講 演
 Lecture

マレーシア・サバ沖におけるブロードバンド およびマルチアジマス 3D 地震探査*

義山 智之**・リー チー クン**

(Received September 5, 2013 ; accepted November 6, 2013)

Combination of broadband and multi-azimuth 3D seismic data acquisition in deep water Sabah, Malaysia

Tomoyuki Yoshiyama and Lee Chee Khoon

Abstract : Broadband acquisition and multi azimuth acquisition techniques in marine seismic survey are currently drawing considerable attention to improve the imaging for complex geology such as sub-basalt and sub-salt imaging.

In the Block DWR, offshore Sabah, Malaysia, complex toe-thrust structures are existing and conventional legacy seismic data over these structures is suffering the deterioration of imaging due to complexity of geology and existence of shallow amplitude anomalies.

JX Nippon Oil & Gas Exploration (Deepwater Sabah) conducted 3D seismic survey with combination of broadband acquisition technique using slant streamer and multi-azimuth (two azimuth) acquisition technique over the Block DWR.

Broadband acquisition technique enhanced low frequency components in the seismic data and provided with improved imaging in toe-thrust structures and deeper seismic events. Processing for merged multi-azimuth seismic data is in progress, however, the seismic stack of each azimuth show better illumination than the other in different places. This fact indicates that merged azimuth seismic data can show better imaging and better seismic event continuities.

Keywords : broadband, multi-azimuth, low frequency, illumination

1. はじめに

近年の海洋地震探査において、上位の弾性波減衰層の影響によるイメージング品質劣化の改善や地下深部のイメージング向上の手法としてブロードバンド収録が、単一方向(ナローアジマス)の収録ではイメージングが困難な複雑な地質構造に対するイルミネーション向上手法として、マルチアジマス、ワイドアジマス、リッチアジマス、コイルシューティングなどの手法が注目を集めており、それぞれサブバスルトやサブソルトなどのイメージングに適用されている。

JX 日鉱石サバ深海石油開発(株) (以下、JX 開発) がオペレーターとして探鉱活動を行っているマレーシア・サバ沖深海 DWR 鉱区 (図 1) およびその周辺地域では、中新世における圧縮応力場および重力性すべりによって形成され

たトウスラスト構造が卓越し、北東-南西方向の衝上断層帯を形成している。

DWR 鉱区における 2001 年収録の既存 3D 地震探鉱記録では、浅部ガスによるものと考えられる振幅異常域の下部におけるイメージング品質劣化、深部構造のイメージング品質不良、また複雑なトウスラスト構造内部のイメージング品質不良が問題となっていた (図 2)。そこで、JX 開発は本鉱区においてブロードバンド収録技術とマルチアジマ

図 1 DWR 鉱区位置図

* 平成 25 年 6 月 27 日平成 25 年度年春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「課題は果たされたのか?—物理探査技術の現況と将来—」にて講演
 This paper was presented at the 2013 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Geophysical Exploration Technology, Present Status and Next Generation" held in Tokyo, Japan, on June 27, 2013.

** JX 日鉱石サバ深海石油開発(株) JX Nippon Oil & Gas Exploration (Deepwater Sabah) Limited

図2 既存3D地震探鉱記録断面例(2001年収録PSTM)

図3 ストリーマー深度の違いによるゴーストレスポンス(5mおよび15m)

図4 スラントストリーマーのゴーストレスポンス

図5 アジマス1および2におけるヒットマップヒットマップにおいて構造部における効果的なイルミネーションが期待できる。

ス収録技術を組み合わせた3D地震探査を実施した。ブロードバンド収録による弾性波エネルギーの深部への透過性の向上、マルチアジマス収録による複雑構造のイルミネーションの向上によって、前述の既存3D地震探査記録の問題の改善が期待できる。

なお、本地震探査記録の処理作業は本稿執筆時点で継続中であり、後半に示す各アジマスの地震探査記録断面は重合前時間マイグレーション（以下、PSTM）のファストトラック、およびアジマス統合処理前のものである。

