

# 地下深部岩盤の歪変化のメカニズムに関する研究

堀内 泰治<sup>1\*</sup>・平野 享<sup>2</sup>・池田 幸喜<sup>1</sup>・松井 裕哉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人 日本原子力研究開発機構（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

<sup>2</sup>西松建設株式会社 技術研究所土木技術課（〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10）

\*E-mail: horiuchi.yasuharu@jaea.go.jp

日本原子力研究開発機構は、瑞浪超深地層研究所立坑中心の深度200m付近から掘削したパイロットボーリング孔を利用し、深度500m地点に高精度歪計を設置し、200mからの研究坑道掘削中に取得した深度500m地点での岩盤の歪データを用い、地球潮汐といった定常的な外力変動や地震および発破などの瞬間的な外力変動による岩盤の変形状況を分析した。その結果、評価できるデータの取得期間は短かったが、今回使用した高精度歪計は、地球潮汐や地震時のみならず鉛直深さで300m程度離れた場所の発破の微小変形も観測しえたことから、掘削面前方の岩盤の剛性の違いなどの岩盤状況を相当離れた位置から把握できる可能性が示された。

**Key Words :** strain variation, earth tide, the intelligent type strain meter, JAEA, MIU

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構が進める超深地層研究所計画では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術基盤の整備を行う研究施設の建設工事を進めており、2本の立坑（主立坑および換気立坑）と複数の横坑からなる研究坑道を掘削している。大深度立坑を掘削する際には、掘削面前方の岩盤の歪変化を把握することで、より安全かつ適切に立坑掘削を進めることが可能となることが期待される。例えば、立坑切羽前方の歪変化の観測により、立坑掘削において安全上最も重要となる突発湧水や山はねといった突発事象に対する施工対策を講じるための情報を得ることが可能になると考えられる。

そこで、パイロットボーリング調査<sup>1)</sup>において掘削した06MI02号孔および06MI03号孔（図-1）に高精度歪計を設置し、取得された岩盤歪のデータについて、立坑の掘削や立坑からの揚水に伴う地下水の異常変動等のイベントとの相関を理論的あるいは数値解析的に検討することにより、歪計測の前方探査技術としての有効性を評価するとともに、地下深部の岩盤における歪変化のメカニズム解明のための検討を実施した<sup>2)</sup>。本稿では、2本の立坑のうち、主に主立坑の06MI02号孔に設置した高精度歪計による計測結果を一例として示しつつ、換気立坑における計測結果も加味した検討結果を報告する。

## 2. 地質概要

研究所用地およびその周辺は、後期白亜紀の基盤花崗岩（土岐花崗岩）を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合に覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合に覆っている。

高精度歪計を設置した深度500m地点の岩盤は、換気立坑では健全な土岐花崗岩であるが、主立坑では掘削断面を縦断するように分布する断層に伴う強い変質領域で構成されており、40mしか離隔のない換気立坑と主立坑でも地質的に違いがみられる。

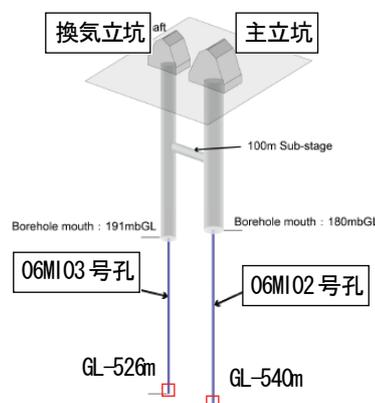


図-1 パイロットボーリング孔の配置

### 3. 高精度歪計の概要

一般的な歪計測での分解能は $10^6$ オーダーである。しかし、変形性の小さい花崗岩に対し、時間依存性挙動や掘削影響評価のための観測においてこの分解能は十分満足なものとはいえないと考えられる。また、潮汐変動や地震等の影響を把握する場合にも、 $10^6$ オーダーを超えるさらに高分解能な歪計が必要である。そこで、本研究では石井式歪計<sup>3)</sup>をベースとした、 $10^9$ オーダーの分解能を持ち、水平6成分、垂直1成分の歪を計測できる高精度歪計を製作した。高精度歪計の設置深度は、パイロットボーリング孔の孔底付近の岩盤状況を考慮し、主立坑はGL-540m、換気立坑ではGL-526mとした。

