論 文
 Original Article

DAS-VSP による Time-lapse subsurface monitoring 技術開発* —大深度・高傾斜井を用いた Inside CT Walk-away DAS-VSP 実証試験—

小林 佑輝^{**,***,†}・成瀬 涼平^{***}・安達 啓太^{***}・森嶋 祐輔^{***}・谷 昌憲^{***}・薛 自求^{****}

(Received September 6, 2018 ; accepted November 6, 2018)

A field experiment of inside CT walk-away DAS-VSP at a deep and highly deviated well for time-lapse subsurface monitoring

Yuki Kobayashi, Ryohei Naruse, Keita Adachi, Yusuke Morishima, Masanori Tani and Ziqiu Xue

Abstract : In order to evaluate operational and geophysical feasibility of vertical seismic profile (VSP) survey using distributed acoustic sensing (DAS) for future time-lapse monitoring, we conducted a field experiment of VSP with DAS measurement (DAS-VSP) at onshore Japan. The main purposes of this field experiment are 1) to quantitatively evaluate data acquired in a deep and highly deviated well and with fiber optics deployed inside coiled tubing (CT-DAS-VSP), 2) to investigate the possibility of subsurface imaging by DAS-VSP, 3) to acquire DAS-VSP data under flowing condition for future evaluation of the possibility of subsurface monitoring during fluid injection. Among several methods to install fiber optic cables, Inside CT method was adopted that we deployed a coiled tubing in which a fiber optic cable had already been inserted. VSP shot gathers with more than 800 channels with 5 m spacing were acquired at 70 source locations as a 2D walk-away VSP survey. Although data quality was of our biggest challenge, it is confirmed that not only P-wave direct arrival, but also P-P reflections and P-S converted wave were recorded with acceptable signal to noise ratio even with poor coupling condition inevitable by the optical-fiber deploying method, and even under flowing condition. The effect of gauge length, which is one of key parameters for DAS measurement, on the quality of DAS-VSP shot gather were examined with the real data during post-field data optimization. It is realized that the important parameter must be determined carefully, and that, if possible, post-field optimization using raw optical backscatter information is recommended.

Keywords : DAS, VSP, Time-lapse monitoring, CCS

1. はじめに

石油・天然ガス開発事業や二酸化炭素地中貯留 (Carbon-dioxide Capture and Storage ; CCS) 事業では、油・ガスが適切に地下貯留層から回収されているか、あるいは、圧入した CO₂ の広がり計画どおり対象貯留層に限定されているかを監視し、操業を計画どおりに管理することが肝要

であり、坑井から離れた地下モニタリングには物理探査手法を用いたりリアルタイム、ないしは短い時間間隔での準リアルタイムモニタリングが有用である。物理探査モニタリングには、貯留層を広範囲にカバーできる三次元反射法地震探査 (3D 震探) を用いることが一般的であり、例えば、Chadwick *et al.* (2010) にあるように、繰り返し 3D 震探により地下物性値変化を空間的に解析できることが知られている。3D 震探に加え、vertical seismic profile (VSP) サーベイもまた、地下モニタリングに有用かつ 3D 震探と補完しあう手法と考えられている。地表よりもノイズの少ない観測坑内に受振器を設置するため、地震波の伝播距離が片道となり、より高周波数で高い signal to noise ratio (SNR) の記録が取得できるといった利点が挙げられ、頻繁な繰り返しモニタリングにも有効であると期待される (例えば、O'Brien *et al.*, 2004)。VSP サーベイには、これまで、3 成分坑内ジオフォンが用いられてきたが、近年の技術進歩により、ジオフォンに代わり、坑内に展開した光ファ

* 平成 30 年 6 月 13 日、平成 30 年度石油技術協会春季講演会 地質・探鉱部門シンポジウム「効率化と技術の進展が石油・天然ガス探鉱にもたらす影響」で講演 This paper was presented at the 2018 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Impacts of Efficiency and Technology Development on Oil and Gas Exploration" held in Niigata, Japan, June 13, 2018

** 二酸化炭素地中貯留技術研究組合 Geological Carbon Dioxide Storage Technology Research Association

*** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX CORPORATION

**** 公益財団法人地球環境産業技術研究機構 Research Institute of Innovative Technology for the Earth

† Corresponding author : E-Mail : yuki.kobayashi@inpe.co.jp

図1 既存 DAS-VSP 実証試験での光ファイバー設置方式

ファイバーを受振器として使用する distributed acoustic sensing (DAS) 計測を用いた VSP サーベイ (DAS-VSP) が注目されており、石油・天然ガス開発業界および CCS 実証試験事業での現場実証試験事例が報告されはじめている (Daley *et al.*, 2014; Daley *et al.*, 2016; Mateeva *et al.*, 2013; Mateeva *et al.*, 2014; Humphries *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2015; Zhan *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2016)。

DAS-VSP を実施するにあたり観測坑内に光ファイバーを設置する必要がある。その設置方法として、1) 外側にファイバーケーブルをクランプしたケーシング (CSG) を降管し、そのままセメンティングを行い固定する方法 (Behind CSG)、2) 外側にファイバーケーブルをクランプしたチュービング (TBG) を降管し設置する方法 (Along TBG)、3) チューピングあるいはケーシングの内側に、芯に光ファイバーを備えたワイヤーラインを降下し設置する方法 (Wireline)、および、4) ファイバーケーブルを既挿入済みのコイルドチューピング (CT) をチューピング内に降管し設置する方法 (Inside CT) の 4 種類が提案されている。これまでの実証試験の結果 (図1) から、地層とのカップリングの観点、および、地層と光ファイバー間の鋼管の枚数から、取得データの品質は一般的に、Behind CSG > Along TBG > Wireline の順に低下するとされる。一方、実際に DAS 計測を用いたモニタリングを計画する際に取得データの品質以外に考慮すべき点として、ファイバーケーブルを観測対象層まで確実に展開すること、VSP 以外のモニタリング項目も加味した作業計画を立てることが挙げられる。前者に関しては、ファイバーケーブルを坑内に展開する際の破断が大きナリリスクとなる。展開時のファイバー破断リスクは、Behind CSG > Along TBG >> Wireline, Inside CT の順で減少すると考えられ、事実、Behind CSG や Along TBG 方式での展開の際、ケーシングあるいはチューピング外側に設置したファイバーケーブルが、地層あるいは既展開のケーシングとの摩擦により破断した事例が報告されている (例えば、Daley *et al.*, 2014)。後者に関し、貯留層モニタリングでは、DAS-VSP サーベ

