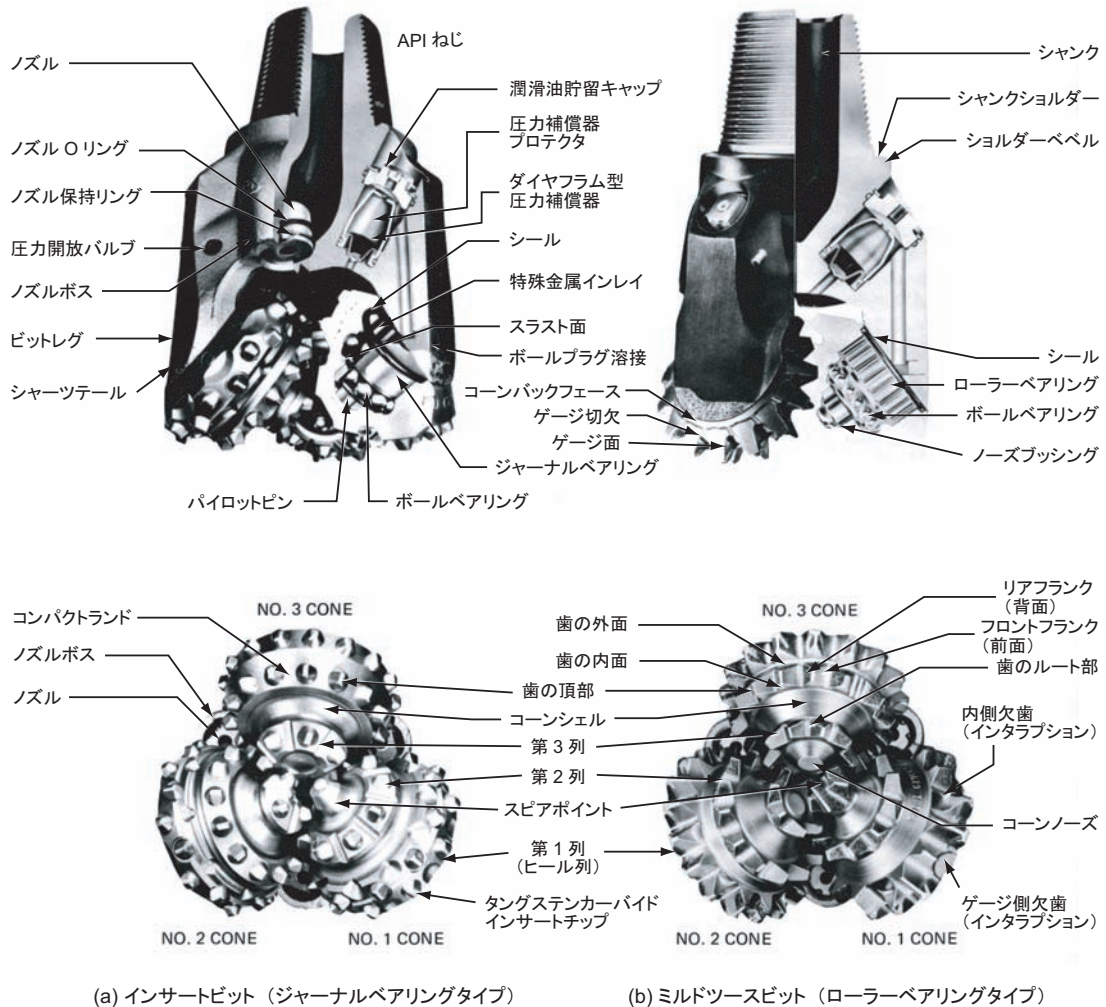


図2 IADC の分類に基づいたロータリー掘削用ビットの種類



(a) インサートビット (ジャーナルベアリングタイプ) (b) ミルドツースビット (ローラーベアリングタイプ)

図3 ローラービットの構造と各部の名称 (文献9より)