### 4. 計測結果

#### (1) 計測結果の整理方法

歪計は、機械的な微小な寸法の変化を電気信号として検出するセンサで、計測結果は電圧値として与えられる。この電圧値を各歪計の持つ出力特性をパラメータとして、歪値に換算した。計測で使用した計器には7つのチャンネル(CH)の歪計が備わっており、各CHが計測している方向は表-1に示すとおりである。また、換算した歪値は、引張り歪を正、圧縮歪を負として整理した。岩盤の歪変化挙動と地下水位変動との比較検討においては、瑞浪超深地層研究所用地内および研究所周辺の地下水長期

モニタリング孔(図-2)で観測されたデータを用いた。なお、07MI08号孔および07MI09号孔は立坑内に掘削された観測孔、それ以外は地表から掘削された観測孔である。

#### (2) 計測結果

主立坑における計測は2007年10月に開始し、2008年10月までの約1年間のデータを取得した。計測値は、図-3に示すように、初期の短期的なドリフトが収束した後、2008年2月7日まで連続的で変化が小さい(以後、ここを安定期と呼ぶ)。しかしそれ以降、歪は最初に不連続で大きく変動した後、歪計の不具合により欠測となり、それが回復した後は、安定期に認められなかった複雑な変化を示すようになった(以後、不安定期と呼ぶ)。このうち、H+90(CH2)とH+45(CH4)は変化量が大きくレンジオーバーを起こしている。不安定期を細かくみると、立坑切羽で発破を行っている期間の変化が特に著しく、一方、発破の行われなかった2008年3月頃などでは、安定期に比べれば変化量が多いが、小さく滑らかな変化を示している。

これ以降の計測結果の検討にあたっては、安定期における計測データ(2007年10月13日~2008年2月7日)を使用している。

一方、換気立坑では、歪計の不具合により評価可能なデータを取得できた期間は約1ヵ月間(2008年1月9日~2008年2月6日)であった。

表-1 各CHの計測方向

チャンネル	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
計測方向	水平0度	水平90度	水平135度	水平45度	垂直方向	水平0度	水平90度
表記方法	H+0	H+90	H+135	H+45	V	H+0	H+90

