

地質環境回復現象把握に対する地表面変位計測の有効性に関する検討

(国研) 日本原子力研究開発機構 正会員 ○松井 裕哉
(株) 地層科学研究所 正会員 佐ノ木 哲

1. 背景・目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、処分場は操業終了後に完全に埋め戻されるが、操業期間によっては建設・操業の間に変化した地質環境の初期状態への回復に長期間を要することが想定され、地質環境が初期状態まで回復する間の状況を正確に把握することは、処分システムの安全性を示す上で重要と考えられる。本報では、近年著しく進歩した地表面の形状変化計測技術を用い、地下構造物の埋め戻しの際に生じた地表面変位の評価を行い、その有効性を検討した結果を報告する。

2. 地表面変位の計測手法

地表面変位を計測する手法は種々存在するが、本検討では、同じ精度で長期間にわたる計測に供することができ、近年著しく発達している合成開口レーダーの時系列解析(時系列解析)を適用した。通常の合成開口レーダーによる干渉解析では、2期間(2枚)の画像データの位相差を計算することで干渉画像を作成し2期間の衛星からの距離の差分を求めるが、干渉画像には、電離層・植生・大気の影響、DEMの誤差、衛星の軌道誤差といったものが含まれる。SAR(Synthetic Aperture Radar)時系列解析(<https://synspective.com/jp/solutions/land-displacement/>)は、多数枚のSAR画像を統計的に処理し、干渉SAR画像に含まれるこれらの誤差を低減させ、検出精度を向上させる解析手法である。SAR時系列解析にも種類があるが、今回はPSI(Persistent Scatterer Interferometry)による時系列解析を実施した¹⁾。PSIは、長期間にわたりコヒーレンスが低下せず、安定した信号を反射する錯乱体(以下PS点と称す)を用いることで、軌道誤差および大気遅延の影響を小さくすると同時に、位相アンラップを回避することができる。主な合成開口レーダーの一覧を表1に示す。今回の検討では距離方向分解能と回帰日数および画像の入手性からSentinel-1の画像を用いることとした。

3. 計測対象および計測結果

本検討は、日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所の埋め戻し(図1)を対象とした。これは、本施設が地下500mまで掘削された規模の大きい施設でありそれを地表まで完全に埋め戻していること、研究所内からの湧水を含む日放流量等に関するデータが存在していたこと、ならびに短期間で埋め戻しが行われたため、それによる地質環境の回復もまた急激に生じ変化を検知しやすいこと等の理由による。解析期間は、2020年8月12日～2021年8月31日までとし、計32枚の衛星画像を用いたPSI解析を実施した。解析範囲は瑞浪超深地層研究所を中心に東西10km×南北10kmの領域とした。

図2に本解析で抽出したPS点の分布を示すが、解析範囲内で合計60051点が、研究所周辺では71点のPS点を得られた。

表1 合成開口レーダー一覧(赤枠:本解析に用いた衛星)

衛星名	バンド	波長	精度	植生透過性	解像度	観測幅	回帰日数	運用開始	運用停止
ERS-1	C	5.7cm	±4mm	△	30m	80km	35	1991	2000
JERS-1	L	23.5cm	±15mm	○	18m	70km	44	1992	1998
RADARSAT-1	C	5.7cm	±4mm	△	25m	100km	24	1995	2013
ERS-2	C	5.7cm	±4mm	△	30m	80km	35	1995	2011
ENVISAT	C	5.7cm	±4mm	△	30m	100km	35	2002	2011
ALOS/PALSAR	L	23.5cm	±15mm	○	10m	75km	46	2006	2011
RADARSAT-2	C	5.7cm	±4mm	△	25m	100km	24	2007	運用中
TeamSAR-X	X	3.1cm	±2mm	×	3m	50km	11	2007	運用中
TanDEM-X	X	3.1cm	±2mm	×	3m	50km	11	2010	運用中
COSMO-SkyMed-1	X	3.1cm	±2mm	×	3m	40km	4	2007	運用中
COSMO-SkyMed-2	X	3.1cm	±2mm	×	3m	40km	4	2007	運用中
COSMO-SkyMed-3	X	3.1cm	±2mm	×	3m	40km	4	2008	運用中
COSMO-SkyMed-4	X	3.1cm	±2mm	×	3m	40km	4	2010	運用中
ALOS-2/PALSAR-2	L	23.5cm	±15mm	○	3m	50km	14	2014	運用中
Sentinel-1A	C	5.6cm	±4mm	△	20m	250km	12	2014	運用中
Sentinel-1B	C	5.6cm	±4mm	△	20m	250km	12	2016	運用中
ASAR-2	X	3.1cm	±2mm	×	2m	12km	12	2018	運用中