2. ブロードバンド収録技術

海洋における地震探査において、収録データの周波数帯域が制限される大きな要因の1つとしてゴーストの存在が挙げられる。ゴーストには、弾性波が海水面で反射した下向波が受振器で収録される受振器側ゴーストと、震源から発生させた弾性波が直接海水面で反射した後にある波線経路を経て受振器で収録される震源側ゴーストがあり、一次反射波と重なって収録データの振幅スペクトルにノッチを発生させる。通常の一定深度でのストリーマー曳航および単一深度の震源での収録では、ストリーマー深度または震源深度に依存した周波数域にノッチが発生し、このノッチ周波数において収録データのスペクトル強度が抑制される。図3にストリーマー深度が5 m および 15 m の場合の理想的なノイズを含まない受振器側ゴーストレスポンスを示す。ストリーマー深度を深くした場合、波浪ノイズなどの低周波ノイズはある程度回避できるが、振幅スペクトルにおける最初のノッチ周波数が低くなり高周波数成分が損なわれてしまう。反対に、ストリーマー深度を浅くした場合は最初のノッチ周波数が高くなり、高周波成分は確保できるものの、0 Hz におけるノッチの影響により低周波数成分が損なわれてしまう。また、浅い深度のストリーマーでは波浪ノイズなどの低周波ノイズの影響を強く受けてしまう。このように、一定深度のストリーマー曳航による収録では、曳航深度によって収録周波数帯域は制限を受け、高周波数成分と低周波数成分の確保は互いにトレードオフの関係となる。この関係は、震源側についても同様である。ここで取り上げるブロードバンド収録技術は、収録ジオメトリの工夫やマルチセンサーの使用などによってゴーストを抑制し、収録データの広帯域化を図るものであり、手法は異なるものの、WesternGeco 社、CGGVeritas 社、PGS 社などの物理探査会社によって実用化されている。収録データの広帯域化によって、基本波形のサイドローブが抑制され、地震探査記録の高分解能化ができる。また、特に低周波数帯域の拡張によって弾性波エネルギーの深部への透過性が高まり、深部のイメージングの向上が期待できる。

本鉱区におけるブロードバンド収録技術としては、WesternGeco 社のスラントストリーマーを利用した ObliQ および 2 つの異なる深度で発震する震源システムを採用した。

ObliQ ではストリーマーを線形に傾斜させて曳航（スラントストリーマー）することで、ノッチ周波数をオフセッ

トごとにスライディングさせ（図4）、受振器側ゴーストによるノッチの影響を分散させる。これにより、収録されるデータの低周波数帯域および高周波数帯域が拡張され、通常の収録と比較して広周波数帯域の収録が可能となる。今回の地震探査においてはニアオフセットからファーオフセットにかけて 6 m から 40 m にストリーマーを傾斜させて収録を行った。ストリーマー後部では、テイルブイとの接続ため V 字型の形態にしている。

スラントストリーマーでの収録に加え、異なる 2 つの水深で発震を行うことで、震源側ゴーストによるノッチ周波数の影響の軽減も図った。3 列のサブアレイから成る震源において外側の 2 列のサブアレイの震源を 6 m、中央のサブアレイの震源 12 m の深度に配置した V 字型の震源配置を採用した。12 m の震源においては約 4 ミリ秒の遅延発震をすることによって、6 m および 12 m の震源からの下向波のエネルギーは増幅されるに対し、ゴーストのエネルギーは分散される。この 2 つ深度での発震による震源波形の振幅スペクトルにおいては、通常の単一深度の震源と比較して周波数帯域が拡張されるが、今回の場合 12 m の震源深度に対応したノッチ周波数におけるスペクトル強度が通常の単一深度の震源のときよりも小さくなるという特徴がある（Cambois *et al.*, 2009）。

3. マルチアジマス収録技術

構造系列の走向方向にて発震・収録された 3D 地震探査記録におけるトウスラスト構造の内部のイメージング品質不良は、浅部に見られる振幅異常域の影響だけでなく、構造自体の複雑さやクロスライン方向のサンプリング不足に起因したイルミネーション不良が原因の 1 つと考えられた。海洋 3D 地震探査における通常の単一方向での収録では、波線経路の方位およびオフセットが一定方向に限定されてしまう。対象層やその上位層の構造形態が複雑な場合、この一定方向に限定された波線経路だけでは、十分なイルミネーションが得られず適切なイメージングができないことがある。このような複雑構造に対するイメージング手法として、多様な波線経路を確保したマルチアジマス、ワイドアジマス、リッチアジマス、コイルシューティングなどが用いられる。

