用語解説

SWD

小澤 岳 史*

(Received 16 January, 2002; accepted May 15, 2002)

A commentary on "SWD"

Takeshi Kozawa

Abstract: SWD (Seismic While Drilling) using a drill bit as the seismic energy source while drilling is one of the techniques that can be used for obtaining time-to-depth information and formation image. The fundamental concept of SWD data acquisition and processing is briefly described in this paper.

Key words: Seismic While Drilling, Drill bit reverse VSP, Time-to-depth information

1. SWD とは？

SWD (Seismic While Drilling) とは、掘削作業を実施しながら掘削中の地層特性を調査する MWD (Measurement While Drilling) 技術の 1 つである。この技術は、坑井掘削中にビットが岩石を砕く際に生じる弾性波を震源とし、坑井周辺の地下構造を調べることを目的としており、その成果としては、1) 掘削深度までの速度情報 (T-D カーブ) および 2) ビット前方の地質情報 (反射境界イメージ) などが挙げられる。掘削中のドリルビットの振動を震源として使用する考えは Weatherby (1936) によって初めて提唱された。その後、Deily *et al.* (1968) は歪ゲージを用いて掘削編成のさまざまな部位での振動を測定し、振動がドリルビットの歯と地層の相互作用によって生じていることを確認し、Lutz *et al.* (1972) は掘削編成の頂部に取り付けた受振器でドリルビットで生じた振動を受振できることを示した。Rector and Marion (1991) は、この掘削編成頂部 (ウォーター・スイベル) での受振器 (パイロットセンサー) によるデータと地表受振器によるデータを相互相関することにより、ビット震源が地下の情報を抽出するために有効に利用できることを示した。この方法は、当

時彼らが所属していた Western Atlas International 社の登録商標である TOMEX の名前 (この名前は Rector および Marion がこのサービスを始めた会社 (後に Western Atlas 社に吸収された) 名に由来している) で広く世に出された。この技術は、坑井内発震—地表受振であるため、同じ目的で実施される地表発震—坑井内受振である VSP (Vertical Seismic Profiling) に対して、いわゆる逆 VSP の 1 つとして位置付けることができる (Fig. 1)。したがって、この技術は Drill bit reverse VSP と呼ばれることも多い。石油および天然ガスの探鉱開発の分野においては、この TOMEX 方式の適用がほとんどであるが、パイロットセンサーを利用しない方法についても研究・開発が進められている (浅沼ほか, 1996)。本稿ではパイロットセンサーを用いる方式についてのみ解説する。

先に述べたように、石油および天然ガスの探鉱分野に

小澤・鶴(1998)による

Fig. 1 Concept of SWD and VSP.

* (株)地球科学総合研究所 (JGI, Inc.)

においては、そのパイオニアとして Rector の業績（例えば、Rector and Marion, 1991；Rector and Hardage, 1992）が有名である。その後 Agip 社および IFP のグループによって積極的に研究が行われ（例えば、Miranda *et al.* 1996, Naville *et al.* 1992ら）、現在では主なコントラクターによる通常のサービスも行われるようになっている。我が国においても石油公団を中心に積極的に研究開発が行われており、物理探査の世界においては芦田（1997）による用語解説もなされている。

VSP と比較した場合の SWD の長所としては、(1) 坑井掘削中にほぼリアルタイムで T-D カーブ情報が得られる、(2) 坑井にダメージを与えない、(3) 特別な震源を必要としない、(4) 掘削を中断することが無いためリグコストが節約できる、(5) 坑井内の高温に対する機器の制限が無いなどが挙げられる。一方、短所としては、(1) リグ周辺のノイズ源（Miranda *et al.*, 1996；鶴・小澤, 1998）によって高い S/N 比が得られない、(2) 得られるデータの品質がビットの種類や地層の硬さに依存する、などがある。これらの短所を克服するための技術開発も石油公団（鶴ら, 1998b；溝畑ら, 1998）によって行われてきたが完全な実用化には至っていない。

2. データ取得方法

SWD のデータ取得原理を Fig. 2 に示した。坑井掘削時にビットで発生する弾性波は、時々刻々と変化するいわゆるランダムな波形であり、坑井掘削時にリグが発生する周期的な弾性波（ノイズ）に比べエネルギーが小さ