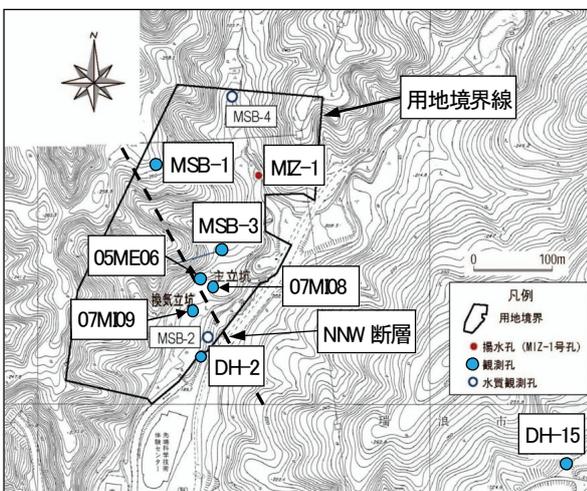


図-2 研究所用地内および研究所周辺の観測孔位置

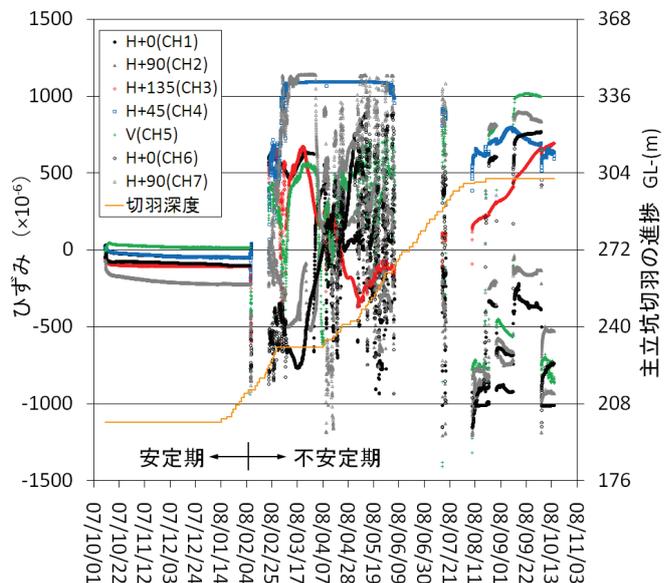


図-3 主立坑の高精度歪計による計測結果

a) 安定期における計測結果

主立坑の安定期に計測された歪は、全CHで経時的に圧縮歪が増加し、特定の期間で同じような振幅変化がみられる。特に、H+45(CH4)およびV(CH5)では終始振幅しながらの変化がみられる(図-4)。なお、ここでは2007年10月13日12時の値を初期値とした相対変位をプロットし、歪の経時変化を示している。

一方、換気立坑では、水平歪が経時的な引張り増加変化を示し、鉛直歪が圧縮増加変化を示した。

b) 研究坑道からの揚水の影響による歪変化

図-4に示した主立坑の安定期における歪変化において、初期のドリフトが収束し、歪が線形的な増加を開始する2007年10月29日頃からの変化をみると、2007年11月14日頃までの期間で、日に $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 程度の振幅変化が確認できる。特に、10月31日から11月10日までの10日間の水平歪変化を詳しくみると、朝8時頃から変位増加を開始し、その増加分の変位が午後8時頃から減少し始めるという変化を繰り返しており、この期間の水平歪の変化挙動は人為的な影響を受けている可能性が考えられる。

歪を生じさせる外力のひとつに地下水位の変動があり、地下水位が人為的に変動する要因としては、研究坑道からの揚水の影響が挙げられる。研究坑道からの揚水量は、日々 $500\text{m}^3$ 以上あり、特に水平歪に振幅変化がみられた期間には、日によって $800\text{m}^3$ 以上の揚水があった。

研究坑道からの揚水量変化と、研究所用地内の地下水位長期モニタリング孔のひとつであるMSB-3号孔の水頭変化とを比較すると、図-5に示すように相関がみられ、この水頭変化は揚水の影響を受けた変化であるといえる。特に、 $800\text{m}^3$ を超える揚水量がある日には、水頭の変動が顕著であることがわかる。次に、水平歪変化とMSB-3号孔の水頭変化とを比較すると、図-6~図-7に示すよう

に良い相関がみられることから、この期間の水平歪変化は、揚水により変動した地下水位の影響を受けた挙動を示しているといえる。各方位の水平歪と水頭の関係については、H+0(CH1,CH6)およびH+135(CH3)では水頭低下に伴い引張り歪が増加し、H+90(CH2,CH7)およびH+45(CH4)では水頭低下に伴い圧縮歪が増加している。

H+45(CH4)については、2007年11月26日以降においても、 $5 \times 10^{-6}$ 程度の振幅変化が続いているが、揚水の影響による地下水位変動との相関はみられなかった。また、鉛直歪V(CH5)については、安定期においてもMSB-3号孔の水頭変動との相関は確認できなかった。