今回の地震探査では南北方向（構造系列の傾斜方向と走向方向の中間）をアジマス 1、構造の傾斜方向をアジマス 2 として計 2 方向でのマルチアジマス収録を実施した（図1）。収録方向に関しては、シミュレーションにおいてトウスラスト構造が効果的にイルミネーションできることを確認し、アジマス 1 には最も効果的に収録が可能な南北方向を選択した。図5にアジマス 1 およびアジマス 2 におけるヒットマップを示す。ヒットマップはターゲット層のあるビンにおける弾性波の反射回数を示しており、反射回数が少ない部分は S/N 比が低いことが予想できる。今回のアジマス 1 およびアジマス 2 による収録では、構造部において効果的なイルミネーションが得られることが期待できた。当初、アジマス 1 およびアジマス 2 に加え、走向方向

表 1 収録パラメーター

Content	Specification
Streamer	
Number of streamers	8
Streamer length	7,200 m
Streamer depth	Slanted from 6 (Near) to 40 (Far) m
Streamer separation	100 m
Nearest offset	140 m
Receiver	
Receiver interval	6.25 m
Recording length	8,192 ms (sampling rate : 2 ms)
Source	
Number of sources	2
	a source consists of 3 sub-array
Source depth	6, 12 m
Source separation	50 m
Source volume (cu.in)	5,085 cu.in (Sub-array : 1695cu. in)
Shot point interval	flip-flop 25 m

図 6 実際のショットギャザーのニアオフセットとファアオフセットの振幅スペクトル

図 7 実際の悪天候時のショットギャザー

のアジマス 3 の収録も実施する予定であったが、収録期間の制約のためにアジマス 3 の収録は見送られた。後述するが、当初予定のアジマス 3 の代替として既存 3D 地震探鉱記録の再処理結果をアジマス 3 として統合することを計画し（本稿執筆時点で処理未完了）、処理テストのために既存 3D 地震探鉱記録の収録方向と同方向の 2D ラインをテストラインとして数本収録することとした。

4. 収録

2012 年 7 月から 9 月にかけて、WesternGeco 社の地震探査船 Western Sprit によってアジマス 1 およびアジマス 2 の合計約 1,150 Full-fold km² のブロードバンドおよびマルチアジマス複合 3D 地震探査を実施した。収録パラメーターを表 1 に示す。収録パラメーターは事前に実施したイルミネーションスタディによって決定した。既存 3D 地震探鉱記録解釈に基づき地下構造および浅部ガスゾーンを 3D モデル化し、シミュレーションによって各種パラメーターが収録周波数帯域や解像度に与える影響、および前述のマルチアジマス収録における各アジマスのイルミネーション（ターゲット層のヒットマップや振幅値シミュレーション）に与える差異を比較検討した。収録作業においては、ストリーマーを水中で傾け保持する技術や、水深の異なる 2 つの震源の発震タイミングの管理などブロードバンド収録特有の高度な技術が用いられた。また、収録システムとして WesternGeco 社の Q-marine システムを採用した。Q-marine システムは主に、ストリーマーにおける 3.125 m 間隔のポイント受振器システム、ストリーマーに取り付けられた上下方向および水平方向に操縦可能なフィンによるストリーマー操縦システム、高密度の音響測位ネットワークによるストリーマー位置管理システム、発震ごとの震源波形の推定システムなどから構成され、収録作業の効率化、地震探鉱記録の品質向上および広帯域化に寄与している（大澤ほか、2006）。図 6 に実際のショットギャザーにおけるニアオフセットとファアオフセットの振幅スペクトルの比較を示す。図中では、ストリーマー深度の深いファアオフセット側では低周波数成分が卓越していることが分かる。ストリーマー深度の浅いニアオフセット側では、高周波数成分が卓越しているが、実際には高周波の多重反射波ノイズ等の影響を受けており、単純な比較には注意が必要である。図 7 に悪天候時のショットギャザーを示す。ストリーマー深度の深いファアオフセットにおいてはニアオフセットで確認できる悪天候による波浪ノイズの影響を受けずに収録されている。

5. 処理結果

5.1 ブロードバンド

WesternGeco 社の処理プロセスにおいて ObliQ によって収録されたデータは Single Streamer De-ghosting（以下、SSD）と呼ばれる処理によって、プリスタックの段階で受振器側ゴーストを分離・除去し、理想的な広帯域の地震探鉱記録を得る。SSD について開示されている情報は少な