い。このため、SWD データの S/N 比を向上させるために、パイロットセンサーと呼ばれる受振器をリグに取り付け、そこで同時に取得する振動をパイロット（リファレンス）信号として用いた相互相関を計算する必要がある。パイロットセンサーの取り付け位置またその利用方法などについては、複数のセンサーをリグに取り付けてパイロット信号を最適化する試み（Miranda *et al.*, 1996）や、ビット近傍の管体に設置したセンサーで取得したデータを掘管に埋め込んだケーブルを介して地上まで伝播させることによってパイロット信号を向上させる試み（Naville *et al.*, 1994）、3 成分データを用いてパイロット信号を改善させる試み（Rector, 1992）などがなされている。Bernasconi *et al.* (2001) は、ビットの直上で取得した良質のパイロット信号を、時間領域から角周波数領域に変換して圧縮（encode）する方法を提案している。リファレンス信号との相互相関を用いる手法は、バイブレーター震源を用いた VSP と同様であるが、ビットによるエネルギーが小さいため、S/N 比を向上させるために長時間（10～20 分程度）データの相互相関計算を行う場合が多い。現在では、この相互相関計算は殆どの場合、オンサイトでデータ取得と同時に行われるようになっている。SWD で得られる信号としては、VSP と同様に、i) 直接波：ビットから地表受振器に直接到達する波、ii) 反射波：ビット以深にある地層境界面で反射して受振器に到達する反射波などが挙げられる。一方、ノイズとしては、iii) コニカル波：ドリルパイプ（掘管）を伝播してから受振器に到達する屈折

Fig. 2 Principle of SWD. Cross-correlation between pilot trace and surface geophone data is required to get the good S/N ratio. Conical wave and rig arrival (ground roll) are typical noises in the land SWD survey.

波, iv) 表面波: リグから地表を伝播して受振器に到達するリグアライバルと呼ばれる波などが陸上での調査で観測される場合も多い (Fig. 2)。Rector and Hardage (1992) によれば, 坑井掘削中のビットからは坑井に直行する方向に非常に大きな SV 波が生じ, P 波および SH 波のエネルギーは小さく, P 波の伝播する領域は坑井の近傍に限られてしまう (Fig. 3)。SWD データ取得を計画する際には, 震源エネルギーの伝播パターンを考慮しながら, これらのノイズを避けるようなデータ取得ジオメトリーを考える必要がある (鶴ほか, 1998 a)。また, 表面波の除去には受振器のクロスアレイが有効な場合もある (小澤・鶴, 1998)。Table 1 には後に例として示す SWD データ (Fig. 5 ~ 7) 取得仕様を示した。掘削している地質によっては, ビット荷重, 回転数などの掘削パラメーターをコントロールすることが有効な場合もある (小澤・鶴, 1998) が, このためには掘削技師の理解と協力が不可欠である。

3. データ処理技術

Fig. 4 に SWD のデータ処理フローチャート例を示した。処理フローおよび処理技術は VSP と同様の部分も多いが, 以下に, SWD に特徴的な処理について概説

Rector and Hardage(1992)による

Fig. 3 Radiation pattern of seismic waves generated by a working roller-cone drill bit

Table 1 Example of data acquisition parameter

Recording depth	1,000~2,700m
Recording depth interval	9m
Record Length	10minutes
Sampling Interval	2msec
No. of channels	48ch
Offset distance	600~1,400m

小澤・鶴(1998)による

Fig. 4 Flow chart of SWD data processing to obtain time to depth information and the reflection image.

する。

(1) 発震時刻補正 (Time Zero Correction) と掘管の速度の推定 (Estimation of Drill Pipe Velocity)

SWD のパイロットシグナルは震源の位置とは離れた場所で観測される。そのため, 相互相関後のタイムゼロ (ラグタイムゼロ) は, ビットにおいて弾性波が生じた時刻とは一致しない。SWD の場合, ビットで生じた弾性波が掘管などを伝わってパイロットセンサーに到達した時刻が相互相関後のタイムゼロとなる。したがって, SWD データを用いて逆 VSP 型のデータ処理を行うためには, 以下の時間補正を行う必要がある。