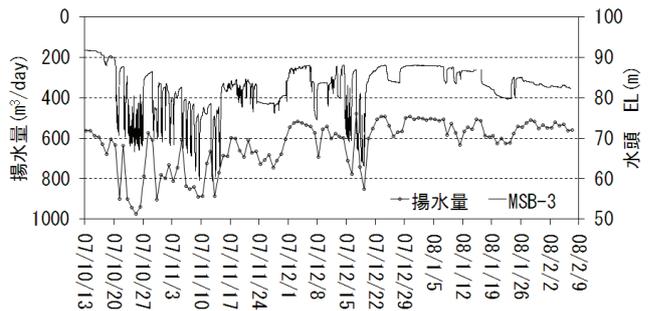


図-5 揚水量変化と MSB-3 号孔の水頭変化

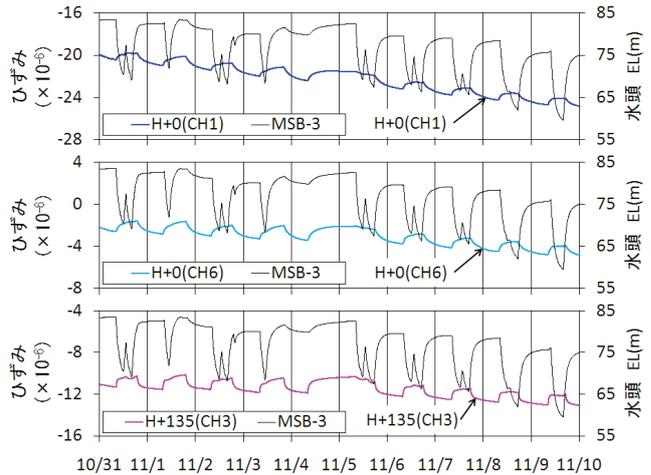


図-6 歪変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (H+0, H+135)

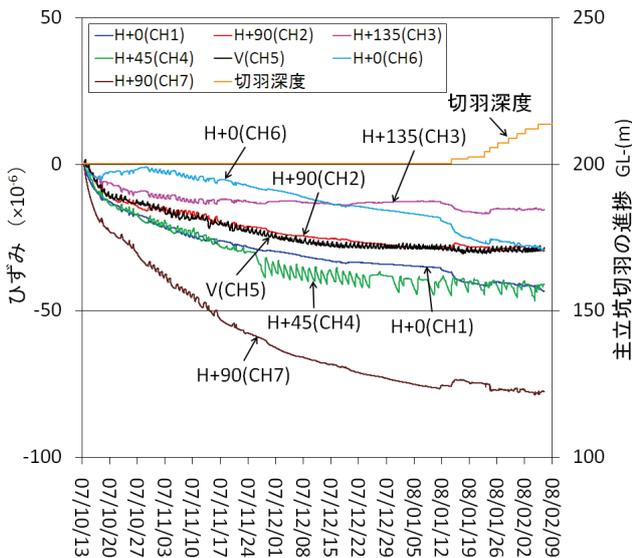


図-4 安定期における高精度歪計の計測結果

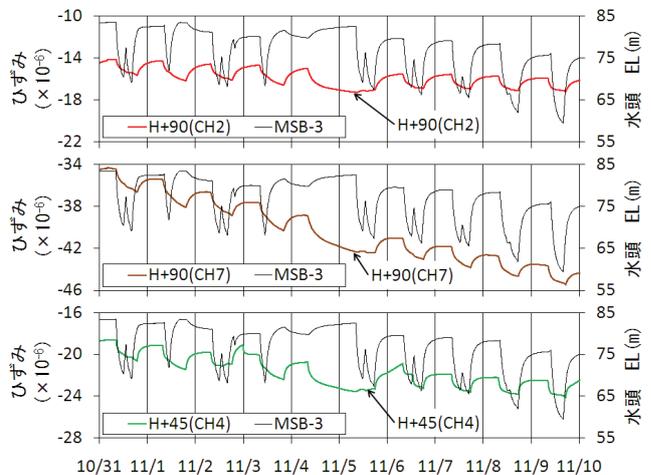


図-7 歪変化と MSB-3 号孔の水頭変化 (H+90, H+45)

なお、換気立坑の安定期（2008年1月9日～2008年2月6日）においては、歪変化と揚水の影響によるMSB-3号孔の水頭変化とに関連性はみられなかった。これは、研究坑道からの揚水量が600m<sup>3</sup>程度しかなかったためと考えられる。

### c) 潮汐力の影響による歪変化

潮汐力は1サイクル約12.4時間で変動している。歪は、その潮汐力が岩盤のマトリクスに直接働いて変化するものと、移動可能な岩盤の間隙水を動かして地下水水位が変動したことによるものが考えられる。そこで、名古屋港の海面潮位と同調がみられる地下水長期モニタリング孔（DH-15号孔）の水頭変化と歪変化とを比較し、潮汐力の影響による歪変化挙動を検討した。なお、ここでは歪変化に振幅がみられた期間および発破作業の再開後を除いた、大きな歪の変動がみられない期間（2007年12月20日～2008年1月10日）の歪変化について比較を行った。ただし、前述したように主立坑の歪は経時的に圧縮歪の増加を続けており、そのままでは水頭変化と微小な歪変化との比較は難しいため、この増加のトレンドを除去した後に歪変化とDH-15号孔の水頭変化とを比較した。