図 8 地震探鉱記録断面の比較

上段：既存 3D 地震探鉱記録オリジナル処理，中段：ブロードバンド 3D 地震探鉱記録・アジマス 1，下段：既存 3D 地震探鉱記録再処理（SSD）

図9 バンドパスフィルターパネル

左側：既存 3D 地震探鉱記録再処理（SSD），右側：ブロードバンド 3D 地震探鉱記録・アジマス 1（振幅は標準化）

いが、Spectral reconstruction の一種として紹介され（Moldoveanu *et al.*, 2012），未知パラメーターとなるゴーストが除去されたデータ（上向波）のスペクトルをインバージョン問題として解くとしている。SSD はブロードバンド収録でない通常の地震探鉱記録に対しても適用可能であり，既存 3D 地震探鉱記録の再処理として，SSD を含み今回のブロードバンド 3D 地震探鉱記録と同等の処理を実施した。

図 8 に今回のブロードバンド 3D 地震探鉱記録（アジマス 1，PSTM・ファストトラック），既存 3D 地震探鉱記録オリジナル処理および既存 3D 地震探鉱記録再処理（ファストトラック）断面の比較を示す。ブロードバンド収録による地震探鉱記録断面は，他の 2 つの断面と比較して，トウラスト構造内部，深部構造，断層面のイメージングなどイベントの連続性・イメージング品質が改善していることがわかる（図 8 中，矢印で示される部分）。既存 3D 地震探鉱記録の収録・処理パラメーターは，ブロードバンド

収録・処理以外のパラメーターも今回の地震探査とは異なるため，単純には比較できないものの，ブロードバンド収録・処理による低周波数帯域の拡張，弾性波エネルギーの透過性の向上がこれらの記録品質改善に寄与しているものと考えられる。SSD を実施した既存 3D 地震探鉱記録の再処理断面においても，深部イメージング品質やイベントの連続性に改善が見られる。

図 9 に今回のブロードバンド 3D 地震探鉱記録断面と既存 3D 地震探鉱記録再処理断面のバンドパスフィルターパネルを示す。2-4Hz および 4-8Hz のバンドパスフィルターパネルにおいて，特に 4 秒以深でのブロードバンド 3D 地震探鉱記録の方に，強いシグナルのエネルギーが確認できる。今回の結果では，地震探鉱記録の低周波数帯域の拡張にはブロードバンド処理（SSD）だけでなく，ブロードバンド収録が不可欠であったことが分かる。一方で，64-128 Hz のバンドパスフィルターパネルにおいては，特

図 10 アジマス 1 およびアジマス 2 地震探査記録断面の比較

左側: アジマス 1, 右側: アジマス 2

に浅部で既存 3D 地震探査記録の方が、エネルギーが大きいことが確認できる。考察には最終処理結果を待たなくてはならないが、スラントストリーマーによる収録では高周波数成分がニアオフセットでしか収録されないために全体として高周波数のスペクトル強度が落ちること、既存 3D 地震探査記録では除去しきれていない高周波のノイズが残っていることなどが可能性として考えられる。

5.2 マルチアジマス

アジマス 1 とアジマス 2 は、セクタースタックとして別々に処理された後にアジマス統合スタック処理がなされる(ただし、マイグレーション処理においては共通の速度データが用いられる)。このアジマス統合スタック処理は Optimum Weighted Stack (以下、OWS) と呼ばれる。OWS において、アジマス 1 とアジマス 2 は単純に加算・平均化されるのではなく、各アジマスにて空間・時間方向の震探イベントの連続性またはイルミネーションの良好な部分がよ

り反映されるよう重み付けが計算され、この重み付けに基づいてアジマス統合スタックが作成される (Cooke *et al.*, 2011)。

本稿執筆時点では OWS の処理は未完了であるが、アジマス 1 およびアジマス 2 のそれぞれの処理結果の比較から OWS の効果がある程度予測できると考えられる。図 10 にアジマス 1 およびアジマス 2、それぞれ同位置での地震探査記録断面の比較を示す。図 10 ではアジマス 1 およびアジマス 2 それぞれにおいて他方よりも震探イベントの連続性の良好な部分が確認できる(図 10 中、矢印で示される部分)。また、震探イベントの連続性が良好な部分では振幅が大きくなると仮定し、あるホライズン(ホライズン A) の上位および下位に 20 ミリ秒のウィンドウを設定してアジマス 1 およびアジマス 2 の地震探査記録に対して RMS 振幅を計算した。図 11 に前述のアジマス 1 の RMS 振幅とアジマス 2 の RMS 振幅の差をとったものを示して