イのみではなく、坑底での温度、圧力情報が貯留層管理に極めて有益である。そのため、観測井に温度計、圧力計を設置することも考えられるが、Inside CT 方式、あるいは Wireline 方式の場合、それらセンサーをデータ転送に用いるマルチモードファイバーとともに展開でき、また、センサーの回収も可能である。加えて、Inside CT 方式であれば、水平井先端までそれらセンサーを展開できる利点がある。

図1に、2016 年末時点で既公表の DAS-VSP 実証試験の 8 例について、特に光ファイバーの設置方式に注目して、そのサーベイ仕様をまとめる。既存事例のほぼすべてで、Behind CSG ないしは Along TBG 方式にて光ファイバーを設置していることが分かる。また、著者の知る限り、Inside CT 方式での取得事例はまだ公表されていない。DAS-VSP のテスト初期では、良質な DAS-VSP 記録の取得には Behind CSG 方式でのファイバー展開が不可欠で、Along TBG や Wireline 方式では P 波直達波の初動到達時刻を読むためには十分な質を有するが、地下イメージングなどの波形情報を用いた処理は困難という結果であった。しかし、最近の DAS 光学処理精度の向上と、大エネルギー震源による 1 発震の SNR の向上とともに、発震回数の増加により重合数を上げ、さらにマルチチャンネル処理によるノイズ除去を適用するなどの工夫により、Wireline 方式での DAS-VSP サーベイで良好な地下イメージング結果が得られている事例もある (Yu *et al.*, 2016)。十分な発震エネルギー確保と適切なデータ処理次第で、カップリングに懸念のある Inside CT や Wireline 方式でも地下イメージングに供する質のデータを取得できる可能性は大いに残されていると言える。

図1に示したように、2012 年以降、世界各地で DAS-VSP 実証試験が進められてきており、その有効性について報告がまとまりつつある。しかし、上で述べるように、複数ある光ファイバー設置方式のうち、チューピングの内側に設置する方式に関しては、Wireline 方式の報告があるのみで、Inside CT 方式についての実証試験結果についてはまだ報告がない。Inside CT 方式では複数枚のケーシング

やチューピングといった鋼管の内側に光ファイバーを展開するため、取得される記録の質が不安視されるが、一方で、他モニタリング用センサーの同時設置や展開時の光ファイバー破断リスクが低いというメリットがある。また、CTを長期間坑内に降下し、設置する手法も確立されていることから、同方式による DAS-VSP 記録の品質次第では、長期モニタリングを目的とした光ファイバー設置手段の有効な手法となりえる。

そこで、二酸化炭素地中貯留技術研究組合は、大深度および傾斜井での DAS-VSP 記録の評価、CT 内にファイバーを設置した際の記録の評価、流体流動中の記録の評価を目的に、2017 年 8 月に、Inside CT 方式での DAS-VSP (CT-DAS-VSP) 実証試験を実施した。CT-DAS-VSP の大規模実証試験は本邦初の試みで世界的にも報告例がなく、既存事例とその光ファイバー設置方式や展開深度、対象とする調査井の傾斜角などの点で大きく異なる。本試験結果とそれら既存事例の結果とを併せることで、将来のモニタリング計画の検討材料となることが期待される。

本稿では、この実証試験結果の報告を主とし、第 2 章で本実証試験の仕様について、第 3 章では取得されたデータ例とその特徴について述べる。DAS 計測では、従来のジオフォンサーベイとは異なる受振側パラメータ設定が必要であり、その設定でデータ品質が大きく変わる。重要なパラメータの 1 つであるゲージ長設定の影響 (Dean *et al.*, 2016) について、実データの最適化作業結果とともに第 4 章にて議論する。

2. 現場実証試験作業概要

2.1 データ取得作業目的

本実証試験の仕様を策定するにあたり、1) 大深度・高傾斜井での walk-away DAS-VSP サーベイのモニタリング技術としての有効性評価に資するデータとすること、および、2) 流体流動中と密閉時の VSP 記録を比較し、例えば、CO₂ 圧入井を用いた圧入中モニタリングの可能性についての検討に資するデータとすることを考慮した。ここで、walk-away VSP とは、坑口近傍で発震作業を行うゼロオフセット VSP、ある程度の坑口ー発震点間オフセットをもつオフセット VSP に対し、複数の発震点を坑口から遠ざかるように、直線状に配置した VSP サーベイのことを指し、ゼロオフセット VSP やオフセット VSP に比べ、地下イメージング範囲が広がることが特徴である。将来の DAS-VSP でのモニタリングを鑑みるに、坑井周辺の物性値変化の空間的分布を解析することが目的の 1 つとして考えられ、3D VSP が有力な候補となる。3D VSP は walk-away VSP の発震点分布を面的に拡張したものであり、データ取得および処理方法に本質的な違いはない。そこで、本実証試験では walk-away VSP を採用し、また、walk-away VSP のためのオフセット発震を利用し、取得された DAS-VSP データとの比較のため、二次元反射法地震探査 (2D 震探) も同時に取得した。

表 1 DAS-VSP 収録仕様

パラメータ	値
収録時間サンプリング間隔	1 msec
収録空間サンプリング間隔	5.1 m
ゲージ長	20.41 m
記録長	6 秒 (相互相関後。Pre-trigger time の 1 秒を含む。)
収録フォーマット	SEG-Y

2.2 調査体制

本データ取得作業では、walk-away DAS-VSP サーベイおよび 2D 震探のための発震作業、2D 震探のための地上受振器展開作業とデータ収録作業、測量作業を株式会社地球科学総合研究所 (以下、JGI 社) に、DAS-VSP サーベイのための CT オペレーションと DAS データ収録をシュルンベルジェ株式会社 (以下、SLB 社) に委託した。

