

# 高感度重力モニタリングのための 超伝導重力計の導入

杉原光彦<sup>1)</sup>・西 祐司<sup>1)</sup>・名和一成<sup>2)</sup>・宮川歩夢<sup>2)</sup>・石戸恒雄<sup>1)</sup>・相馬宣和<sup>3)</sup>

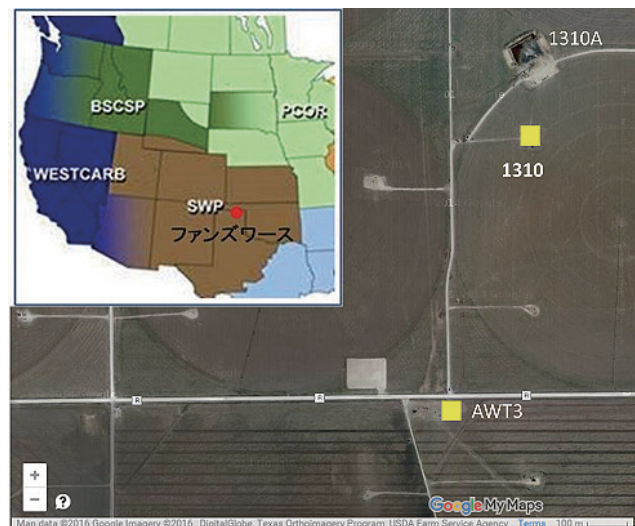
## 1. 緒言

超伝導重力計による CCS (二酸化炭素の回収と貯留) モニタリング技術開発は極めて研究要素が高く、国際的な成果発信が期待される。一方、本モニタリング技術は CCS だけでなく地震や火山等、さまざまな研究分野での活用が期待できるため、地質分野全体における本装置の活用方法ならびに研究計画を検討していく必要がある。以上の理由により、高感度重力モニタリングのための超伝導重力計の導入が認められ、2014年5月に納入された。導入にあたっては、(1) 本装置を活用した CCS からの研究展開についてロードマップを設定すること、(2) アウトプットについて定量的目標を設定すること、(3) 導入後は CCS に限定せず広い範囲での活用を目指すことという課題が示された。まずは CCS の現場に導入して成果を得た後で、広い範囲への活用を目指すこととした。導入から2年目を経過しようとしている今、これまでの経過について報告する。

## 2. 米国への搬入と計測開始

超伝導重力計 iGrav は 2014 年 5 月 30 日に米国テキサス州ファンズワース CCS テスト・サイト (第 1 図) に納品された。すでに現地では 2012 年 12 月から別の iGrav による重力連続測定を実施していた (相馬ほか, 2014 ; Sugihara *et al.*, 2014)。すでに連続観測中だった iGrav15 に隣接する基台に、納入された超伝導重力計を設置して並行測定を開始した。超伝導重力計は他の重力計に比べて桁違いの性能を有するために、その性能は超伝導重力計同士による比較測定でしか評価できないという側面がある。並行測定の記録によって、性能上の問題点が見出されたため 2014 年 7 月に機器を入れ替えることになった。その後も並行計測を継続し (第 2 図)、ドリフト特性を評価する一方で 2 台に共通するトレンドに加えて微小な日周変化成

分も見出された (名和ほか, 2014)。重力計測室は 2 台の超伝導重力計が稼働しても十分な環境性能を持つはずであったが、夏季の調査地は直射日光が強く、観測室の南側は空調効果が十分には効かないことがあると判断されたのでサーキュレータを設置して改善を試みた。この発見を契機に、機器上部の制御装置部分も温度コントロールする機能が付加されることになった。



第 1 図 テキサス州ファンズワース観測点の位置 (Google マップに加筆)。左上に米国内でのファンズワースの位置を示した (DOE/NETL (2010) に加筆)。



第 2 図 観測室内での SG-SG 並行測定。手前のサーキュレータは空調補助のために追加した。設置位置は第 1 図の AWT3。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

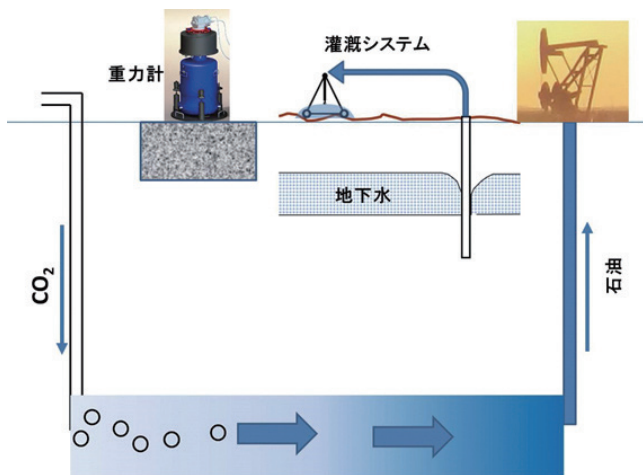
2) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

