

CO₂ 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討

相馬宣和¹⁾・杉原光彦²⁾・石戸経士²⁾・名和一成³⁾・西 祐司²⁾

1. はじめに

CO₂地中貯留事業のうちモニタリングは、地下に圧入したCO₂の貯留層内での挙動を探知し監視することや、貯留層からのCO₂漏洩という潜在的なリスクに備えることを目的に実施され、CCS事業にとって不可欠である。これは、サイトの調査や開発、操業中は言うまでもなく、CO₂圧入終了後のサイト閉鎖後も含めて長期間の実施が求められるため、安全性の確保と同時に適切なコストであることが不可欠であり、極力費用対効果の高いモニタリング技術が求められている。実際に社会的に受け入れられるCO₂地中貯留事業を実現するためにも、長期的なコスト面への配慮は一層重要になってくる。

2次元もしくは3次元の物性分布を地表／海上から探知する物理探査手法は、坑井データ（地下深部の直接的な情報をもたらすが、点もしくは線上の測定）を補う有効なモニタリング手法として用いられる。その代表的な方法が、国際的にもCO₂地中貯留における標準的なモニタリング手法として考えられている「弾性波探査」、すなわち「反射法」、「VSP法」および「弾性波トモグラフィ」等の「能動的地震波探査手法」である。これらの能動的弾性波探査では、地表・海底もしくは坑内に展開した多チャンネルの地震計アレイにより、移動する人工震源によって多数の発振点から発せられた弾性波（地震波）を受信して解析することにより、弾性波が伝播する媒質の弾性的な物性、すなわち弾性波速度、減衰等を推定し、それに基づき地下構造や状態を推定する。これによって圧入したCO₂が地下で拡がっている領域（CO₂プルームと称される）の輪郭を検知できると考えられているため、能動的弾性波探査手法、特に反射法地震探査はCO₂監視において非常に有用な手法と考えられている。

1回の能動的弾性波探査により、ある時点での地下のCO₂プルームを捉えた「スナップショット」を得られるが、これを適当な時間間隔で繰り返し実施することにより、「スナップショット」の時間変化を検知するのが一般的な弾性波探査によるモニタリングである（反射法では、発振点や受振点を地表に面的に分布することによって地下の弾性波

物性分布の3次元の「スナップショット」を得る探査のことを3次元（略して「3D」）反射法と呼ぶが、モニタリングではこれに時間軸を加えるため、「4D」という呼び方をされることもある）。しかし、このような弾性波探査は高価であり、特に発振・受振に船舶を使用することになる海域での調査は非常に高コストである。また、広い範囲に発振点・受振点を展開することから、調査範囲における地元関係者等との調整も必要で、CCS事業の社会受容性にも影響を与える可能性もある。このように、定期的を実施する必要があるモニタリングにおいては、弾性波探査は非常に負担が大きな手法と考えられ、能動的弾性波探査の実施回数を少なくすることは、CCS事業全体のコストや社会受容性の観点で、望まれる方向性の一つと考えられる。また、弾性波により探知できる物性は弾性的なものに限定されることや、使用する弾性波の周波数・エネルギー・発振位置等によって探知できる構造・分解能が左右されるという、原理的な限界もある。弾性波探査とは違う種類の地下情報を取得することにより、モデル不確か性の低減や、CO₂貯留状況の合理的判断基準の設定に結び付くと考えられる。

このため、我々の研究では、弾性波以外のモニタリング手法を組み合わせて能動的弾性波探査を補完することを考えている。基本的に、能動的弾性波探査に比較して低コストである自然信号等の信号源を用いた受動的な物理探査手法を併用し、CO₂貯留の最適モデリング法との組み合わせによるモデル検証をベースにしたモニタリングの概念によって、“補完”を実現しようと構想している。これらの実現のために、弾性波探査以外のモニタリング手法の、CO₂地中貯留のモニタリングに対する性能や適用性、適切な利用方法等を明らかにするための諸検討を行っている。

本稿では、このような産総研の研究における反射法地震探査を補完する多面的モニタリング技術の基本構想、具体的な実フィールド研究のために参画している米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップ（Southwest Regional Partnership for Carbon Sequestration：SWP）プロジェクトとそのテストサイトの概要を説明する。次に、米国における観測計画、観測基点の設置状況、ベースライン測定結果など、進捗状況を報告する。