す。

ローラービットのコーン上に配置された刃先は歯車のような形状であることから、特に歯先 (tooth) と表現します。ビットの回転に伴ってコーンが回転させられ、一つひとつの歯先が岩石に衝撃を与えて砕いていきます。ローラーコーンビットのコーンは正確な円錐形状ではなく、各歯列が異なる円錐角をもっているため、図4のように、打撃・圧縮作用と同時に引きずり・すくい作用が加わり、効率よく掘削できます。また、図5のように各コーンの中で歯列がうまくかみ合うように配列され、図6のように隙間なく満遍に坑底面を掘削できる仕組みになっています。

2.2 フィックストカッタービット

フィックストカッタービットはダイヤモンドビットと同義で、図7に示すようにPDCビットとサーフェスセットダイヤモンドビットに大別できます。刃先となるダイヤモンドの種類からは、多結晶人工焼結ダイヤモンドを使用したPDC (polycrystalline diamond compact) ビット、天然単結晶ダイヤモンドを使用したナチュラル (天然) ダイヤモンドビット、そして熱安定多結晶人工ダイヤモンドを使用したTSP (thermally stable polycrystalline) ビットに分類することもできます。

PDCは、タングステンカーバイドの母材の上にダイヤモンドの微粉末を焼結した円盤状の層を接合した刃先です。コバルトをダイヤモンド

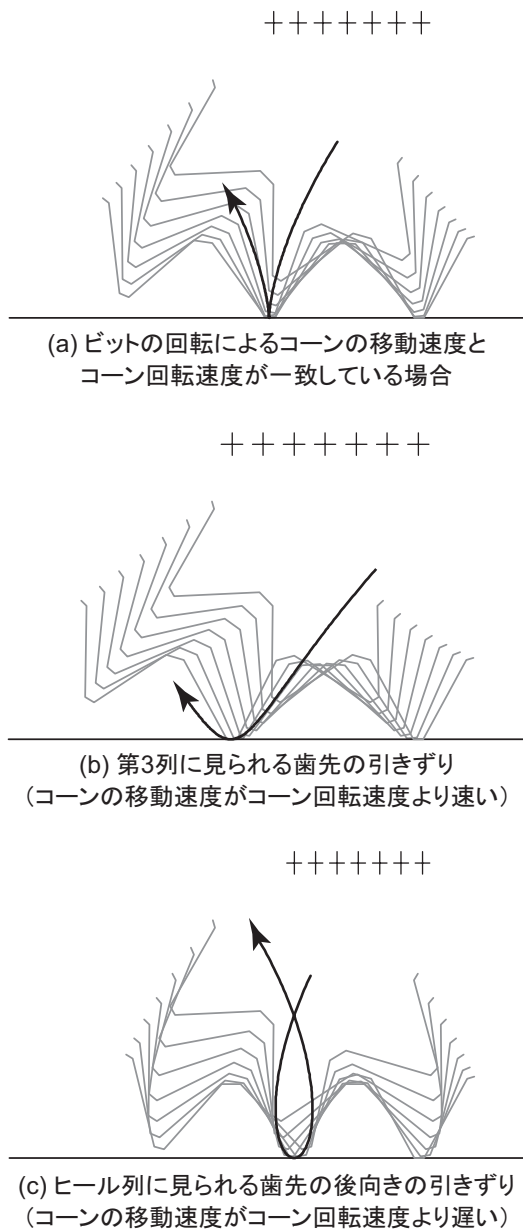


図4 ローラービットのコーンの回転速度と歯先の引きずりの関係

の結合材として混合しますが、コバルトとダイヤモンドの熱膨張率が異なるため、高温になると結合が壊れてしまいます。このため、PDCは熱には弱く耐熱温度は約700°Cとされています。コバルトに変わる結合材を用いたり、形成したPDCからコバルトを浸出させて取り除くなどの処理をして、熱安定性を向上させたものがTSPです。