図 11 アジマス 1 およびアジマス 2 における RMS 振幅値 (ホライズン A ± 20 ms) の差

図 12 地震探鉱記録断面（ブロードバンド）における震探イベントのプルダウン（Time sag）

左側：構造頂部に見られるプルダウンの例 1，
右側：構造頂部に見られるプルダウンの例 2

いる。高い値を示している部分はアジマス 1 とアジマス 2 の RMS 振幅の差が大きい部分であり、震探イベントの連続性やイルミネーションに優劣の差がある部分と捉えることができる。これらの部分において OWS における重み付けの効果が発揮され、多くの部分で OWS 後の震探イベントの連続性およびイルミネーションの改善がなされると考えられる。

6. まとめと今後の展望

ブロードバンド収録および処理によって、特に低周波数成分の拡張、弾性波エネルギーの透過性の向上がなされ、トウストラスト構造内部および深部のイメージング品質を改善することができた。この品質改善は地震探鉱記録のより正確な解釈の助けとなるだけでなく、低周波数帯域の拡張によって、インバージョン処理における低周波数モデル構築の際の利点にもなる。また、マルチアジマス収録の各アジマスにおいて、他方のアジマスと比較して良好なイベント連続性を持つ部分が確認できた。今後の処理において、各アジマスの震探イベント連続性の良好な部分が反映された効果的なアジマス統合スタックが得られると期待できる。

一方で、ブロードバンド収録において浅部ガスなどによる振幅異常域下位の弾性波の透過性は向上したと考えられるものの、アジマス 1 およびアジマス 2 とともに浅部ガスと考えられる振幅異常域下位の震探イベントのプルダウンが残った（図 10 および 12 において点線で囲まれた部

分）。このような震探イベントのプルダウンの補正として、Anisotropic 重合前深度マイグレーション処理を予定しており、震探イベントのプルダウンによって歪められた構造のより正確なイメージングが期待できる。振幅異常域下位の震探イベントのプルダウンへの対応として、同様の処理が DWR 鉱区近傍の Kikeh 油田にて適用され、その成果が報告されている（Khan *et al.*, 2005）。

また、今回のマルチアジマス収録では構造系列の傾斜方向と走向方向の中間にあたるアジマス 1 と構造系列の傾斜方向のアジマス 2 のみが収録され、当初計画された走向方向のアジマス 3 の収録はできなかった。そこで、構造系列の走向方向に収録された既存 3D 地震探鉱記録をアジマス 3 としてアジマス統合スタックに組み込むことを計画しており、アジマス 1 からアジマス 3 の各アジマスに対して前述の Anisotropic 重合前深度マイグレーション処理適用後、OWS 処理が実施される。ブロードバンド収録がされておらず、またアジマス 1 とアジマス 2 とは振幅スペクトルが異なるアジマス 3 をどのように適切に処理、統合していくかが今後の課題となる。

謝 辞

資料の公表を許可していただいたペトロナス、国際石油開発帝石㈱、JX 日鉱日石開発㈱に深謝いたします。

引 用 文 献

- Cambois, G., Long, A., Parkes, G., Lundsten, T., Mattsson, A. and Fromyr, E., 2009 : Multi - Level airgun array: A simple and effective way to enhance the low frequency content of marine seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009*, 152-156.
- Cooke, A., Moreira, L., Garrity, J., Luthy, S., Silva, P. and Hsaio, H., 2011 : High-resolution multiazimuth towed-streamer Seismic acquisition and processing – A case study from the Campos Basin offshore Brazil. *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Extended abstract.*
- Khan, O. and Klein-Helmkamp, U., 2005 : Deepwater imaging beneath gas anomalies – A case study. *67th EAGE Conference & Exhibition, Extended abstracts*, B029.
- Modoveanu, N., Seymour, N., Manen, D.J. and Caprioli, P., 2012 : Broadband seismic methods for towed-streamer acquisition. *74th EAGE Conference & Exhibition, Extended abstracts*, 2009.
- 大澤 理・アルディラロドルフォ, 2006 : Q マリーンの最新技術およびケーススタディー. 物理探査学会第 114 回学術講演会論文集, 53-56.