1) 産総研 再生可能エネルギー研究センター（地圏資源環境研究部門兼務）
2) 産総研 地圏資源環境研究部門
3) 産総研 地質情報研究部門

キーワード：CO₂地中貯留、多面的モニタリング、SWP、ファーンズワース、重力、自然電位、AE

2. 多面的モニタリング技術の基本構想

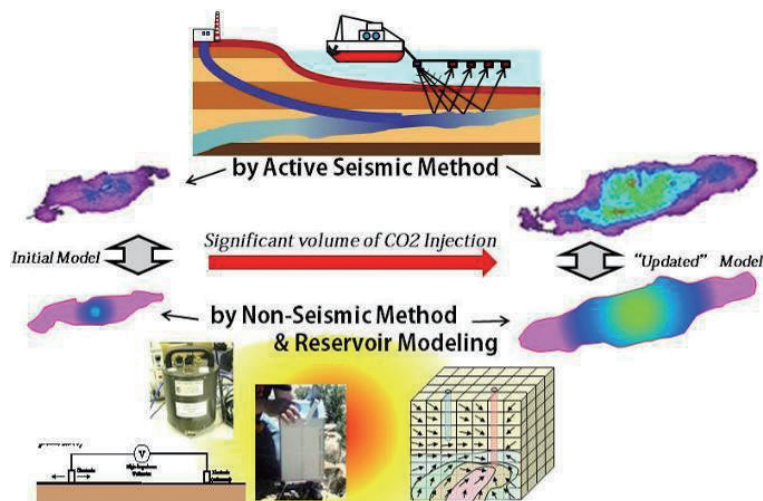
反射法地震探査に代表される人工震源を用いる能動的弾性波探査技術は、CO₂地中貯留のモニタリングにおいても信頼性の高い標準的な手法であると見なされている。従って、産総研の多面的モニタリングの研究においても、能動的弾性波探査の実施を基本的な前提にしつつ、CO₂地中貯留の各段階やサイトの状況に応じながら、モニタリング期間全体の中で、大掛かりな能動的弾性波探査の実施回数を少なくすることを“補完”の中心的な考え方にして諸検討を行っている。多面的モニタリングによる“補完”は、弾性波探査を完全に置き換えるのではなく、全体として“モデル検証”に基づく評価を行うことで実現すると考えている。

物理探査的手法によるCO₂貯留状況の把握は、対象が地下深く真実そのものを確認することが通常不可能であることから、それ自体が、本質的には何らかの仮定を含んだ“モデル”の創出であると考えられる。そこで、「圧入されたCO₂が時間と共に広がる状況」をモニタリングするという意味を、適切に“モデルを更新すること”とその検証であると考え、初期のモデルを坑井情報や能動的弾性波探査を用いて精緻に構築することができていれば、そこからある程度の時間範囲においては、弾性波探査以外の方法によっても信頼し得る“モデルの更新”を可能にすることができるのではないかと考えている。この実現により、能動的弾性波探査の実施回数を抑えることが、多面的モニタリングによる“補完”の基本概念である(第1図)。この概念の実現には、モニタリング技術だけでなく、最適なモデリング技術ならびにこれらの組み合わせ法が併せて重要である。

多面的モニタリング技術については、単に弾性波探査の回数を減らすだけではなく、探査法自体も低コストであることが望まれる。そこで、能動的信号源を必要としない方法に注目し、適用性について検討している。同時に、異なる複数の物性値を反映した地下情報が得られることで、例えば貯留層周辺の圧力変化の監視や潜在的漏洩経路の推定など、能動的弾性波探査のみを多数回実施するのとは違う観点からの安全監視が実現することにも期待している。

3. 米国・南西部炭素隔離地域パートナーシップ

弾性波探査を補完する多面的なモニタリング技術の研究を進めるために、産総研は我が国に先んじて実施される米



第1図 弾性波探査の補完のコンセプト。

国の大規模なCO₂地中貯留実験の場に参加しており、CO₂地中貯留の実フィールドでの観測とデータ解析を行うことにより、CO₂モニタリングへの適用性の検討や基本的な特性の把握、最適な観測や解析手法の検討を行っている。