PDCビットは、ビットに配されたブレード上に、掘削面に対してある角度を持つようにしてPDCの刃先を取り付けてあります。これに対して、ナチュラルダイヤモンドやTSPビットはビット本体の表面に刃先を直接埋め込むために、これらを総称してサーフェセットダイヤモンドビットといいます。TSPは、結合材となるコバルトを除去するためにPDCのようにタングステンカーバイドの母材の上に形成して円盤状の大きな刃先にすることが難しく、三角柱

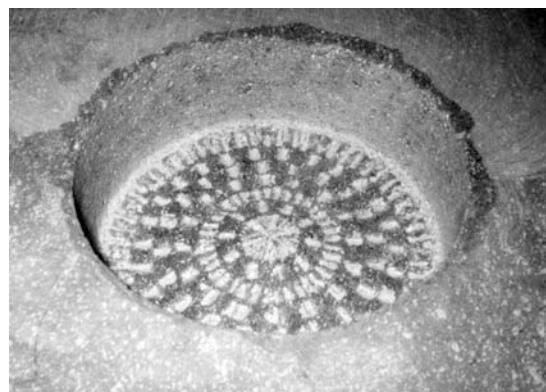


図6 ローラービットの掘削によって形成される坑底面上の歯先の軌跡(坑底パターン)