3) 産総研 再生可能エネルギー研究センター

キーワード：超伝導重力計、高感度重力モニタリング、苦小牧

### 3. 屋外計測の試み

重力の時間変化は様々な要因が重なって観測される。ファンズワースでは、圧入されたCO<sub>2</sub>の影響のほかに、石油生産、灌漑、降雨等の影響が重なって現れると考えられる（第3図）。異なる領域で生じる密度分布変化の影響を評価するには、2台の超伝導重力計の設置距離をかえて並行測定を行うことが効果的と考えられる（Kennedy *et al.*, 2014）ことから、iGrav17を約600 m離れた地点に移設して並行測定を行った（第4図）。計測期間は2か月弱であったが、特徴的な降雨応答・融雪応答の記録が得られた（杉原・西, 2015）。なお、この計測では屋外の観測点だったので簡易収納庫（エンクロージャ）を用いた。



第3図 ファンズワースでの重力変動模式図（杉原, 2015）。



第4図 テキサス州ファンズワースではエンクロージャを活用した屋外観測点での設置。広帯域地震計による並行測定も試みた。設置位置は第1図の1310。

### 4. 苫小牧での計測

苫小牧では2016年から圧入が予定されている。圧入開始前にベースライン調査を実施しておく必要からiGrav17による計測を2015年3月に開始した（第5図）。現地は海岸に近く、計測器設置環境としては非常に厳しい条件だが、ファンズワースでも試行したエンクロージャを活用して、適宜トラブル対応を行いつつ連続計測を維持している（池田ほか, 2016）。また海岸近傍に特有の信号解析評価もすすめている（名和ほか, 2016）。2016年秋頃までは今の体制で観測を継続して、別途用意される観測体制に引き継ぐ予定である。

### 5. 今後の展開

iGrav17は2016年度中にCCS現場から撤収して、他の調査地での適用を検討中である。地熱地帯に適用する可能性については活用のイメージを提起した（Sugihara *et al.*, 2015）が、地熱地帯以外での活用も検討中である。

世の中に重力計と呼ばれるものは数多くある。最も一般的なのは可搬型相対重力計で、ラコスト重力計やシントレクス重力計がよく使われる。可搬型相対重力計のセンサー部を組み込んで海底での計測に使用する海底重力計や孔内重力計も開発され、CCSの現場でも活用を検討され（杉原, 2011など）、実際に使われている（Jenkins *et al.*, 2015）。絶対重力計は相対重力計が持つ機械的ドリフトの欠点を解消し、重力の時間変化を把握するために使われている。可搬型相対重力計と絶対重力計と組み合わせて、ある調査領域に設定した重力観測網でスナップショット的な計測を繰り返し行うハイブリッド重力モニタリングは広く活用され



第5図 右の柵内が苫小牧の重力観測点。テキサス州ファンズワースと同じエンクロージャが見える。左後方に見えるのは二酸化炭素圧入井の掘削リグ。

る手法であるが、超伝導重力計による高感度重力連続観測とは相補的である。一方、各種の重力衛星によって広域の重力変化を把握できる（大久保，2004 など）。こうした各種の重力計測技術には一長一短があり、お互いの長所を生かして総合的に活用することが効果的である。重力衛星については公開されたデータを利用することになるが、それ以外は、重力計を取得・開発・借用して運用する必要があり、その際に費用対効果の検討が重要である。各種重力計の価格比較の公開情報は少ないが、最近では可搬型相対重力計の購入価格が増大傾向にあるのに対して超伝導重力計の価格は低下している。これによって超伝導重力計による並行測定が現実的になってきた。我々もすでに並行測定を試行したが、垂直的な並行測定や多点観測の可能性の検討など、超伝導重力計の活用にはまだ研究要素がある。苫小牧での計測経験から、日本の CCS 現場への適用を広げるためには、超伝導重力計による計測の場を坑内そして浅海に広げることが有効である（杉原ほか，2015）。

## 6. 結語

すでに、米国と苫小牧の調査地での計測によって、超伝導重力計の特性評価を行い、各種重力変化を検出し、計測上の課題も抽出している。その成果は順次、口頭発表と誌上発表を行ってきた。iGrav は近年導入例が多くなり、国内においても 2016 年に 2 台搬入が予定されているし、CCS モニタリングにおいても、別途、導入予定である。さらなる成果発信に努めたい。