2.3 調査仕様

本実証試験での DAS 計測仕様を表 1 に示す。なお、表 1 にまとめる仕様はデータ収録現場での QC 用仕様である。SLB 社の DAS 計測システムである heterodyne Distributed Vibration Sensing (hDVS, Hartog *et al.*, 2016) では、DAS 計測の生データとなる光ファイバー内の散乱光情報をすべて記録し保管できる。そのため、ゲージ長や空間サンプリング長などのパラメータは現場収録作業後に再設定しフィールドデータの最終成果物を作成することが可能である。このデータ収録後の最適化作業については第 4 章にまとめる。

2.4 発震作業概要

発震作業は、新潟県新潟市秋葉区および五泉市にかけて、直線距離でおよそ 6.5 km を対象として実施した。本調査では、CT-DAS-VSP 計測の SNR の程度が不明であるため、1 発震点あたりのスイープ回数を 13 回とする標準発震作業に加え、今後の検討に耐え得る VSP データを確実に取得するため、標準よりも多くのスイープを実施する集中発震を計 3 点で実施した。表 2 に発震仕様をまとめる。

図 2 および図 3 は調査作業風景である。図 2 は調査井坑口付近での発震作業風景である。本実証試験では計 4 台の大型パイプレーターを動員し、標準発震作業では、作業

表 2 発震仕様

パラメータ	値
パイプレーター台数	2 台 (標準発震) / 4 台 (集中発震)
スイープタイプ	Maximum displacement sweep
スイープ長	36 秒
スイープ周波数帯	4 – 80 Hz
スイープ数	13 (標準発震) / 最大 379 (集中発震)

図2 調査井坑口付近での標準発震作業風景

図3 集中発震作業風景

の効率化のため、2台1編成の計2編成による Flip-Flop 発震方式を採用した。図2はこの標準発震作業風景であり、JGI 社の大型パイプレーター2台が発震を行っている。同図中央付近に CT の揚降管のためのインジェクターヘッドがクレーンによって吊り下げられている。CTは同図右方

に位置するドラム部からこのインジェクターヘッドを通過し、調査井坑口に挿入されている。図3は集中発震作業風景である。集中発震作業は4台のパイプレーターでの発震とした。

2.5 DAS-VSP 収録作業概要

調査井坑内図および坑跡を図4に示す。本井では最終 CSG として 7"-5-1/2" ライナーが設置され、その内側に 3-1/2" TBG が設置されている。本試験ではさらに、内部にファイバーケーブルを導通させた 1-1/2" CT を TBG 内に展開し調査を行った。したがって、CT と坑壁のカップリングが相対的に良好となり、また、DAS 計測の感度角度依存性 (Wu *et al.*, 2018) を考慮しても直達 P 波への感度が維持できることが期待される傾斜区間 (45° 区間, 図4) においても、光ファイバーと地層の間に CT, TBG および CSG (およびライナー) の鋼管類が最大4枚設置されていることになる。TBG 先端以深の 5-1/2" ライナー区間に本井での最大傾斜角 (81°) となる区間が存在する。

DAS-VSP データは、8月23日および24日の計21時間で深度約3,600 mMD まで、および、8月27日の計12時間で深度約4,400 mMD まで収録した。8月27日には、密閉状態と、CT アニュラス (CT と TBG の間) 部を流体が流動している状態の2条件での収録を行った。

CT-DAS を坑内に展開し、DAS 計測のための地上ユニットを光ファイバーに接続した後は、DAS-VSP であっても従来の VSP サーベイと同様の手順により作業を進めることになる。本実証試験の場合、JGI 社所有のパイプレーターコントローラーを SLB 社 hDVS システムに接続し、JGI 社観測車からの発震トリガー信号を受信し DAS データの収録を開始するシステムにした。収録データにはリアルタイムで基準スイープ波形との相互相関処理が施され、各スイープおよび収録開始からの全スイープデータの重合結果にて現場 QC を実施した。

現場収録作業において DAS-VSP がジオフォンによる

図4 (a) 調査井坑内現況および (b) 坑跡図

(a)

(b)

Tap/Freezing test 作業風景

(c)

Time

図5 Tap test 実施風景

(a) Tap/Freezing test 実施点, (b) 作業風景, (c) テスト時の DAS 記録

VSP と異なる点の1つとして、後の深度補正のための追加作業が必要であるということが挙げられる。坑井に展開する光ファイバーは、破断リスクの低減のため、挿入するCT長よりも長いファイバーを用いゆとりをもって展開され、多少たわんだ状態で坑壁に沿って設置されていると考えるのが妥当である。このため、DAS-VSPで重要な作業として深度補正のための補助データ取得があり、本実証試験では、坑内側の光ファイバー先端の深度と坑口側の深度既知点でのDASチャンネルの同定を行い、その間の各チャンネル深度を決定した。本試験ではInside CT方式を採用したため、CT先端にCasing Color Locatorを接続し、光ファイバー先端深度を決定した。坑口側データには、freezing test と tap test と呼ぶ2種類の作業を実施した。図5はtap test 実施風景とその際のDAS記録である。これらテストでは、まず、テスト実施箇所を選定する。坑口になるべく近い箇所で行うのが望ましいが、作業の安全を考慮し、本試験では図5aに緑丸で示す位置をテスト位置とし、坑口からのCT長を算出することで対応した。CT降管の度、先端深度が固定された後、地上選定位置のCTに対し、冷却スプレーを吹き付け温度変化によるDASシグナルを計測 (freezing test)、および、工具などにて軽く叩きその振動によるDASシグナルを計測する (tap test)。図5cに示

すとおり、この時のDAS計測結果では明瞭にDASシグナルが現れるため、テスト実施位置のDASチャンネルを決定することができる。データ収録作業後の最適化作業で、ファイバー先端深度 (DASチャンネルの最大値) と坑口側既知点 (DASチャンネルはtap test と freezing Test 結果による) 情報を用い、その他のDASチャンネルに線形に深度を設定した。図5cの緑色矢印がファイバー先端深度からテスト位置までのDASチャンネルとなる。

3. 取得記録品質

3.1 DAS ノイズ状況記録

本節ではInside CT方式でのDAS記録に見られるノイズについてまとめる。

本実証試験では、パイプロサイズでの発震作業を中断する夜間でCTが坑内に降下されている状況下では、バックグラウンドノイズを収録する目的でパッシブモードでのDAS計測を実施した。図6は8月23日23:12:09 (JST) から5分間のDASノイズ観測結果を示している。縦軸がDASチャンネル (深度に相当)、横軸が時刻であり、一般的にDASノイズ計測での“waterfall plot”と呼ばれるプロットとなる。密閉状態でのDASノイズ量は、同図中黒線にて囲った部分以外とほぼ同様の非常にノイズの小さな環境