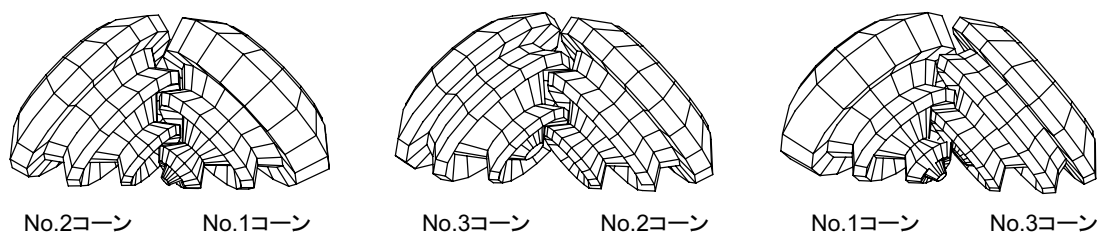


図5 ローラービットの歯先のかみ合い配置 (interfit) の様子

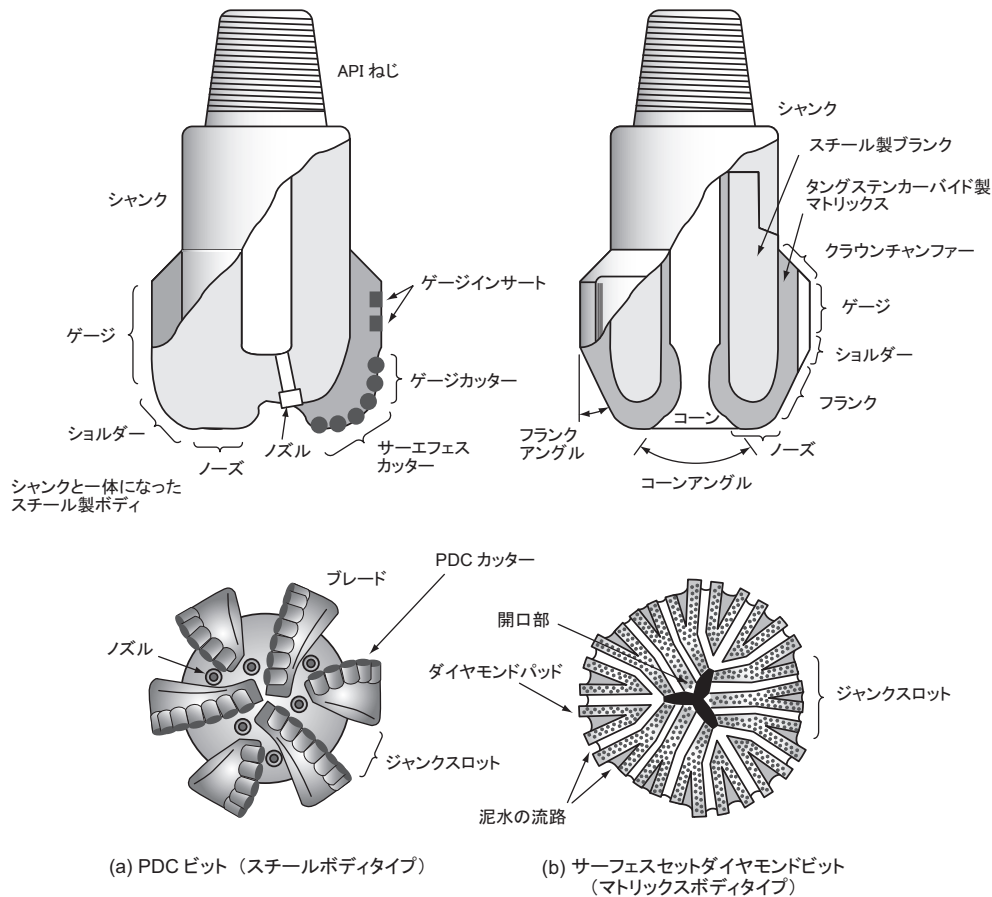


図7 フィックスタービットの構造と各部の名称

や角柱の比較的小さなチップとして製造されます。このため、一般的な TSP ビットはサーフェセットビットになります。この他に、砂粒ほどの小さな天然ダイヤモンドや PDC (あるいは TSP) の粒をタングステンカーバイド製のマトリックスの内部に多数埋め込んだタイプのサーフェセットビットをインプレグネーテッド (impregnated) ダイヤモンドビットといいます。研磨性の高い地層を掘削するときに、マトリックスが摩耗するにしたがって徐々に新しいダイヤモンドが露出していく仕組みです。フィックスタービットの掘削機構は、図8に示すように、ローラービットとは異なり、掘削面に対して削る作用が主体になります。

フィックスタービットのボディの形式にはスチールタイプとマトリックスタイプがあり、製造工程が異なります。マトリックスタイプは、芯となるスチールの胴体 (ブランク) に

タングステンカーバイド製のマトリックスを被せた構造になっています。ダイヤモンドの刃先を配置した鋳型のなかにタングステンカーバイドを焼結して、刃先を取り付ける工程と同時にマトリックスを形成します。スチールボディタイプのビットは、胴体をすべて機械加工による切削で形成し、表面に開けておいた穴に後から PDC を取り付けます。

2.3 ビットの分類システム

現在、十数社のビットメーカーから 3,000 を超える種類のビットが製造・販売されています。World Oil 誌の毎年 9 月号に、これらを網羅した「Drill Bit Classifier」と題するビットの一覧が掲載されます。これだけ多くの種類のビットがあると、違うメーカーの製品の比較が容易にできるような、仕様に基づいた統一的な分類システムが必要になります。現在、掘削請負業者