米国における二酸化炭素隔離技術の研究開発は、エネルギー省(DOE)の主導する地域パートナーシップ(Regional Carbon Sequestration Partnerships: RCSP)を主体として進められている。RCSPによるCO₂地中貯留に関する研究は、異なる地域、地質条件下で、大規模CO₂地中貯留を実施するための技術開発、インフラ設置、法規制整備などを支援することを目的として、これまで地域特性検討と小規模実証試験の2つのPhaseが実施され、現在はPhase IIIと呼ばれるDevelopment Phase(内容は大規模実証試験であり、計画期間は2008～2017年)に移行している。産総研では2006年頃から、モニタリング研究を主題にして、SWPに参加しており、Phase IIサイトのユタ州アネスで自然電位の長期連続モニタリングを実施した。SWPの対象地域は米国南西部のユタ、ニューメキシコなど全部で9州に及ぶ広い範囲である。SWPのPhase IIIでは、現在、テキサス州ファーンズワース付近の石油EORサイトを実証試験サイトとしてプロジェクトを進めている(第2図)。

2013年4月にキックオフミーティングが開催された後、現地石油会社の有する地質や過去の探査情報などの共有が始まり、2013年秋から本格的にプロジェクトが開始されたが、産総研ではSWPを介して現地石油会社の了解を得て、本格的なSWP Phase IIIプロジェクトの開始前の2012年11月より、観測基点の設置とベースライン測定を開始している。

4. ファーンズワース・テストサイトと観測計画

ファーンズワース・テストサイトはテキサス州最北部付近に位置し、オクラホマ州に本社を置く Chaparral Energy 社の操業する石油フィールドである。ファーンズワースのCO₂注入層は石油産出層である Morrow Formation（深度約2400 m付近、透水性100～10,000 mD）という砂岩層である（第3図）。本サイトでは水を注入する石油生産が行われてきたが、2012年頃から既にCO₂-EORが開始されており、SWPは今後のCO₂圧入を研究のターゲットと考えている。プロジェクト計画段階でのCO₂注入規模は5年間で約100万トン（年間20万トン程度）であり、これを最大25坑井から行うとされている。SWPの正式なテストサイトに決定して日が浅く、まだ詳細な情報は公開されていないが、石油開発の過程で地震探査や坑井検層等の数多くの地下情報があるとのことである。

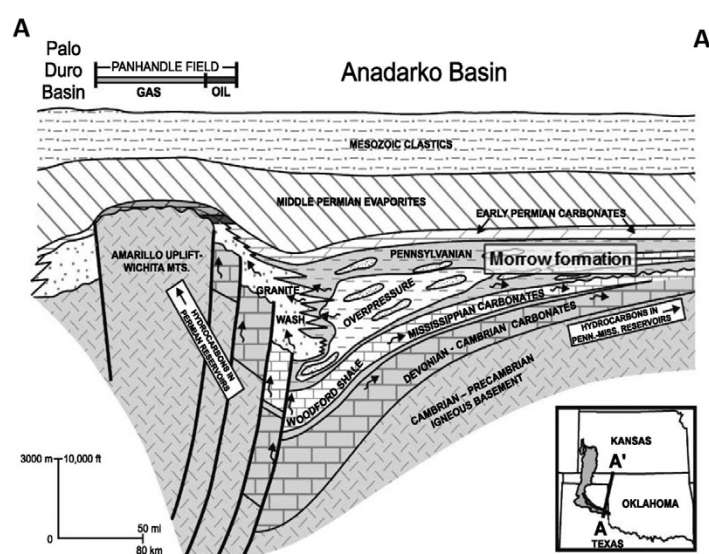
ファーンズワースにおいては、プロジェクトの本格始動に先駆けて、最初の3次元反射法地震探査が、2013年1～2月に実施され、今後VSPや坑間トモグラフィ、坑井内地震計アレイを用いた微小地震観測などが計画されている。物理探査モニタリング以外にも、地下水や土壌ガスなど様々なモニタリングが実施されている。産総研の多面的モニタリング研究では、重力、自然電位、地表AE観測などの、比較的簡便な、能動的信号源を必要としないモニタリング手法を実施している。主たる観測基点は2012年11月から12月にかけてファーンズワースに設置しており（第4図）、それぞれについて最初のベースライン測定を開始している。