図6 夜間に取得した DAS バックグラウンドノイズ記録

図7 (a)理論スイープ波形と(b)密閉時および(c)流体圧入時の相互相関前 DAS-VSP 記録

であった。例えば、23日の発震作業終了後から24日の作業開始までの約7時間のうち、黒線で囲った箇所を示したような突発的なノイズは1回のみであった。このノイズは何かの原因により突発的なチューブウェーブが発生したのと考えられる。チューブウェーブノイズは坑内に受振

器を設置する VSP サーベイに特徴的なノイズであり、異なるファイバー設置方法での DAS-VSP ショットギャザーでも確認できる（例えば、Daley *et al.*, 2016）が、CT-DAS-VSP では特に顕著なノイズであることが分かった。チューブウェーブの伝播速度は VSP サーベイの仕様により異なるが、本試験の場合、約 1,500 m/s であった。Inside CT 方式では光ファイバーが CT 内で固定されていないこと、坑内のみではなく、地上でドラムに巻かれている CT 部でも同一伝播速度のチューブウェーブが観測されたことから、同ノイズは CT 中に満たされた流体中を伝わる音波（振動）によるものと考えられる。調査井の坑芯傾斜は徐々に変化するものの、このチューブウェーブは CT に沿って伝わる波であるため、DAS ノイズ記録や DAS-VSP 記録上では速度がほぼ不変のリニアイベントとして現れている。リニアノイズ除去を FK フィルターで行う場合、データ取得の際に FK 領域でのエリアジングを避ける必要がある。速度 1,500 m/s のイベントをエリアジングなしでサンプリングする最大の受振点間隔は $d_x = 1,500/F_{\max}/2$ [m] で与えられる。ここで $F_{\max}$ [Hz] は対象とする周波数の最大値である。本実証試験の場合、発震スイープ周波数の最大値が 80 Hz であり、同周波数を $F_{\max}$ とすると $d_x = 9.4$ m となる。Inside CT 法では大きなチューブウェーブノイズがのるものの、本実証試験で採用した 5 m 間隔といった稠密受振が可能な DAS 計測の利点を生かすことで、FK フィルターなどの比較的簡単な処理により除去が可能であるとされる。

図7は5秒間の相互相関処理前データ (b, c) と、本試験で使用したパイプレーター波形(a)であり、スイープ開始から5秒間の記録を表示している。図7bは密閉中のデータ、図7cは流体流動中のデータである。密閉状態で

もチューブウェーブによるリニアノイズが確認できるが、図 7c の流体流動中記録に比べはるかに小さい。チューブウェーブノイズ以外のノイズとして、ランダムノイズの他には、複数のチャンネルで時間によらず大きな振幅を持つノイズが特筆される。例えば、チャンネル番号 500 付近などがこれに相当する。このノイズは“Fading”と呼ばれる DAS 計測特有のもので、光ファイバーのある区間で後方散乱光が出にくい部分がある場合、その区間に対しては DAS 処理を精度よく行えないためにノイズとして現れるものと言われる。前述のとおり、流体流動中の記録（図 7c）はチューブウェーブノイズが大きく、一見してノイズ

レベルが高いことが分かるが、加えて、突発的なノイズも多数確認できる。

3.2 CT-DAS-VSP 記録例

図 8 から図 10 で、異なる条件で取得された DAS-VSP ショットギャザーの例を示す。図 8 は密閉中に収録したゼロオフセット VSP のショットギャザーであり、発震点位置は図 4 のピンク印（発震点 A）に対応する。図中上部に示した黒、緑、赤色の範囲は、それぞれ調査井の垂直区間、45 度、81 度傾斜区間に相当する（図 4）。図 8a は、1 スイープのみを用いた相互相関後ショットギャザーである。一部極浅部と 1,000 m 付近に位置する 20" ケーシング端部

図 8 ゼロオフセット DAS-VSP ショットギャザー例（密閉中）

(a) 1 スイープ記録（チューブウェーブノイズ除去処理適用前）、(b) 13 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用前）、(c) 13 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用）、(d) 13 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用、上方伝播波のみ）

でリングングノイズが発生しているものの、1スイープだけであっても、垂直区間から4,000 mMDを超える坑底までP波直達初動が確認できる。特に坑口に直達初動が達した後で大きなチューブウェーブノイズが発生しており、また、直達初動の到達前でも同ノイズが記録されている。これは、ひとつ前のスイープの影響が残存しているためと考えられる。図8bは、本実証試験での標準スイープ数である13スイープのショットギャザーを重合したものである。DAS-VSPでは、ジオフォンを用いたVSPと異なる特徴的なノイズとして、“common noise”と呼ばれる、チャンネルに依存しない同時刻に発生するノイズが挙げられる(Olofsson and Martinez, 2017)。同ノイズは、地上に設置したDAS処理装置自体が振動することにより発生する解析ノイズであり、本実証試験記録でも、特に発震オフセットが小さいほど大きな振幅で発生した。図8bはOloffson and Martinez (2017)と同様の手法でcommon noise除去を適用した後の記録である。同ギャザーではまだチューブウェーブノイズ除去処理は適用していないため、重合によりSNRは向上しているものの、依然反射波記録は確認できない。図8cはチューブウェーブノイズ除去を適用した後に重合処理を行ったギャザーデータである。チューブウェーブノイズを除去することで、反射波が確認できるまでにSNRが向上した。反射波を強調するために、図8dに上方伝播波のみを表示する。同一反射深度から傾きの異なる2種の反射波が確認でき、P、S波の両

方が記録されていることが分かる。本実証試験を実施したフィールドは地下地層のインピーダンスコントラストが小さく、良好な反射イメージを得ることは困難な地域として考えられているが、CT-DAS-VSPで明瞭な反射波を記録できたことは、期待を大きく上回る結果と言える。ここでは、ノイズ除去としてチューブウェーブノイズとcommon noiseのみを対象としているが、より詳細なパラメータ設定とその他各種ノイズ除去技術を適用することで、さらに良質な記録となることが期待される。