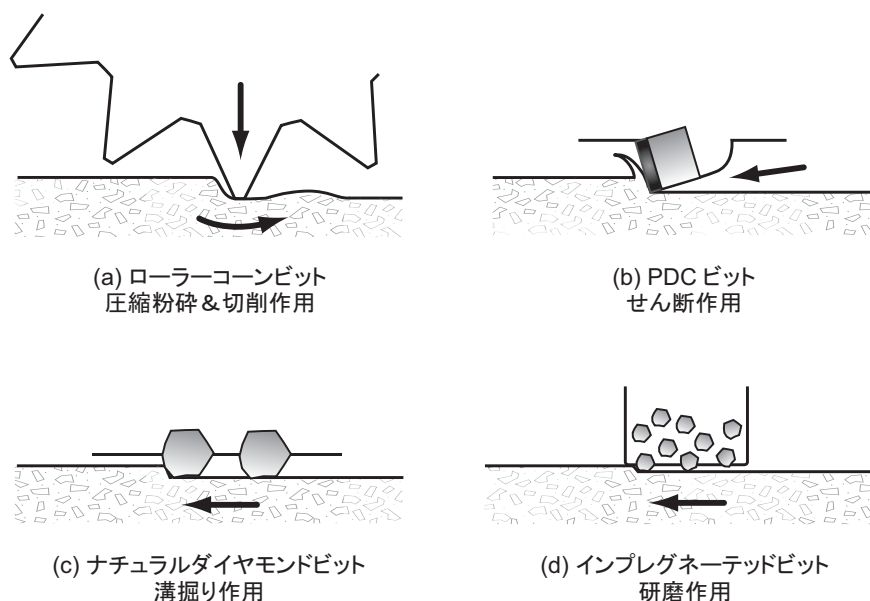


図8 ビットの種類による掘削作用の違い

(drilling contractor)の協会であるIADC(International Association of Drilling Contractors)によるビット分類システムが広く用いられています。

IADCによる分類システムは、ローラーコーンビットがほぼ完成された形になっていた1972年に初めて定められました。3桁の数字にオプションのアルファベット記号を付した分類記号を用いたもので、1981年のマイナーチェンジ、1987年の大幅改正、1992年に微修正を経て現在に至っています。例えば、中硬質岩を対象としたシールドジャーナルベアリングタイプのインサートビットであれば、IADCコードは「637」などと表します。

一方、フィックスカッタービットについては当初は分類システムがありませんでしたが、1981年にローラーコーンビットの分類に倣った3桁の数字の頭にダイヤモンドを意味する「D」を付けた表記による分類システムが作られました。しかし、この時期はまだPDCビットなどが開発途上であったため、その後の技術の進歩に合わせて1987年にはフィックスカッタービット独自の新しい分類システムが定められ、さらに1992年に大幅な改正が行われまし

た。現在は、マトリックスボディを意味するMまたはスチールボディのSに続く3桁の数字による分類記号が用いられています。例えば、中程度の大きさのPDCを多数配置したマトリックスボディのPDCビットなら、IADCコードは「M423」などと表します。

ビットの種類や分類システムについて詳細を述べるにはとても紙面が足りませんので、ビット全般に関する情報を網羅した非常に有用な資料として、石油技術協会発行の「ビットマニュアル」²⁾を紹介しておきます。ただし、「ビットマニュアル」は1995年発行ですが、付録に収録されているIADC分類システムは1987年版に基づいているようですので注意が必要です。

3. ビット開発の最近の動向^{3,4)}

以上に見たように非常に多種多様なビットを利用することができますが、通常の掘削で現在使用されるビットは、ほとんどの場合、ミルトゥースビット、インサートビット、PDCビットの3種類です。

PDCビットの信頼性や性能の向上もあり、ローラーコーンビットからPDCビットへと徐々に移行する傾向にあります。ダウンホールモー

ターを用いた高回転での掘削では、回転部位の無いフィクストカッタービットのほうが信頼性が高い場合もあります。世界で掘削に使用した全ビットに対して PDC ビットの占める割合は、掘削距離 (footage) ベースで、2000 年は 26%、2003 年は 50%そして 2006 年には 60%に達したといわれています。PDC ビット使用の増加傾向は今後も進むと考えられますが、それでもローラーコーンビットは PDC に比べて安価であり、地層の種類によってはローラーコーンビットのほうが断然優れている場合もあるので、将来ローラーコーンビットが無くなってしまふようなことはないでしょう。同じように、ローラーコーンビットも、硬質の岩石の掘削により適したインサートビットの使用が多くなる傾向にありますが、ミルドーツスビットが消えてしまふことは今後も無いと考えられます。

さて、1本の坑井を掘削するためには、いくつものビットを使用することになりますが、ビット自体のコストは、全体の掘削費から見ればそれほど大きなものではなく、せいぜい数%程度であるといわれています。摩耗や破損して掘れなくなったビットを新しいものに取り替えながら掘削をしていくわけで、そういう意味ではビットは消耗品といえます。しかしながら、深度が深くなるにしたがって、摩耗したビットの交換などのために行う揚降管(トリップ)作業に要する時間とコストは無視できないほど大きなものになります。ビットの掘進速度や耐久性(ビット寿命)などの性能の向上は、掘削コスト削減にとって非常に重要な鍵になります。