4. 1 重力モニタリング

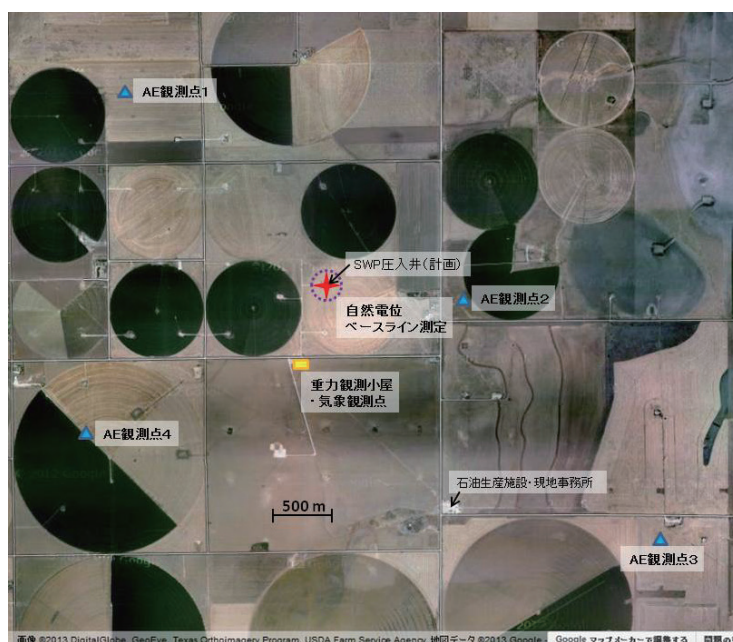
重力測定では、地下の密度変化による地表の重力の変化を重力計を用いて測定する。モニタリング手法としては、60年代から地熱開発における貯留層評価手法として用いられてきた。CO₂モニタリングでも、低密度のCO₂の注入に伴う地下の変化が評価できると期待されており、実際に北海スライプナーでのCO₂圧入による重力変化が検出できたと報告されている（Alnes *et al.*, 2008）。重力測定は地下の全変化の積算として重力値が現れるため、局所的な浅部の擾乱の影響の識別と補正が、深部の微小重力



第2図 ファーンズワース・サイトの国内での位置（Google Map による）。



第3図 ファーンズワース・サイト付近の地質断面概略図。Sorenson(2005)に加筆。



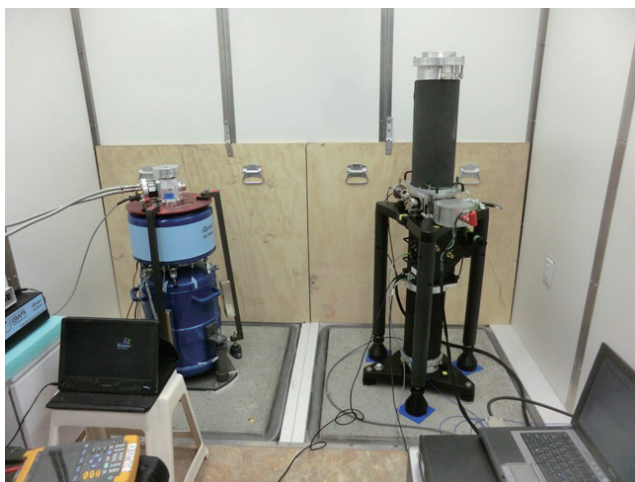
第4図 ファーンズワースにおける産総研の観測基点およびベースライン測定位置。

変化を評価する上では重要である。本研究の重力モニタリングでは、CO₂注入に伴う微弱変化を捉えることが最終的な目標であるが、CO₂地中貯留の特性を考えると、様々な重力の測定手法の中から最適な方法を確立することも目指している。