その結果、図-8～図-9に示すように、H+0、H+135、H+90で潮汐変動と同調した歪変化が確認できた。歪変

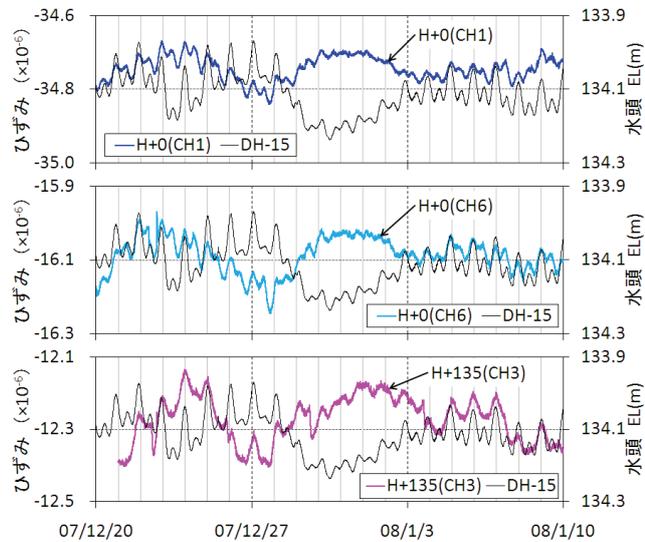


図-8 歪変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+0, H+135)

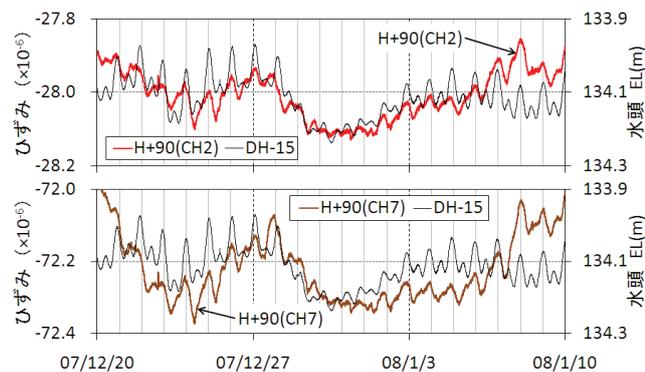


図-9 歪変化と DH-15 号孔の水頭変化 (H+90)

化と潮位変化との関係は、潮位低下時に引張り歪の増加、潮位上昇時に圧縮歪の増加であり、歪の変動幅は最大で  $0.1 \times 10^6$  程度であった。潮位の変動幅と歪の変動幅には日によってバラつきがあり、規則性はみられない。なお、H+45(CH4)は、日に  $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$  程度と大きく変動しており、潮位変化と明確な同調は確認できなかった。また、鉛直歪V(CH5)は、振幅しながら圧縮歪が増加してはいるが、DH-15号孔の水頭変化と比較すると位相に同調はみられず、波形も大きく違った形を示しており、潮汐変動との同調は確認できなかった。

なお、換気立坑においても同様の傾向がみられたが、潮汐の影響による歪の変動幅は最大でも  $0.05 \times 10^6$  程度であり、主立坑側の歪の変動幅と比較すると1オーダー小さい値であった。

### d) 発破の影響による歪変化

主立坑では、2008年1月14日から発破作業が再開され、主立坑の安定期においては8度の発破が行われた。例えば、2008年1月24日の発破前後の歪変化を図-10（経過時間0が発破時刻、発破5時間前の計測値からの相対変位をプロット）に示すが、ほとんどの発破においてH+0とH+135、H+90とH+45がそれぞれ発破後に同じような変化挙動を示した。また、発破直後には、 $0.1 \times 10^6 \sim 0.8 \times 10^6$  程度の歪変化が生じるが、発破後約1～3時間で元のトレンドに戻るという変化を示した。鉛直歪V(CH5)の発破の影響による変化は水平歪に比べ小さく、発破直後に生じた変化は最大でも  $0.1 \times 10^6$  程度であり、発破後約40分で元のトレンドに戻るという変化を示した。