図9に、発震オフセット約2,000 mのオフセットVSP（密閉中記録）の例を示す。発震点位置は図4の緑色印（発震点B）に対応する。図9aは図8c同様、チューブウェーブノイズ除去適用ギャザーを13スイープ重合した記録である。発震オフセットが大きいいため、図8cに比べ図9aはSNRが小さいが、さまざまなイベントが確認できる。図9bは参考として160スイープを重合した記録（チューブウェーブノイズは除去済み）であり、それらイベントがより明瞭である。図9bには特徴的なイベントを矢印にて強調している。それらは、1) 深度0 mで約800 msecに位置する、見かけ速度約7,500 m/sのイベント（赤矢印）、2) 1のイベントから上方および下方の双方に分離するイベント（緑矢印）、3) 深度0 mで約1,000 msecに位置する、比較的大きな振幅を持つ見かけ速度約4,000 m/sのイベント（青矢印）である。これらはそれぞれ、1) 直達P波初動、2) 地下深部地層境界で発生したP-S変換波（反射および

図9 オフセット DAS-VSP ショットギャザー例（密閉中、発震オフセット 2,000 m）

(a) 13 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用）、(b) 160 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用）、(c) 13 スイープ重合（チューブウェーブノイズ除去処理適用、上方伝播波のみ）

透過波), 3) 震源近傍の地下浅部地層境界で発生した P-S 変換波の直達波と解釈している。図 9b のように大きな source effort (Cordson *et al.*, 2000) をかければ, 2,000 m を超えるオフセットでも十分に良好な記録を取得できることが分かるが, この source effort は, 大規模な walk-away あるいは 3D VSP での現実的なサーベイ仕様とは言い難い。しかしながら, 図 9a あるいは, 反射波のみを強調した図 9c で示すように, 現実的な 13 スイープ記録でもイベントが確認できることから, ジオフォンに比して SNR が小さい DAS-VSP であっても現実的可能な範囲で Source effort を大きくすれば十分に地下イメージングが可能な記録が取得できることが分かった。

DAS 計測では, その感度が波動のファイバー軸に対する入射角に依存することが知られている (Wu *et al.*, 2017)。図 9b では, 直達 P 波初動の振幅が深度とともに変化している様子が確認でき, この感度の角度依存性による影響が表れていると考えられる。図 9 には各発震点を中心とする同心円を載せているが, 発震点 B からの直達 P 波波動は, 調査井の深度約 1,500 mMD 付近で, 坑跡に高角度で入射することが分かる。したがって, 同深度付近では P 波直達波への感度がゼロに近くなり, S 波への感度が大きくなる。図 9 で見られる振幅の大きい P-S 変換波の理由の 1 つとして, 坑跡と発震点の位置関係が影響していると考えられる。

本実証試験では, 流体流動の CT-DAS-VSP 記録への影響を評価するため, CT アニュラスを通じて流体圧入を行い, その間に VSP 記録を取得した。図 10a, 図 10b は流体流動中のショットギャザーであり, 比較のために図 10c に同一発震点での密閉中記録を示す。図 10a では, 2 台のバイプロサイズで取得された 80 スイープを重合したものである。チューブウェーブノイズは除去していない。上述の通り, 流体流動中のチューブウェーブノイズは極めて大きく, 例え 80 スイープを重合しても, ほとんどチューブウェーブノイズの影響を除去することができない。しかし, 各スイープ記録にチューブウェーブノイズ除去処理を適用し, 80 スイープ重合した記録では, 図 10c のリファレンス記録と同様のイベントを確認することができる。この比較からも, 適切なノイズ除去処理と Source effort で SNR を向上させることで DAS-VSP でも地下反射波を記録できることが分かるが, 加えて, DAS 計測のダイナミックレンジが十分大きいことも確認できる。

3.3 ゼロオフセット VSP データでの VSP データ QC, 予察的イメージング処理

本実証試験では walk-away VSP データを収録しており, 今後同データを用いた地下イメージング可否について検討を進めていく計画となっている。これに先立ち, ゼロオフセット VSP データ (図 8) で予察的イメージング処理を実施した。この結果を図 11, 図 12 を用いて紹介する。ま

図 10 オフセット DAS-VSP ショットギャザー例 (発震オフセット 2,000 m)

(a) 流体流動中, バイプロサイズ (Vib) 2 台×80 スイープ記録 (チューブウェーブノイズ除去処理適用前), (b) 流体流動中, Vib 2 台×80 スイープ重合 (チューブウェーブノイズ除去処理適用), (c) 密閉中, Vib 4 台×160 スイープ重合 (チューブウェーブノイズ除去処理適用)

ず、地下イメージングに必要な地下速度モデルの構築のため、図 8c にて示したショットギャザーで直達初動走時をピックアップした後、走時トモグラフィを適用し、一次元速度モデルを構築した。図 11a 青実線が CT-DAS-VSP 結果から解析された速度構造である。本実証試験調査井周辺坑井

ではチェックショットが取得されている。それらチェックショットデータから得られた速度構造を灰色実線で示す。深度約 2.5 km 付近から速度の増加傾向が変化する点など、CT-DAS-VSP 結果は周辺坑井結果と整合的であることが分かる。この解析速度構造を 1 次近似した簡易速度

図 11 (a)CT-DAS-VSP 初動解析による一次元速度構造（青）と調査井周辺坑井での速度データ（チェックショットデータ）（灰）、(b)ゼロオフセットショットデータによる CDP マッピング結果、(c) (b)に周辺坑井での合成地震記録を重ねたもの

図 12 (a)Well A での合成地震記録と Corridor stack の比較、(b)Well B での合成地震記録と CDP マッピング結果との比較

構造を用い、図 8d の上方伝播波ギャザーを用いて簡易的に common depth point (CDP) マッピングを施したものが図 11b である。側方に連続する地下反射面がイメージされていることが分かる。なお、図 8d には P 波だけでなく P-S 変換反射波も記録されている。そのため、図 11b には、FK フィルターにより P-S 変換反射波を除去した結果を用いてマッピングしている。本 CDP マッピング断面上にはほぼ乗る形で既存坑井 Well A と Well B が存在する。なお調査井は Well A の深度約 3,500mMD からサイドトラックされた坑井である。図 11c では、図 11b の CDP マッピングに加え、それぞれの坑井での検層データから合成地震記録を作成し重ね描きしている。CDP マッピング結果と合成地震記録に高い類似性が確認される。Well A での Corridor stack および Well B で抽出した CDP マッピング結果と各坑井での合成地震記録との比較を図 12 にまとめる。Corridor stack と Well A の合成地震記録との相関係数は 0.7 程度となり、両者に高い相関があることが定量的にも評価される。