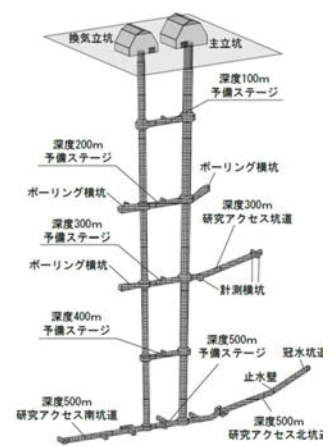


図1 研究所埋め戻し状況

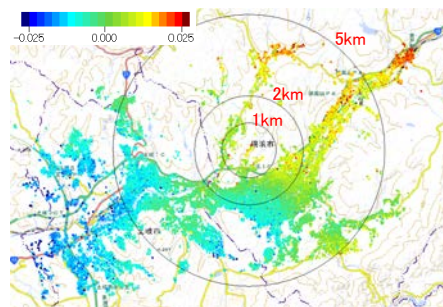
a) 解析対象領域内 b) 瑞浪超深地層研究所近傍
図2 PS点の分布(図中、赤点)

図3 本解析で得られた解析対象領域の変位分布(寒色:沈降、暖色:隆起)



図4 図3とほぼ同期間における電子基準点鉛直変位ベクトル

キーワード 地表面変位計測, 合成開口レーダー, 地質環境回復

連絡先 〒098-3224 北海道幌延町北進 432-2 日本原子力研究開発機構 幌延超深地層研究センター TEL:01632-5-2022

図3から、領域全体としては北東方向から南西方向に向かって、隆起から沈下へと推移しており、研究所周辺は領域全体から見ると鉛直変位の少ない領域に当たる。また、本解析結果は、図4の測地学的に得られている鉛直変位ベクトル分布²⁾の傾向と矛盾しない。

図5は、瑞浪超深地層研究所の埋め戻しの進行³⁾と日放流量⁴⁾の変化、図6は埋め戻し期間中の放流量の変化と本解析で得られた研究所近傍のPS点の鉛直変位の変化を示している。図5より、放流量は深度400m～300mの間の埋め戻しまでは緩やかな減少傾向を示し、深度300m～200mの間と深度200～100mの立坑部埋め戻しで急激に減少したことがわかる。これらは、既往の研究⁵⁾で把握されている研究所近傍の岩体の水理地質的特徴（深度180m程度から基盤花崗岩体境界までの堆積岩部基底礫岩層や深度200～300mの間の花崗岩体部上部割れ目帯といった高透水性ゾーンの存在）と合致している。

これを踏まえ、図6の放流量と鉛直変位分布の経時変化をみると、200mより浅い埋め戻しが始まった頃から地表面で上向きのわずかな鉛直変位が継続的に生じおり、埋め戻し完了後数か月のちから鉛直変位増加量が大きくなってきている。これらは以下のように解釈される。すなわち、最初の鉛直変位の継続的な増加は、深度200～100m間の埋め戻し時期から始まっているため、深度200m付近に分布する堆積岩層基底礫層部分の水位回復により、その下部の基盤花崗岩部を含む鉛直変位が観測されてきたものの、堆積岩部基底礫岩層が完全に地下水で満たされていない状況では、その部分で基盤花崗岩部の鉛直変位が吸収され、結果的にわずかな鉛直変位の増加にとどまっていた。一方、埋め戻し完了後数か月のちには、基底礫層部が完全に地下水で満たされ、水圧上昇による基盤花崗岩部と堆積岩部の両方の鉛直変位が現れてきている。なお、図6のNo.1は他の点と鉛直変位の時間経過の傾向が異なるように見えるが、これは主立坑に交差していた断層の影響で、特に花崗岩体中で断層南側と北側で水理的なインパクトの出方が異なる可能性⁶⁾が考えられる。