換気立坑側で計測された、上述の主立坑の発破の影響による水平歪変化（H+135、H+45）は、図-11に示すように、主立坑側で計測された変化と比較すると1オーダー

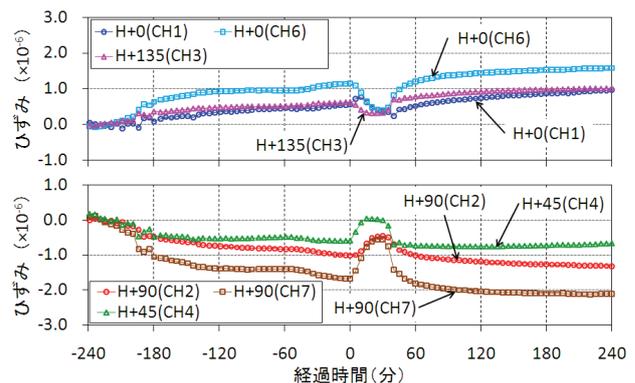


図-10 発破の影響による主立坑の水平歪変化

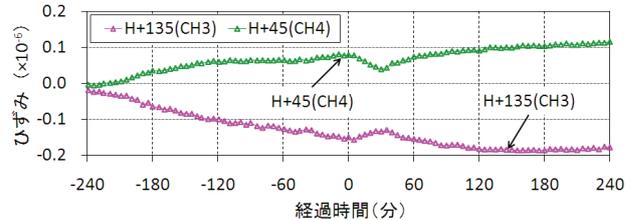


図-11 発破の影響による換気立坑の水平歪変化

程度小さく、発破後に緩やかな変化を示した。H+0、H+90および鉛直歪については、発破の影響による明確な変化はみられなかった。なお、換気立坑では、計測期間中に発破作業は行われていない。

#### e) 地震の影響による歪変化

主立坑の安定期において、岐阜県内で感知した震度1以上の地震は18回あった。そのうち、2008年1月18日に発生した震度1の地震（震源地：岐阜県飛騨地方、M：2.2）において、地震後に水平歪の変化がみられた。この変化は、地震発生時刻における発破作業や研究坑道からの揚水量に大きな変化がないことから、地震の影響によるものと考えられる。図-12（経過時間0が地震発生時刻、地震発生5時間前の計測値からの相対変位をプロット）に示すように、H+0では、地震前にやや圧縮歪の増加傾向にあったが、地震後約20分間で $0.08 \times 10^{-6}$ 程度の歪が生じ、その後の約3時間は引張り歪の増加が続いた。H+90では、地震後約15分間で $0.15 \times 10^{-6}$ 程度の歪が生じ、その後は圧縮歪が増加する。H+135は地震前に引張り歪の微増傾向にあり、地震直後に $0.05 \times 10^{-6}$ 程度の歪が生じている。一方、H+45(CH4)は、他のCHより約1オーダー大きく歪が変動し、圧縮歪の増加傾向のなか、地震直後に $0.1 \times 10^{-6}$ 程度の歪が生じている。なお、鉛直歪V(CH5)においては、地震の影響による歪変化はみられなかった。

換気立坑では、一部の地震でH+90(CH2,CH7)にのみ、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.03 \times 10^{-6}$ 程度の変化がみられたが、いずれも地震発生後10分で元のトレンドに戻る変化であった。

#### f) 最大・最小主歪とその方向

高精度歪計で計測された水平方向の歪計測値を用い、最大・最小主歪とそれらの方向を算出した。なお、ここでは図-4に示した計測結果のうち、H+90(CH2)と比べ非常に大きな変化を示すH+90(CH7)と、振幅変化が大きいH+45(CH4)を除いたデータを用いて算出した結果を示す。

算出した最大主歪および最小主歪は、図-13に示すように、経時的に圧縮歪の増加傾向にあり、安定期における累積での歪は、最大主歪が約 $75.3 \times 10^{-6}$ 、最小主歪が約 $142 \times 10^{-6}$ である。最大主歪の方向は、計測開始時に磁北から時計回りで約15度を示したのち、ドリフトとともに時計回りに増加し、安定期の最後には磁北から時計回りで約20度の値（N20E）を示している。なお、図-13における主歪の方向の0は磁北を意味し、磁北から時計回りの角度を正としている。