DAS-VSP サーベイの特徴として稠密な受振点間隔と広範囲の受振点範囲が挙げられる。これらの特徴のため、重合効果によるイメージング処理結果向上への寄与が大きい。本予察的処理では CDP マッピングのグリッドサイズを 10 m × 10 m に設定しているが、1 発震点でのデータのみにもかかわらず重合数はマッピング可能範囲で 10 を超えており、DAS-VSP サーベイのイメージング処理における有意性が確認できる。一方で、深度 3,500 m 程度以深の CDP マッピング結果は不明瞭である。この理由として、同領域は主に調査井傾斜が水平に近い区間で記録されたデータによるものであり、発震-受振間オフセットが大きく SNR が小さいこと、および DAS 計測の特徴である振動方向と光ファイバー軸の角度に応じた受振感度の変化によるものと推察される。これら SNR の低下、感度変化を考慮すると、水平に近い傾斜を持つ観測井データでのイメージング処理には、複数の異なるオフセットの発震データによる walk-away ないし 3D VSP データが必要であると考えられる。

本実証試験で採用した集中発震作業のように発震回数を増加する、あるいはバイブレーター台数を増加するなどの方法により Source Effort を大きくすることで、CT-DAS-VSP でも高い SNR の記録を取得することができることが確認されたが、実際の DAS-VSP、特に walk-away や 3D DAS-VSP では現実的な発震仕様とは言えない。一方、現実的な source Effort による標準発震作業結果でも直達初動だけでなく、反射波や P-S 変換波も確認できる記録が取得できたことは大きな成果といえる。DAS-VSP はジオフォン-VSP と種々の点で異なるが、その大きな違いの 1 つとして、受振点が稠密で多チャンネルということにある。この特性を生かし、ジオフォン-VSP では適用できないような処理により、さらに SNR を向上させることも可能であると期待できる。

第 1 章で述べたとおり、データ取得前の事前文献調査

などから、Inside CT 方式の最大の懸念は光ファイバーと坑壁のカップリングと考えていた。しかし、取得された記録では、坑井が垂直の区間でもカップリング不良時に典型的に見られるノイズ (DAS-VSP ショットギャザー上でカップリング不良区間のみに往復する波動) が存在せず、Inside CT 方式でも良好のカップリングが得られることを確認できたことも特筆すべき成果である。また、CT-DAS-VSP で速度構造の推定や観測井近傍の反射面イメージングに十分な品質のデータが得られることが分かった。DAS-VSP では、ジオフォンを用いた VSP に比べて稠密な受振が可能でかつ作業時間短縮できる利点がある。さらに既存坑井を DAS 観測井として使用できる Inside-CT 方式で高品質のデータが得られたことは重要な意味を持つ。坑井に DAS を設置した状態であれば、常時、光ファイバー全区間でのデータ取得が可能であることから、今後の DAS-VSP の活用例として、例えば、地表震探との同時取得・イメージングなどが考えられ、繰り返しサーベイによるモニタリングのみならず、地表ノイズの大きい地域での地下構造イメージング品質向上・解釈精度向上に寄与するものと期待される。

4. Post-field データ最適化作業

DAS 計測では地上計測ユニットに接続した光ファイバーの全区間が受振点となるため、収録後の原記録では坑口より計測ユニット側のデータも含まれる。Post-field データ最適化作業では、まず、このデータの削除と各チャンネルへの正確な深度情報などを編集する。加えて、サービス会社にもよるが、DAS 計測で最も重要と言われるパラメータの 1 つであるゲージ長 (Dean *et al.*, 2016) の最適化作業を行う。本試験では、現場での QC 目的のために表示するショットギャザーにはゲージ長 20.41 m (表 2) を用いていたが、現場作業終了後、その値の最適化作業を実施した。

DAS 計測では、光ファイバー内を伝播するレーザー光の後方散乱光の情報 (振幅、ないしは位相) を用い、光ファイバー各区分でのひずみ量を計算する。この DAS 光学処理において、ゲージ長は、SNR 向上のための移動平均のウィンドウサイズと類似する役割を持つ (Dean *et al.*, 2016)。したがって、不必要に長いゲージ長は DAS 処理後記録の高波数成分を減衰させ、空間分解能を低下させる。このため、ゲージ長の設定には細心の注意を払う必要がある。

Dean *et al.* (2016) によれば、伝播波動の波形として Ricker ウェーブレットを仮定すると、ゲージ長 (GL) と SNR は以下の関係で与えられる。

$$SNR \propto GL \exp \left\{ - \frac{(\pi k_p GL)^2}{4} \right\} \quad (1)$$

ここで k_p は伝播波動の見かけ波数であり、見かけ速度 V_p と卓越周波数 F により、 $k_p = F/V_p$ で与えられる。式 1 を図示した図 13 から分かるとおり、SNR はゲージ長を長く設定するとそれに依りて向上し、ゲージ長が伝播波動の

図 13 ゲージ長と Signal to Noise Ratio の関係

波長の 0.45 倍で最も大きくなる。それ以上長いゲージ長はかえって SNR を減少させることが分かる。

一般の移動平均と同様、ゲージ長での平均化処理を適用すると元の伝播波形がくずれることになる。あまりに長いゲージ長を設定すると、その影響は Dean *et al.* (2016) の Figure 9 にあるように、シングルピークの Ricker ウェーブレットがダブルピークになることに加え、サイドローブ間の距離が大きくなり（波長が長くなり）分解能が低下する。