$$T_{cor} = DP/V$$

ここで, DP はスイベル (パイロットセンサーの位置) からビットまでの距離, V は BHA (Bottom Hole Assembly) および掘管の P 波の伝播速度である。なお, ここでは BHA と掘管の速度が一定であると仮定している。このような時間補正が必要なため SWD データ処理においては掘管の速度 (V) の推定が重要な要素の 1 つとなる。Rector and Marion (1992), Haldorsen *et al.* (1995), 小澤・鶴 (1998), Poletto *et al.* (2001) などによって掘管の速度の推定方法が示されているが, いずれもパイロットセンサー信号の自己相関に現れる掘管中を往復して伝播する多重反射を利用している。多重反射を利用して掘管の速度を推定する場合, 掘削編成に関する情報も不可欠となる。掘管の速度は, 掘管の使用年数などにより異なることもあり, また掘管の速度の精度は T-D カーブ情報などに直接影響を与えるので, BHA を

含めた掘管の速度の推定は、SWD データ取得を行うごとに行い、正しい速度を用いて処理および解析を行う必要がある。

(2) T-D カーブの推定 (Time to Depth information)

時間補正後の SWD 記録に対して、VSP と同様の処理方法を適用することで地層の速度情報 (T-D カーブ) が得られる。Fig.5 は SWD による T-D カーブと SWD データを取得した坑井を用いたニアオフセット VSP による T-D カーブを比較した結果である。SWD による T-D 情報の間隔は、SWD データ取得深度間隔 (掘管一本 30 ft (9.14 m) ごとの場合が多い) に依存するため、VSP に比べるとその間隔は粗いが、ニアオフセット VSP と同等の正確さを持つ T-D 情報を SWD で抽出することが可能である。この T-D (時間-深度) 情報によって、地表地震探査断面上での正確なピットの位置が得られるので、掘削スケジュールなどの変更に反映することができる (例えば、Borland *et al.*, 1998, Murphy, 1995)。この情報は、坑井掘削現場においても重要な

で、現在では、SWD サービスを行うほとんどのコントラクターはオンサイトでほぼリアルタイムにこの情報を提供することが可能なシステムを備えている。

(3) SWD におけるデコンボリューションフィルター (VSP Deconvolution)

先に述べたように、地表受振器で取得した SWD デー

Fig. 5 Comparison of time to depth curve between SWD and VSP.

Fig. 6 Result of VSP deconvolution. Deconvolution operator to shape the auto-correlation of the pilot trace (a) to desired wavelet (b) were convolved to the input cross-correlated data (c). Correlation noise were eliminated by this process (d).

小澤・鶴(1998)による

Fig. 7 Comparison of VSP-CDP transforms of offset VSP with SWD.

タにはコンカル波および表面波等のノイズが含まれており、またパイロット信号にはさまざまな多重反射が含まれている。SWDでは地表受振器データとパイロット信号の相互相関が不可欠であるために、この相互相関によってSWD特有のノイズの多重反射（以後コリレーションノイズと呼ぶ）が生じてしまう。このようなコリレーションノイズは反射波と同等の見かけ速度（傾き）を持つ場合があるので、反射波の抽出のためのSWD処理においてはこのコリレーションノイズを除去することが重要となる。このため、パイロット信号の自己相関をパルスに戻すようにトレースごとに設計されたデコンボリューションオペレーターを相互相関後のデータにコンボリューションすることによってコリレーションノイズを除去する方法が有効である。この方法はRector and Marion (1991)によって示された。

Fig. 6にデコンボリューションの結果を示す。Fig. 6(a)はパイロット信号の自己相関である。プライマリーに対し、上下対称な傾きを持つコリレーションノイズを除去するために、これをスパイク (Fig. 6(b))に戻すデコンボリューションオペレーターを各トレースごとに設計し、相互相関後のデータ (Fig. 6(c))にコンボリューションした。Fig. 6(d)にその結果を示した。コリレーションノイズの大部分はこの方法で除去されている。

(4) 反射波マッピング (VSP-CDP transform)

掘削中にビット深度以深の地下情報を得ることは、掘削スケジュールの変更や異常高圧層の検知など安全上重要である。SWDによって得られる最も有益なビット深度以深の情報はビット以深からの反射波、すなわち地下構造イメージである。Fig. 4に示したデータ処理フローチャートにしたがって、反射波の抽出およびマッピング (VSP-CDP変換)を行った結果がFig. 7(b)である。比較のために、Fig. 7(a)には同じ坑井を用いたファーオフセットVSPによるVSP-CDP変換のマッピング結果を示した。深度2,590.8mのTarget 1および3,200.4mのTarget 2からの反射波列は両者でよく一致している。このように、SWDによってビット以深の地下構造を反映した反射波が得られる場合もあるが、現在でも、ビット以深の反射波の抽出などの処理には時間を要するため、オンサイトでリアルタイムに地下構造のイメージング結果を提供することは困難である。