図-10で示した発破において変化した主歪は、発破後約30分間で最大主歪が約 $1.0 \times 10^{-6}$ の引張り歪の増加、最小主歪が約 $0.5 \times 10^{-6}$ の引張り歪の増加を示し、その後の約30分で元のトレンドに戻るという変化を示した。最大主歪の方向は、発破後約0.5度変化したのち、約1時間で元のトレンドに戻っている（図-14）。地震の影響による主歪の変化は $0.1 \times 10^{-6}$ 以下と小さく、方向の変化も

0.05度程度であった。

一方、換気立坑側の最大・最小主歪は、経時的に増加傾向にある引張り歪であり、最大主歪が約 $12.8 \times 10^{-6}$ 、最小主歪が約 $7.1 \times 10^{-6}$ であった。最大主歪の方向はN25Wを示した。地震や主立坑の発破の影響による主歪の変化は、主立坑でみられたような明確なものはなく、最大でも $0.02 \times 10^{-6}$ 程度の変化であった。

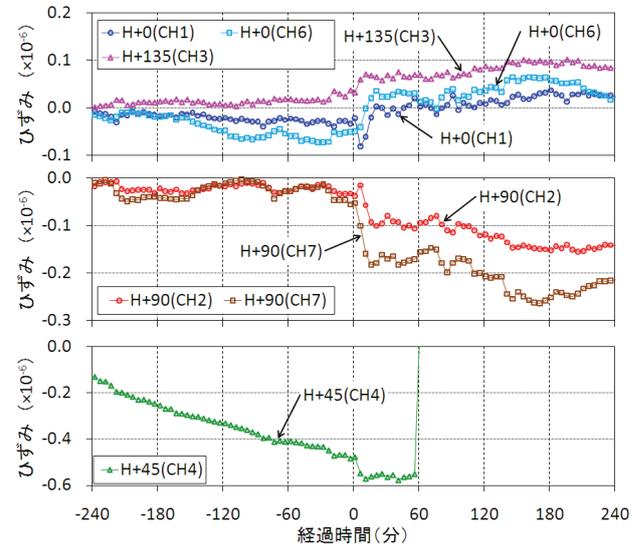


図-12 地震の影響による水平歪変化

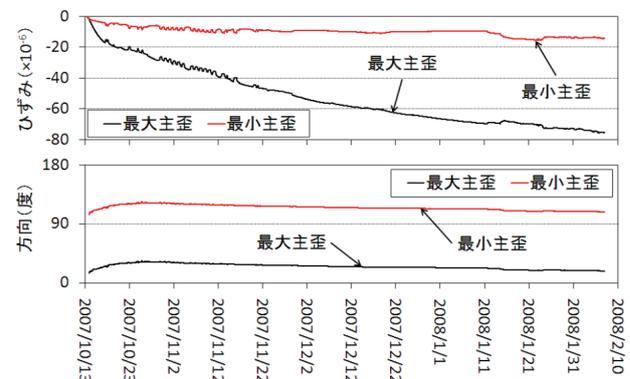


図-13 主立坑側の最大・最小主歪とその方向

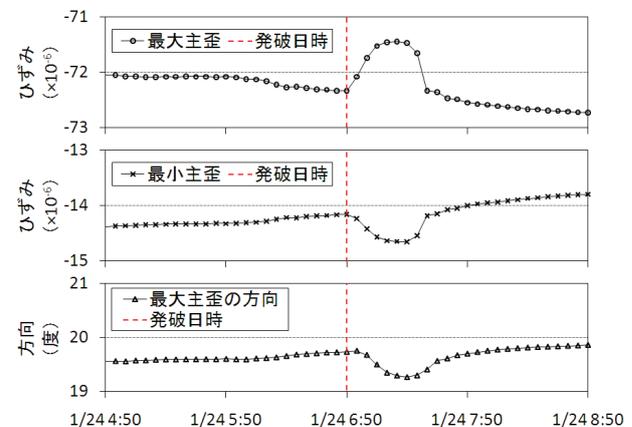


図-14 発破後の最大・最小主歪とその方向

## 5. まとめ

本計測においては、評価できるデータを取得できた期間は短いものの、その間のデータ分析などで重要な知見がいくつか得られた。本章ではまとめとして、それらについて、研究の目的である以下の観点から考察を述べる。