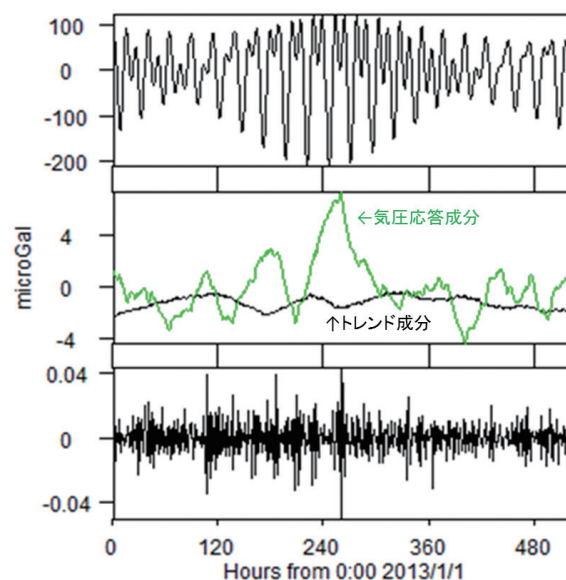
相対重力測定では、重力変動が予想される地点と重力変動が無いと仮定する基準点の間を可搬型相対重力計を用いて往復して測定し、ある時点での両地点間の相対的な重力差を評価する。この往復測定を、予想される変動の速度に見合った頻度で繰り返すことで、全体的な重力変動の傾向が得られると考える。広範囲の測定が比較的容易に行えることが利点であるが、重力変動が無い基準点は現実には存在しないので、空間的に一様でない微小な経時変化を評価することは困難である。そこで、相対重力測定に合わせて、基準点において絶対重力測定を同時に行い、基準点の重力変動も測定して測定誤差を抑制する方法があり、ハイブリッド重力モニタリングと呼ぶ (Sugihara and Ishido, 2008)。

一方、定点での高精度な連続重力測定は時系列解析を可能にするため、様々な時間スケールの変動の分離に有効である。CO₂地中貯留では、貯留層深度が深かったり、観測基点との距離が離れていたり、また、貯留層内の既存流体(水、石油等)とCO₂との密度差が極端ではない可能性もあり、初期に大きな重力変化が期待できないこともあり得ることから、本研究では従来より桁違いに高感度な超伝導重力計による連続測定を実施している。超伝導重力計は、大型かつ定期的な液体ヘリウム補充が必要であったため利用用途が限定されていたが、最新の新世代の超伝導重力計では、低コスト化・小型化に加え利用中の液体ヘリウム補充が不要になるなど維持管理が簡便になり、実用目的で研究施設以外でも活用できるようになっている。超伝導重力計はドリフトや感度変化が極めて小さいが、本質的に相対重力計であることから、本研究ではこれを定期的にハイブリッド重力モニタリング(可搬型相対重力&絶対重力)と組み合わせ、石油生産や農業の散水等の空間的な影響も把握し、超伝導重力計の効果が最大限になる測定方法を構想している。

2012年11月末から12月にかけて、超伝導重力測定および絶対重力測定を実施するための観測基点(観測小屋)をファーンズワース・サイトに設置して、諸準備の後、翌1月から超伝導重力計のベースライン連続測定を実施した。超伝導重力計は完全な野外向け構造ではないため、重力計を設置するコンクリート基台(1m角、2個)の上に、



第5図 重力観測基点内における超伝導重力計測(左)と絶対重力計測(右)の併行測定の様子。



第6図 超伝導重力測定データの基本処理結果例(上から潮汐成分、気圧応答成分(緑色)、トレンド成分、不規則成分)。

電源の確保や温度管理を考えた観測小屋(加工された船舶用コンテナハウス)を被せ、その内部で測定を行う。第5図に重力観測基点の状況を示す。重力測定点の標高変化は重力値に直接影響するため、標高の変化をモニタリングするためのGPS観測用の基台も小屋近傍の外部に設置してある。絶対重力測定は、超伝導重力計と同じ小屋内の基台で絶対重力計FG5により行い、相対重力測定は基点周辺で相対重力計CG5によって約20地点で行っている。第6図に、超伝導重力ベースライン測定で得られた結果の基本処理例を示す。超伝導重力計は安定的に動作しており、本研究で構想した重力測定方法は十分に実現可能であることがわかる。トレンド成分に微弱変化が反映されると考えら