なお実施にあたっては筑波大学研究基盤総合センターの池田 博 准教授に外来研究員としてご協力を得た。池田氏は低温工学の専門家で、南極昭和基地での超伝導重力計の設置に係った（池田ほか，2004；池田，2010）ほか、ほぼ全ての国内の超伝導重力観測にも貢献している。我々の超伝導重力計の導入についても重要な役割を担っていただいた（池田ほか，2016）。

## 謝 辞

本研究は、経済産業省からの委託研究「二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業（弾性波探査を補完する CO<sub>2</sub> 挙動評価技術の開発）」と関連して実施してきた。また、米国テストサイトにおける実証試験は、米国エネルギー省（DOE）国立エネルギー技術研究所（NETL）の予算（Award No. DE-FC26-05NT42591）により、SWP（Southwest Partnership on Carbon Sequestration）が実施

している。調査の実施には、米国 Chaparral Energy 社、ユタ大学、ニューメキシコ工科大学、日本 CCS 調査株式会社、苫小牧市、苫小牧港管理組合などの協力が不可欠であった。また調査実施にあたっては GWR 社の E. Brinton 氏から多大な助言を得た。記して謝意を表する。

## 文 献

- DOE/NETL (2010) 2010 Carbon sequestration Atlas of the United States and Canada – third Edition (Atlas III).
- 池田 博 (2010) 南極昭和基地での超伝導重力計による精密重力連続観測. 物理探査ニュース, No.7, 1–4.
- 池田 博・土井浩一郎・福田洋一・野口隆志・中嶋俊哉・飯村 憲・渋谷和雄 (2004) 南極における超伝導重力計の設置とその除震及び監視技術の開発. 低温工学, 39, 348–353.
- 池田 博・森 稜太・杉原光彦・名和一成・西 祐司 (2015) 野外観測対応超伝導重力計の設置. 2015 年度春季低温工学・超伝導学会.
- 池田 博・杉原光彦・名和一成・西 祐司 (2016) 第 4 世代超伝導重力計が日本に初登場, 苫小牧で計測開始. GSJ 地質ニュース, 5, 67–68.
- Jenkins, C., Chadwick, A. and Hovorka, S.D. (2015) The state of the art in monitoring and verification—Ten years on. *JGGC*, 40, 312–349.
- Kennedy J, Ferre PA, Abe M, and Güntner A. (2014) Direct measurement of subsurface mass change using the variable baseline gravity gradient method. *Geophysical Research Letters*, 41, Issue. 8, 2827–2834.
- 名和一成・杉原光彦・宮川歩夢・西 祐司 (2014) 米国テキサス州ファンズワースにおける 2 台の iGrav 型超伝導重力計の並行観測. 122 回測地学会.
- 名和一成・杉原光彦・池田 博 (2016) 世界でいちばん海に近い超伝導重力計で海面変動をみる. GSJ 地質ニュース, 5, 69–70.
- 大久保修平 (2004) 地球が丸いってほんとうですか?. 朝日新聞社, 東京, 279p
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO<sub>2</sub> 地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. GSJ 地質ニュース, 3, 137–142.
- 杉原光彦 (2011) 海底重力計見学記 —海底重力計による CO<sub>2</sub> 地中貯留モニタリングの可能性の検討—. 地

- 質ニュース, no. 679, 40-46.
- 杉原光彦 (2015) テキサス州ファンズワースでの重力計測の手記. GSJ 地質ニュース, 4, 251-258.
- 杉原光彦・西 祐司 (2015) テキサス州での超伝導重力計による連続観測と土壌水分変化 (続報). Proceedings of Soil Moisture Workshop 2015.
- Sugihara, M., Nawa, K., Soma, N., Ishido, T., Miyakawa, A. and Nishi, Y. (2014) Continuous gravity monitoring for CO<sub>2</sub> geo-sequestration (2) a case study at the Farnsworth CO<sub>2</sub>-EOR field. *Energy Procedia*, 63, 4404-4410.
- Sugihara, M., Nawa, K., Ishido, T., Soma, N. and Nishi, Y. (2015) Potentiality of continuous measurements using a small-sized superconducting gravimeter for geothermal reservoir monitoring. Proceedings, Geothermal Resources Council, 2015.
- 杉原光彦・池田 博・名和一成・石戸経士・西 祐司 (2015) 苫小牧 CO<sub>2</sub> 地中貯留サイトでのポータブル超伝導重力計システムによる観測. 日本測地学会第 124 回講演会予稿集.
- 
- SUGIHARA Mituhiko, NISHI Yuji, NAWA Kazunari, MIYAKAWA Ayumu, ISHIDO Tsuneo and SOMA Nobukazui (2016) Introduction of a superconducting gravimeter for high sensitivity gravity monitoring.
- 

(受付: 2016 年 2 月 5 日)