### (1) 地下深部岩盤における歪変化のメカニズムについて

岩盤の変形を生じさせる外力となっているのは、地球潮汐や揚水などによる地下水位の変動や地震、および発破による応力解放と考えられる。

潮汐変動により、主立坑側では換気立坑側の10倍程度の歪変化が生じているが、この差はそのまま岩盤の剛性の差としてとらえることが可能であり、深度500m地点でも主立坑の岩盤の弾性係数は換気立坑側の1/10程度しかないことが見積られる。これは、現在把握されている主立坑の脆弱部は、深度500m地点まで延びていることを示唆するものと考えられる。

岩盤の変形として、時間経過に伴い変形が増大する状況は両立坑で同じであるが、主立坑側では全方向の歪が圧縮方向に増大するのに対し、換気立坑側では鉛直歪以外は引張り方向への増大であった。これは、地質の違いとそれに伴う研究坑道掘削の地下水流動への影響度の違いによって生じていると考えられる。具体的には、主立坑およびその周辺にほぼ鉛直方向に延びる断層やそれに伴う強い変質領域の低透水性ゾーンにより、換気立坑などで実施している坑道掘削やボーリング作業によって生じる地下水の排水影響は主立坑側まで及ばず、換気立坑が存在する領域の圧力低下の分だけ応力解放が生じ、結果として換気立坑側では引張側の変形モードとなった。一方、主立坑側では断面およびその周辺は脆弱部であるため、水圧が保持されている断層北東部からの圧力が集中して作用し、圧縮変形が卓越するといった解釈が可能である。

### (2) 前方探査技術としての有効性

今回使用した高精度歪計は、立坑を掘削しながらの連続計測が可能であり、鉛直深さで300m程度離れた場所の発破による微小変形を観測している。従来、土木・資源工学で使用されてきている計測装置は、通常測定位置からトンネルなどの掘削面が1坑道径程度近づいた所から有意な変形が計測できるような精度であり、その意味では高精度歪計を用いた今回の計測や評価により掘削面前方の岩盤状況（例えば岩盤の剛性の違いなど）を相当離れた位置（数100m程度の離隔）から把握できる可能性が示された。

一方で、歪計の不具合により、立坑掘削再開後にデータの取得が極めて困難な状況となった。その主たる要因は、掘削面内での計測であったため、データ回収のためのFRPロッドやケーブルを発破により切り飛ばしながら計測せざるをえなかったことによると考えられる。今後このような計測を実施する場合には、歪計の掘削面外への設置や、新たなデータ収録方法の開発が必要と考えられる。

### 参考文献

- 1) 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野 崇, 大山卓也: 瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-098, 2008.
- 2) 堀内泰治, 平野 享, 池田幸喜, 松井裕哉: 地下深部岩盤の歪変化のメカニズムに関する研究, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2010-017, 2010.
- 3) 石井 紘, 松本滋夫, 平田安廣, 山内常生, 高橋辰利, 鈴木善吉, 渡辺 茂, 若杉忠雄, 加藤照之, 中尾 茂: 新しい小型多成分ボアホール歪計の開発, 地球惑星科学関連学会 1992 年合同大会予稿集, C22-03, 1992.

## STUDY ON MECHANISMS OF STRAIN VARIATION AT GREAT DEPTHS

Yasuharu HORIUCHI, Toru HIRANO, Koki IKEDA and Hiroya MATSUI

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) installed the intelligent type strain meters, at G.L-500m depth in pilot boreholes drilled from the 200m level in the Ventilation and Main shafts of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU). Strain variations due to several events including the excavation itself were monitored and analyzed. Monitoring results indicate that the intelligent type strain meter is able to measure very small fluctuations and detect rock deformation from blasting with 300m vertical separation from the measurement section. The strain meter can detect conditions in the rock mass such as differences in deformability.