れるが、現時点でCO₂圧入は無いことから、降雨影響などとの比較を考えている。

4. 2 自然電位モニタリング

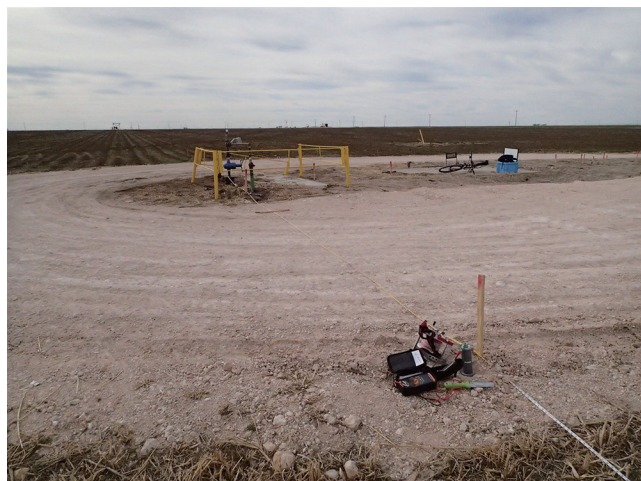
自然電位とは、通常、地面に自然に発生している時間的に安定して存在する電位差のことを指す。正負の電荷を分離するメカニズムは主に電気化学的な過程と考えられ、界面動電効果（流動電位）、酸化還元反応、熱電気現象、拡散電位などが発生原因となる。鉱床探査や検層分野への適用は古いが、熱水対流に伴う正電位異常への着目や貯留層圧力変動等の探査の試みは地熱分野で行われている。自然電位は、測定が基本的に簡便かつ低コストで、弾性波探査とは異なる電気化学過程を反映した情報が得られるために、CO₂地中貯留でも実用利用ができれば有用性は大きいと考えられる。

CO₂地中貯留への適用に関して、数値シミュレーションによる検討では、地下深部に流動電位係数の境界面が存在しCO₂注入に伴う圧力変化がその境界面まで及ぶような状況では、自然電位モニタリングが地下の圧力変化を検出するための有効な手法になる可能性が示されている。また、これまでの空気やCO₂の坑井への圧入実験の結果と酸化還元電位を考慮した数値シミュレーションから、坑口近傍で比較的小規模な電極のアレイを展開することで、鋼管ケーシングの深部にCO₂プルームが到達したときに、坑井近傍の電位変化としてこれを検出できる可能性が示されている (Ishido *et al.*, 2013)。

ファーンズワースにおけるCO₂圧入においては、特に後者の既存坑井付近へのCO₂の到来検知を主なターゲットとして、CO₂の流動に関するモニタリング法としての適用性を検証する予定である。長期の自然電位モニタリングの観測システムを展開する前にフィールドの基本的な特性やCO₂圧入予定井周りの状況を把握するため、2013年1～2月にかけて、観測坑を横断する約5.5 km長の測線に沿った比抵抗調査を実施するとともに、自然電位ベースライン調査に着手している (第7図)。

4. 3 AEモニタリング

AE (Acoustic Emission) は「(物質の破壊や変形に伴い放出される) 音響周波数領域の弾性波」を元来は意味しており、音響学的あるいは地震学的な手法によって観測され、材料、圧力容器、建築構造物などの健全性や耐久性の評価など、工学的目的のためにAE法と称して利用される。受動的に観測できる弾性波を幅広く工学的に活用することが