Dean *et al.* (2016) は、処理適用後の波長はゲージ長の増加とともに長くなるため、 SNR を向上させつつ、空間分解能の低下を最小限にとどめるゲージ長として、式 2 の R を 0.4 ~ 0.54 程度として与えられる GL_{opt} をゲージ長の目安とすることを提案している。

$$GL_{opt} = \frac{RV_p}{F} \quad (2)$$

例えば、 $V_p = 2,500$ m/s、 $F = 25$ Hz の場合、最適なゲージ長は 40 m から 55 m 程度で調整すればよいことが分かる。以上を踏まえ、異なるゲージ長を用いて DAS 光学処理を行い、 SNR および周波数スペクトルの変化を参考にゲージ長パラメータを決定した。テストには概して SNR が高く直達初動が深部まで明瞭であるゼロオフセット標準発震データを用いた。

図 14 に、評価に用いた各種情報をまとめたものを示す。まずゲージ長 45 m を用いたショットギャザーデータを用い、P 波直達初動の走時を求めた (FB, 赤実線)。直達初動はピーク位置をピックアップした。その初動時刻を基準とし、1) FB-180 ミリ秒 (T1, 青実線)、2) FB+180 ミリ秒 (T2, マゼンタ実線)、3) FB+1 波長 (T3, 緑実線) の 3 種類の時刻を決めた。次にノイズレベル、シグナルレベルの指標として、T1 から FB まで (RMS_N) および FB から T2 まで (RMS_S) の 2 種類の root mean square (RMS) 振幅を計算する。シグナルレベルの指標には、FB から T3 までの直達初動から 1 波長の間での peak positive amplitude (PPA) および peak negative amplitude (PNA) も抽出し、 $PTP = 0.5 \times (PPA - PNA)$ としてシグナル振幅とみなした。

図 14 振幅およびスペクトル解析ウィンドウ

図 15 抽出振幅値（上）および周波数スペクトル（下）の例

これら振幅値を用い、

$$SNR_1 = \frac{RMS_S}{RMS_N} \quad (3)$$

および

$$SNR_2 = \frac{PTP}{RMS_N} \quad (4)$$

にて 2 種類の SNR 指標を算出した。周波数スペクトルには FB から T2 までのデータを用いた。抽出された振幅値、スペクトルの例を図 15 に示す。

本調査のショットギャザーでは、深度約 1,100 mMD から 1,200 mMD にノイズの大きい区間が存在している（図 15）。同深度付近では、約 1,050 mMD 付近に調査井の 20" ケーシングシュエが存在する以外に、坑井仕様や地質状況に特異な点はなく、このノイズは、20" ケーシングシュエの存在により生じた局所的なノイズと考えられる。同ノイズを避け、また、傾斜区間を含む坑井深部が本試験の主対象層であることから、2,000 mMD 以深に特化して評価を行った。同深度以深の SNR 指標、スペクトルの平均値を算出し、図示したものが図 16 である。同図(a)に、ゲージ長を 10 m, 45 m, および 80 m としたときの 3 種類のショットギャザー（評価対象層の直達初動付近を拡大）を例として示す。同図上ギャザー例で明らかのようにゲージ長を長くすることで直達初動の振幅値が大きくなり SNR が向上することが見て取れる。一方で、ゲージ長が長くなると、チャンネル方向（図上水平方向）に卓越するノイズが大きくなっていくことも分かる。長いゲージ長はチャンネル方向に長いウィンドウを持つ移動平均を適用していることとほぼ同義であると考えられるため、ランダ

ムノイズの抑制につながる一方で、ギャザー例にみられるように、ノイズレベルの大きいチャンネルの影響を周囲のチャンネルに分散させるような悪影響も確認できる。この結果、45 m のゲージ長では反射波列と思われる右肩上がりのイベント群（例えば Time = 1.8 sec 付近から右上に延びるイベント）が確認できるが、80 m までゲージ長を大きくすると水平ノイズにより不明瞭になっている。このような影響は Dean *et al.* (2016) で特に議論されておらず、実データのノイズ状況に応じてゲージ長を評価しなければならない点の 1 つと言える。

図 16b には計算された 2 種類の SNR 指標を示している（青実線： SNR_1 、赤実線： SNR_2 ）。ゲージ長の増加とともにいずれの SNR 指標ともに増加傾向がみられるが、ゲージ長が 45 m となる付近からその傾向は頭打ちの様相を呈し、最も長い 80 m の場合との間に顕著な差異は得られない。図 16c に示す周波数スペクトルでは、ゲージ長に関わらず 22 Hz 付近に卓越周波数を持ち、それより低周波、および、高周波側では、ゲージ長の増加とともに相対的な振幅レベルの低下が認められる。卓越周波数でのエネルギーがシグナル起因、それ以外のほぼフラットなスペクトルとなる周波数帯をノイズによるものとする、それらの値から算出される SNR は図 16b とほぼ同等であり、ゲージ長が長くなることによるノイズ低減効果が表れている。

図 11a に調査井周辺の既存坑井で取得されたチェックショットデータから算出した地下速度構造を示している。各坑井で多少のばらつきがあるものの評価対象層ではおおむね 2,700 m/s から 3,700 m/s の速度を持つことが分かる。伝播波動の卓越周波数を 22 Hz とすると、想定される P 波波長の最小値は 123 m 程度となり、式 2 で与えられる GL_{opt} は約 49 m から 68 m 程度となる。上述するとおり、

図 16 (a) $GL = 10\text{ m}$, 45 m , 80 m でのショットギャザー (b) SNR_1 (青実線) および SNR_2 (赤実線), (c) 周波数スペクトル ($0 \sim 120\text{ Hz}$)

ノイズの振幅レベルがチャンネルごとに変わる実データでは同式で与えられる GL_{opt} よりもやや短めに設定する必要性が示唆されたため、本実証試験では 45 m のゲージ長を採用し、Post-field 最適化処理を行った。

なお、 GL の最適化を検討する際に考慮すべき P 波速度は、光ファイバーに沿う方向の見かけ速度である。そのため、坑井に斜交する方向で波動が伝播する場合、最適ゲージ長はより長くなると考えられる。しかし、卓越周波数や P 波速度は深度によって変わり、また、地層傾斜がある場合やオフセット発震の場合、坑井傾斜が深度で異なる場合は、直達波と反射波で光ファイバーへの入射角が変わるため、同一サーベイ仕様であっても最適なゲージ長は状況と目的に応じて変わり得る。DAS 光学処理では、処理を行うデータセットに対し単一のゲージ長を設定する必要がある、目的によって異なるゲージ長のデータを必要とする場合は、複数のゲージ長でのショットギャザーを作成し、後で取捨選択することが解決策の 1 つとなる。この可能性がある場合は、散乱光情報をすべて記録し現場収録作業後に