ビットに関する技術開発は、当初は掘進率すなわち掘削効率の向上に主眼が置かれ、TCI ビットの登場のように歯先の改良や強化などの様々な改良が行われました。掘削の大深度化が進むにつれて高荷重や高回転、高温に対する強化も重要な課題となり、ローラーコーンビットのベアリングの性能向上が図られました。例えば、高荷重、高回転に対しては、スラスト荷重を面で支えられ、より耐久性の高いジャーナルベアリングが導入され、さらにベアリング面の銀メッキ処理などの改良が行われました。耐高温に対

する技術開発としては、弾性体を使った従来の Oリングシールに代わるメタルシールの開発などのベアリングシール機構の改良が挙げられます。また、摩耗によるコーンの脱落を防止するためにコーン保持機構の改良もされています。フィクストカッタービットでは、衝撃や熱、したがって研磨に弱いとされてきた PDC に対して、その上部表面を TSP の薄層に形成するなど、弱点を克服するための研究開発が続けられています。

現在では、有限要素解析 (finite element analysis, FEA) による応力解析や数値流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) によるハイドロリクスの計算 (掘削除去のためにノズルから噴出される泥水の流動計算) などをもとに、コンピュータを用いてビットの設計および加工・製造が行われるのが当たり前になっています。また、ビット技術の最近の傾向はとして、掘削効率と耐久性(寿命)のほかに傾斜制御性と振動に対する安定性が求められるようになっていきます。掘削中にビットに作用する力が偏り無くバランスするようにして不要な振動の発生を抑制したり、傾斜掘削時に傾斜制御をしやすいデザインに設計することも、こういった FEA などの解析を用いて行われています。

4. 掘削中のビット振動を利用した技術

先ほど述べたとおり、掘削深度が深くなるほどビット交換などのための揚降管作業にかかるコストが無視できなくなります。しかし、ビットの摩耗状態や適切な交換のタイミングを把握するのは大変困難です。その一つの大きな要因は、掘削作業とは、直接目で見ることのできない地下数千メートルの坑井内の状態を、おもに地上で計測あるいは取得されるデータをもとに「推定」しなければならないことにあります。ここまでは、岩石・地層を掘る道具としてのビットの性能向上のための技術開発について述べました。少し視点を変えてビットの振動を利用して掘削時に地下の状態をモニタリングする技術の話をしていきましょう。

4.1 MWD 技術と掘削時振動の計測

前にも触れたように、近年では、MWD (measurement while drilling) によって掘削中に計測した坑底での種々のデータをリアルタイムに地上でモニターすることが可能となっています。MWD システムは、1970 年代後半に最初のシステムが商業化され、その後 1980 年代の精力的な技術開発により飛躍的に信頼性が向上しました。

一方、掘削にともなって発生する掘削装置の振動は、BHA や坑内機器の損傷を招き、掘削トラブルにつながると考えられていたため、ドリルストリングの振動を制御するための研究が従来より行われてきました。掘削中に発生する振動の計測と解析は、MWD システムの開発を待たずして開始されました。地上での振動計測は、1959 年に Shell Development 社が行った計測が最初で、ドリルストリングの最上部すなわち地上部の軸力、トルク、軸方向運動および回転運動を計測し、データの解析が行われました。坑井内での計測は、Esso Production Research 社が掘削時の坑底振動を記録する坑内機器の開発とデータ取得実験について報告したのが最初で、1964 ~ 1966 年にかけて現場実験が行われました。

本邦でも 1990 年前後の基礎試錐の掘削において、Exlog 社の DownHole Vibration Monitor (DHVM) と呼ばれる BHA 編成内に組み込んで使用する坑内機器を使って坑底振動計測実験が行われました。