なお、上記の解釈の妥当性は今後水一応力連成解析等の数値解析で検証することが望ましい。

4. 地質環境回復現象把握に対する地表面変位計測の有効性について

今回適用した合成開口レーダーを含む地表面変位計測は、単純かつ長期にわたり同じ精度での計測が可能である利点に加え、上述の通り、詳細な地下深部までの情報と組み合わせることで、狭い範囲から非常に広範囲までの地質環境回復状況を把握できる可能性があると考えている。将来的には、幌延深地層研究センターでも適用し本手法の適用性を確認することで、実際の地層処分事業における、地層処分システムの安全性をサポートするデータを提供する一連の手法として提示できると考えられる。

参考文献

- 1) 小林 他(2018)：干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発、国土地理院時報、No.130、p.123～p.133.
- 2) <https://www.gsi.go.jp/kanshi/caution.html> (参照日 2021.10)
- 3) https://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/url_iinkai/28-3.pdf (参照日 2021.10)
- 4) https://www.jaea.go.jp/04/tono/an_miuwater/day/5haisui.html (参照日 2021.10)
- 5) 野原 他(2015)：超深地層研究所計画における研究坑道の掘削を伴う研究段階(第2段階)研究成果報告書、JAEA-Research 2015-026、p.15～p.41.

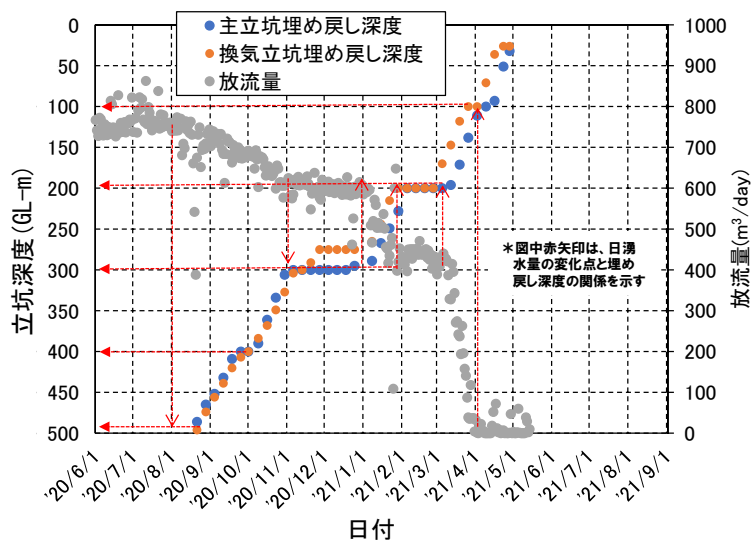


図5 日放流量と埋め戻し進捗の関係

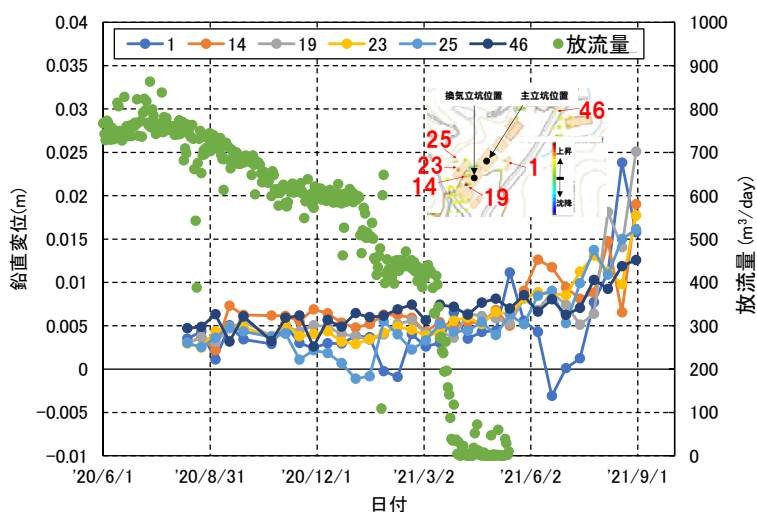


図6 日放流量と鉛直変位の関係