4. おわりに

本稿では、パイロットセンサーを用いたSWD技術のデータ取得方法および処理方法について述べた。本稿では触れていないが、この震源技術は坑内発振—坑内受振での応用も可能である（例えば、小澤・鶴, 1998, 溝畑・横田, 1999など）。今後はその方面での技術開発にも注目する必要がある。

参 考 文 献

- 芦田 譲 (1997) : 用語解説「SWD」, 物理探査, **50** (3), 252-256.
- 浅沼 宏, 吉田 剛, 新妻弘明, 鶴 哲郎, 石井義朗 (1996) : 坑井掘削にともなう弾性波の坑井内3軸遠隔計測と3軸VSP法による地下構造の推定—石油公団柏崎テストフィールドでのケーススタディー, 物理探査, **49** (2), 147-157.
- Bernasconi, G., Vassallo, M. (2001) : Compression of downhole data for SWD application, *71st Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicist, Expanded Abstracts*, 2001-2004, 27-44.
- Borland, W. H., Hayashida, N., Kusaka, H., Leaney, W. S. and Nakanishi, S. (1998) : Drill bit seismic, vertical seismic profiling, and seismic depth imaging to aid Drilling decisions in the tho tinh structure Nam Con Son Basin-Vietnam, 物理探査, **51** (1), 27-44.
- Haldorsen, J. B. U., Miller, D. E. and Walsh, J. J. (1995) : Walk-away VSP using drill noise as a source, *Geophysics*, **60** (4), 978-997.
- 小澤岳史, 鶴 哲郎 (1998) : 南西アンドリュース油田におけるSWD実験, 物理探査, **51** (2), 127-140.
- Miranda, F., aleotti, L., Abramo, F., Poletto, F., Craglietto, A., Persoglia, S. and Rocca, F. (1996) : Impact of the seismic "while drilling" technique on exploration wells, *First Break*, **14** (2), 55-68.
- Murphy, D. Peter (1995) : Enhanced drilling and safety through the use of real time geophysical information, *Proceedings of The First Annual Well Logging Symposium of Japan*, V.
- Naville, C., Layotte, P. C., Pignard, G. and Gueson, J. (1994) : Well seismic : application of the trafor MWD system to drill bit seismic profiling, *EAEG expanded abstract*, G54.
- Poletto, F., Malusa, M. and Miranda, F. (2001) : Numerical modeling and interpretaion of drill string waves, *Geophysics*, **66** (5), 1569-1581.
- Rector, J. W. (1992) : Noise characterization and attenuation in drill bit recording, *Journal of Seismic Exploration*, **1**, 379-393.
- Rector, J. W. and Marion, B. P. (1991) : The use of drill-bit energy as a downhole seismic source, *Geophysics*, **56** (5), 628-634.
- Rector, J. W. and Hardage, B. A. (1992) : Radiation pattern and seismic waves generated by a working roller-cone drill bit, *Geophysics*, **57** (10), p. 1319-1333.
- 鶴 哲郎, 小澤岳史 (1998) : SWDにおけるノイズに関する検討, 物理探査, **51** (1), 45-54.
- 鶴 哲郎, 太田賢治, 小澤岳史 (1998a) : 掘進中のビット振動を利用する地震探査法, 石技誌, **62** (2), 145-157.
- 鶴 哲郎, 小澤岳史, 谷口良輔, 松橋貫次, 西川宣孝 (1998b) : 人工震源を用いたSWDへ試み, 物理探査, **51** (2), 117-126.
- 溝畑茂治, 横田俊之, 島田伸介, 谷口良輔, 坂本隆博 (1998) : SWD用坑底震源の開発, 物理探査学会第98回学術講演会講演論文集, 69-70.
- 溝畑茂治, 横田俊之 (1999) : 人工震源を利用したSWDシステムの開発, 石油開発技術センター年報, 平成10年度, 213-216.