4.2 掘削時振動を利用した地下情報の取得

不要な掘削時の振動をできるだけ抑えようとするそれまでの考え方とは違って、ビットによる掘削時の振動から地下の情報を取り出そうという試みを最初に行ったのは Lutz ら⁵⁾です。彼らは、ローラーコーンビット特有の掘削機構である持ち上げ運動、つまりビットの上下方向の振動に着目し、ドリルストリングの地上部分(ケリー)で計測した振動の振幅データと物理検層データとの間に強い相関が認められることを報告しました。1972 年のことです。この研究によって、ビットによる掘削時に発生する振動は

坑底の状態を診断するための有望な情報源となり得ることが示唆されたといえます。

より具体的な研究が行われるようになったのは、MWD 技術開発が盛んになった 1980 年代後半になってからです。シュルンベルジェ社の技術研究所である Schlumberger Cambridge Research の Cooper ら⁶⁾は、室内での岩石掘削実験によって測定したローラーコーンビットの振動データに対してスペクトル解析を行い、「ビット歯先に摩耗が生じるとコーン回転速度が増加し、振動スペクトルのピーク周波数が大きくなる」という実験結果を示しました。つまり、掘削中のコーン回転速度を直接モニタリングすることができれば、ローラーコーンビットの摩耗状態を診断する有効な手段のひとつになると考えられます。しかし、コーン回転速度を直接測定するためにはビット本体あるいはビットに非常に近い位置にセンサー機器を取り付ける必要があります。実坑井において掘削中にコーン回転速度の測定を行うことは難しいのが実情です。そこで、間接的にコーン回転速度を測定する試みや振動データの解析手法など、ビット振動から摩耗状態を推定する方法が、本邦でも石油公団を中心として研究されてきました⁷⁾。

これらの研究の成果は、いずれもビット振動を利用したビット摩耗診断手法の開発の可能性を示したものであるといえますが、振動の周波数特性とビット摩耗度との関係の定量的な解析は難しく、実用的なビット状態診断システムの開発には至っていません。MWD 技術によって地下の情報を得ることができるようになりましたが、多くの MWD データは坑底で何が起きているかを直接的に明示するものではありません。限られたデータの解析や解釈によって、いかに坑内状況を正確に推定するかが今後ますます重要な課題となっていきます。

4.3 SWD

振動を利用したモニタリング技術のうち、現在実用化されているもののひとつに Seismic While Drilling (SWD) があります。これは、坑井内に受振器を設置してデータ取得を行う地震探査

法である VSP (vertical seismic profiling) と同じ原理を用いながらも, VSP データを掘削中にリアルタイムに取得できる地震探査技術といえます (図 9)。地震探査断面上での時間と深度の関係を, 掘削中に得ることができます。

実際には, ドリルビットサイスミック (drill-bit seismic) と呼ばれるものが実用化されています⁸⁾。掘削中のビット振動を震源として, 地表や海底面に配置した複数の受振器 (ジオフォンあるいはハイドロフォン) で地層中を伝播する信号 (地震波) を受信します。同時に地上で掘削装置の振動を測定し, これをパイロット信号として, 受振器で測定される信号との相互相関関数を計算します。相互相関関数は 2 つの信号の間の時間遅れを表現できますから, ビットから地層中を通して直接に, あるいはビット以深のある地質構造に反射して間接的に地表に到達した信号のそれぞれの到達時間を知ることができます。SWD は掘削中の深度より先の情報を得ることが可能な MWD 技術であるともいえます。

この方式の SWD はビットを震源としているために特別な坑内ツールを必要とせず, 掘削作業を中断する必要が無いなどの利点がありますが, ビットの種類や掘削する地層によってデータの品質が大きく左右されるなどの制約もあります。先ほど説明したビットの掘削機構から考えると, 一般に, 比較的硬質の岩石をローラーコーンビットで掘削しているときにビットが発生する振動の強度が最も大きく, SWD の震源に適しているといえます。