光学処理可能なサービス会社を選択する必要がある。

5. 結 言

2017 年 8 月、国内陸域坑井にて、世界的にも例のないコイルドチュービング内に光ファイバーを設置する Inside CT 方式による CT-DAS-VSP の現場実証試験を実施した。本試験は調査井の坑跡を活かし、大深度・高傾斜井での walk-away DAS-VSP データの地下モニタリング技術としての有効性評価に資するデータを取得すること、および、流体流動中と密閉時の VSP 記録を比較し、圧入井を用いた圧入中モニタリングの可能性についての検討に資するデータを取得することを目的とした。坑井密閉状態、流体流動状態、CT をチュービング先端まで降管、坑底まで降管といった多様な条件でのデータ取得を達成し、また広範囲の発震点からのデータを取得でき、収録作業目的を達成できた。

CT-DAS-VSP に関して、現時点は簡易的なフィールド処理の適用にとどまるが、以下のことが判明した。

- (1) CT-DAS-VSP でも反射波を含め良質な DAS-VSP 記録を収録できる。
- (2) CT-DAS-VSP では大きなチューブウェーブなどのノイズが混入するため、データ処理においてそれらの除去がきわめて重要である。
- (3) DAS 計測の SNR の低さは Source effort を増大させることで克服できる。
- (4) ジオフォン-VSP よりも稠密受振であり、従来は適用しなかった処理でのノイズ除去も検討の余地がある。
- (5) 流体流動によるノイズは極めて大きく、データ処理次第でシグナルも認識可能ではあるものの、例えば、圧入作業と並行しての VSP サーベイで十分な SNR を達成するのはチャレンジングである。ただし、圧入井に光ファイバーを展開しておきメンテナンスなどの圧入停止期間を利用し、短期間でサーベイを実施するといった工夫が可能で、効率的な繰り返しサーベイには十分貢献可能である。
- (6) ゲージ長は理論的に最適と言われる値よりもやや短めに設定するのが安全である。
- (7) また、ゲージ長の設定は DAS-VSP にとって重要であり、可能であればサーベイ後に時間をかけて実データに基づくパラメータ調整をできる仕様にすることが肝要である。

今後は、DAS-VSP がどのようにモニタリング技術として使いうるかを、今回取得されたデータをもとに検討を進めていく。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務による成果の一部である。2 名の匿名査読者の方には原稿投稿時に貴重なコメントを多数いただいた。ここに記して謝意を表します。

引 用 文 献

- Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S., Buddensiek, M.L., Dillen, M., Nickel, M., Lima, A.L., Arts, R., Neele, F. and Rossi, G., 2010 : Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation. *The Leading Edge*, **29** (2), 170–177.
- Cordsen, A., Galbraith, M. and Peirce, J., 2000 : Planning land 3-D seismic surveys, SEG.
- Daley, T. M., White, D., Miller, D. E., Robertson, M., Freifeld, B. M., Herkenhoff, F. and Cocker, J., 2014 : Simultaneous Acquisition of Distributed Acoustic Sensing VSP with Multi-mode and Single-mode Fiber Optic Cables and 3-Component Geophones at the Aquistore CO₂ Storage Site, The 84th SEG Annual Meeting, Denver, USA.
- Daley, T. M., Miller, D. E., Dodds, K., Cook, P. and Freifeld, B. M., 2016 : Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama. *Geophysical Prospecting*, **64** (5), 1318–1334.
- Dean, T., Cuny and T., Hartog, A., 2016 : The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing. *Geophysical Prospecting*, **65** (1), 184–193.
- Hartog, A., Liokumovich, L. B., Ushakov, N. A., Kotov, O. I., Dean, T., Cuny and T., Constantinou, A., 2016 : The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic distributed vibration sensing, The 78th EAGE Conference and Exhibition, Vienna, Austria.
- Humphries, M., Vidal, J. A. M. and de Dios, J. C., 2015: VSP Monitoring for CO₂ Migration Tracking in Fractured Rock Massifs, The 77th EAGE Conference and Exhibition, Madrid, Spain.
- Mateeva, A., Lopez, J., Mestayer, J., Wills, P., Cox, B., Kiyashchenko, D., Yang, Z., Berlang, W., Detomo and R., Grandi, S., 2013 : Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with VSP. *The Leading Edge*, **32** (10), 1278–1283.
- Mateeva, A., Lopez, J., Potters, H., Mestayer, J., Cox, B., Kiyashchenko, D., Wills, P., Grandi, S., Hornman, K., Kuvshinov, B., Berlang, W., Yang, Z., Detomo, R., 2014 : Distributed Acoustic Sensing for Reservoir Monitoring with Vertical Seismic Profiling. *Geophysical Prospecting*, **62** (4), 679–692.
- O'Brien, J., Kilbride, F. and Lim, F., 2004 : Time-lapse VSP reservoir monitoring. *The Leading Edge*, **23** (11), 1178–1184.
- Wu, H., Wong, W. F., Yang, Z., Wills, P. B., Lopez, J. L., Li, Y., Blonk, B., Hewett, B. and Mateeva, A., 2015 : Dual-well 3D vertical seismic profile enabled by distributed acoustic sensing in deepwater Gulf of Mexico, Interpretation, 3, no. 3, SW11-SW25.
- Wu, X., Wills, M. E., Palacios, W., Ellmuthaler, A., Barrios, O., Shaw and S., Quinn, D. 2017 : Compressional- and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data. *The Leading Edge*, **36** (12), 987–993.
- Yu, G., Cai, Z., Chen, Y., Wang, X., Zhang, Q., Li, Y., Wang, Y., Liu, C., Zhao, B. and Greer, J. 2016 : Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline. *The Leading Edge*, **35** (7), 615–619.
- Zhan, G., Kommedal and J., Nahm, J. 2015 : VSP field trials of distributed acoustic sensing in Trinidad and Gulf of Mexico, The 85th SEG Annual Meeting, New Orleans, USA.