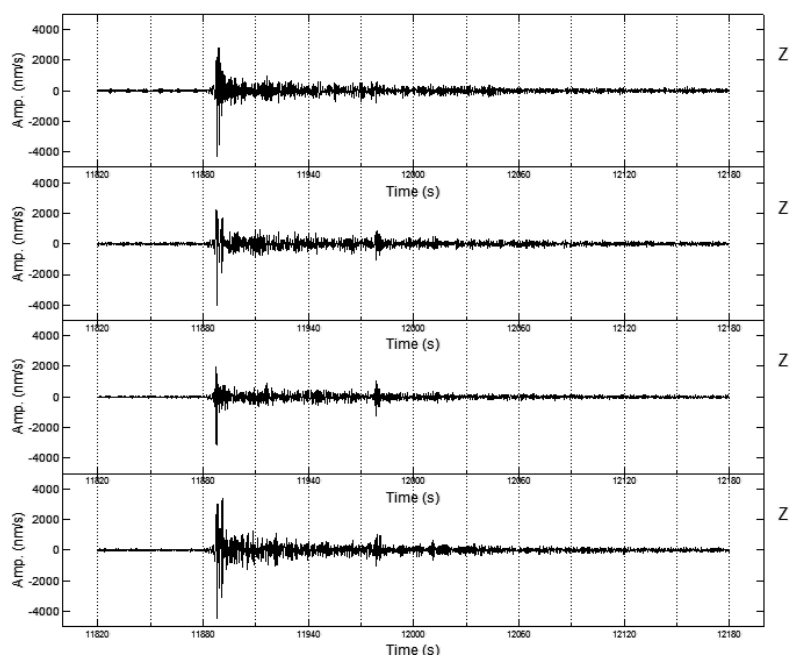


第7図 観測坑周辺における自然電位ベースライン測定。

AE法の特徴であり、新妻 (1997) によると、「天然現象、石油や地熱流体の採取、水圧破碎、坑道・トンネルの掘削、坑井の掘削、など、何らかの原因により地下において付随的に発生した弾性波を何らかの方法で観測し、それを工学的に用いること」とAE法は定義付けられている。本研究においては「AE」を広く捉え、CO₂地中貯留サイトで受動的な観測によって得られる可能性のある比較的高い周波数の弾性波全てに注目し、それぞれの性質に応じた信号処理法を開発、適用して、地下情報を抽出することを検討しており、一般に「Passive seismic」とも呼ばれるものを対象としている。

AE計測は、CO₂貯留域の拡大を説明する情報の一つになり得ると考えられるとともに、潜在的漏洩経路となる小断層やき裂帯のような弱線の抽出法としても期待できる。地下に観測器を設置する坑井内観測はノイズや信号品質の面で有利であるが、我が国では坑井内観測点を多数点確保することはコストなどの面で困難と考えられる。また、地質も複雑で連続性が悪い。そこで、適切なコストで信頼性ある結果を得るために、少数の坑井内点+地表点という観測方式の適用を検討している。坑井内観測で微弱AEを受信すると共に、地表観測点で比較的大きなAEの受信を行って、組み合わせて信頼性のあるAE位置決定を実現する。SWPが観測坑井を準備してVSPと受動弾性波観測を行う計画であるので、産総研では補助的に地表AE観測点を設置し、相互に協力し合う予定である。ファーンズワースにおいては地表観測点4か所 (第4図) を設置し、ベースライン測定を2012年11月下旬から開始している。

観測に用いているAEセンサは、英国Guralp社の24bitデータロガーとGPS時計を内蔵した広帯域3成分地震計CMG-6TD (30秒～100Hz、感度2400 V/(m/s)) である。



第8図 AE 観測波形例 (Z成分. 上からAE観測点1~4). 縦軸は速度型地震計の振幅値, 横軸は時間 (秒).

強風等のサイト特性に対応させた低コストの設置方法として、センサは地表から1 m弱掘り下げた穴の底に設置している。設置期間中に記録した3成分波形例 (第8図) では、目的とするサイト付近からのAEではないが、異なる4観測点で同一の地震動が記録されており、観測システムの正常動作が確認できた。しかし、地表が農地として利用されている本サイトではバックグラウンドノイズレベルが高く、地表観測にはより厳しい環境であることもわかった。

5. まとめ

CO₂ 地中貯留において、能動的弾性波探査を補完するモニタリング手法を実現するために、その基本概念を構築し、米国SWPプロジェクトPhase IIIに参加して実証規模サイトでの検証を目指している。2012年秋~冬にテキサス州ファーンズワースに観測基点を設置し、重力、自然電位、AE等のベースライン測定を開始した。超伝導重力測定の本格運用は安定的に行えており、微弱重力変化抽出に向けた観測方法の基本構想が実現可能なことを確認することができた。今後は、全測定項目のベースライン測定を継続して地域特性の把握と観測システムの改善を行い、SWPプロジェクトの進捗に合わせて、当該地域でのCO₂ 圧入時のデータ取得に進んでいく予定である。

文献

- Alnes, H., Eiken, O. and Stenvold, T. (2008) Monitoring gas production and CO₂ injection at the Sleipner field using time-lapse gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA155-WA1.
- Ishido, T., Pritchett, J. W., Toshi, T., Nishi, Y. and Nakaniishi, S. (2013) Monitoring underground migration of sequestered CO₂ using self-potential methods. *Energy Procedia*, **37**, 4077-4084.
- 新妻弘明 (1997) AE・微小地震解析による地熱貯留層キャラクターゼーション. *資源と素材*, **113**, 301-307.
- Sorensen, R. P. (2005) A dynamic model for the Permian Panhandle and Hugoton fields, western Anadarko Basin. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, **89**, no. 7, 921-938.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA37-WA47.

SOMA Nobukazu, SUGIHARA Mituhiko, ISHIDO Tsuneo, NAWA Kazunari and NISHI Yuji (2014) Multi-geophysical monitoring technique for CO₂ geo-sequestration.

(受付: 2014年4月1日)