自然震源であるビットに代えて人工震源を用いる手法の開発も行われています。ビット直上に人工震源となる機器を組み込み, 地表や海底面に配置した受振器で受信する方法や, 逆に人工震源を地上または海中に置いて, 掘削編成に組込んだセンサーツールで信号を受信する方法が考えられています。後者の方法は, 震源と受振器の位置関係は通常の VSP と同じですが, 他の SWD と同様にリアルタイムで掘削中に地震探査データを取得できます。

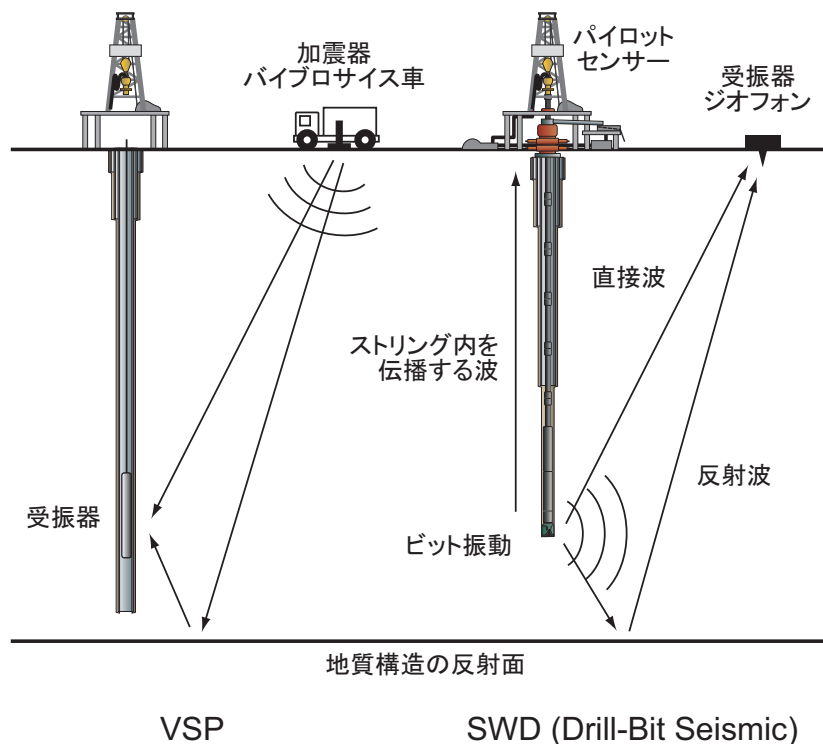


図 9 SWD と VSP の概念図

文献

- 1) Brantly, J. E., 1971: *History of Oil Well Drilling*, Chapter 21 Rotary Bits, pp. 1059–1120, Gulf Publishing Company.
- 2) 作井マニュアル分科会, 1995 : ビットマニュアル, 技術資料 15, 石油技術協会作井技術委員会.
- 3) Lord, R., 2006: Bit Technology Keeps Pace with Operator Activity. *World Oil*, Vol. 227, No. 11, pp. 71–80.
- 4) Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, E., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. and Watson, G., 2000: On the Cutting Edge. *Oil-Field Review*, Vol. 12, No. 3, pp. 36–57.
- 5) Lutz, J., Raynaud, M., Gstalder, S., Quichaud, C., Raynal, J. and Muckleroy, J. A., 1972: Instantaneous Logging Based on a Dynamic Theory of Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 24, No. 6, pp. 750–758.
- 6) Cooper, G. A., Lesage, M., Sheppard, M. and Wand, P., 1987: The Interpretation of Tricone Drill Bit Vibrations for Bit Wear and Rock Type. Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference, June 14–18, New Orleans, Louisiana, pp. 202–218.
- 7) 長縄成実, 2006 : ローラーコーンビットの動力学モデルの構築とそのビット振動解析への応用, 博士論文, 東京大学.
- 8) Kamata, M. and Kasamatsu, T., 2000: Development of Drill-Bit Seismic Technique for Deep Water Drilling. 石油技術協会誌, 第 65 巻, 第 5 号, pp. 450–458.
- 9) Hughes Tool Co., 1976: *Tricone Bit Handbook*.