

花崗岩地域における大深度長期間隙水圧モニタリング

LONG-TERM MONITORING OF PORE PRESSURE IN DEEP BOREHOLE AROUND GRANITE SITE

升元 一彦*, 向井 圭**, 竹内 真司*

Kazuhiko MASUMOTO, Kei MUKAI and Shinji TAKEUCHI

Long-term monitoring of pore pressure in deep underground is important for quality assurance at the construction of underground facilities, baseline monitoring before construction and environment monitoring during construction. Tono Geoscience Center of Japan Nuclear Cycle Development Institute has been conducting the long-term monitoring of pore pressure using 1,000m boreholes drilled in granite. From the results of these monitoring, it could be demonstrated to estimate the connectivity of high-permeable zone from the hydraulic response during borehole drilling, to estimate the change of pore pressure distribution due to installation of packer system at the fault as a function of hydraulic barrier and to separate the baseline fluctuation from the monitoring data including atmospheric loading and earth tides.

Key Words: monitoring, pore pressure, ground water, granite

1. はじめに

地下施設周辺における地下水の間隙水圧モニタリングは、地下施設がある基準を満たした品質で施工されているかの確認、建設前の間隙水圧の現状（ベースライン）の把握、建設中の間隙水圧への影響の評価、周辺環境への影響等について社会的に説明が必要になった場合のデータ取得、等の観点で非常に重要である¹⁾。核燃料サイクル開発機構の東濃地科学センターでは、深部地質環境特性の把握を目的として、広域地下水流動研究²⁾および超深地層研究所計画³⁾が進められている。この一環として超深地層研究所用地を中心とした数 km 四方の領域の中に、主に花崗岩に掘削した 400m~1,000m の試錐孔にモニタリング装置を設置し、1999 年以降、間隙水圧の連続モニタリングを行っている。このモニタリングの目的は、(1)この地域で構築している水理地質構造モデルの妥当性の確認、(2)間隙水圧のベースラインの把握、(3)地下施設建設が周辺の間隙水圧へ与える影響の把握、(4)モニタリング装置の長期適用性の実証、等である。

本報では、これまで実施している大深度長期間隙水圧モニタリングの観測網を示し、これによって得られた結果を用いて、水理地質構造モデルの評価、試錐孔の掘削が間隙水圧へ与える影響の評価、間隙水圧のベースラインの把握を行った事例を示す。

2. 間隙水圧モニタリング方法

(1) モニタリング観測レイアウト

間隙水圧モニタリングは、研究所用地を中心とした数 km 四方の領域内の後期白亜系土岐花崗岩体を対象として行っている（図-1）。概略の地質構造としては、この花崗岩体を新第三系の堆積岩が不整合で覆っている。モニタリングは、図-1 に示す 10 本の試錐孔において実施されている。この内、6 本の試錐孔が研究所用地の西方の正馬

* 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

** 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

様用地に位置しており、主に断層等の不連続構造を含む水理地質構造モデルの構築・更新に必要なデータを取得することを目的にモニタリングが行われている。表-1にはモニタリング装置が設置されている各々の試錐孔の掘削長、計測方法、連続モニタリング区間数、モニタリングの期間を示す。AN-1 孔、MIU-2 孔では連続モニタリング区間を変更しているため計測を一時的に中断した時期があったが、その他の試錐孔において最長で3年以上の連続モニタリング結果が得られている。

(2) モニタリング装置

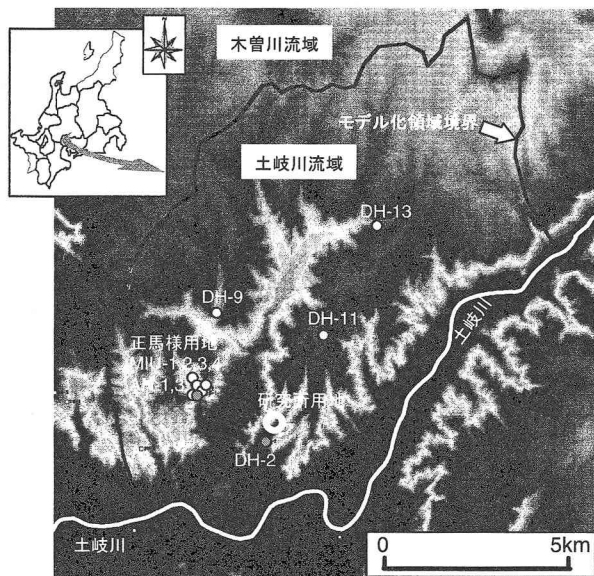
間隙水圧の計測方法は、単一孔にケーシングとパッカーにより複数のモニタリング区間を設定し、そのモニタリング区間の間隙水圧を測定するものである。圧力の測定方法として、プローブにより直接測定する方法（直接計測方法）と、区間からピエゾ管を立ち上げてその水位を計測する方法（ピエゾ水頭計測方法）がある（図-2）。今回の計測では DH-2 孔においてピエゾ水頭計測方法を用い、その他の試錐孔では直接計測方法を用いた。

また、長期モニタリングにおいては取得データの品質管理が重要であるため、本計測ではモニタリング装置の定期点検を実施している。定期点検を実施することにより、取得データの品質が保証でき、さらに、予測される軽微な経時劣化に対して事前に補修を行えることから、計測データの欠損を最小限に抑えることが可能になる。

3. 間隙水圧モニタリング結果

図-3に各々の装置で計測されたモニタリング結果の一例を示す。図-3(a)は直接計測方法で計測された結果であり、図-3(b)はピエゾ水頭計測方法で計測された結果である。図-3(a)には、間隙水圧計測結果を清水密度でのピエゾ水位に換算した値も同時に示す。この期間中は、両者とも水位で50cm以内の変動に収まっているが、その中で大気圧による変動、地球潮汐による変動が計測されていることが分かる。

次にモニタリングによって、(1)水みちの連続性を評価した例、(2)人為的擾乱により間隙水圧の変化を把握した例、(3)間隙水圧のベースラインを把握した例、を示す。(1)、(2)は正馬様用地におけるモニタリング事例である。正馬様用地は花崗岩体が厚さ100m



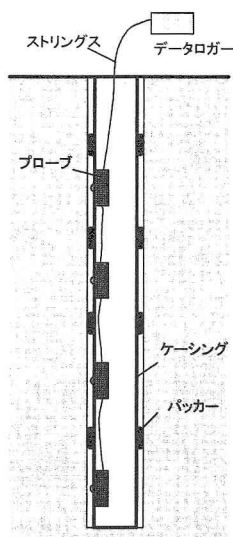
○：大深度長期水圧モニタリング実施試錐孔(1,000m級)
●：大深度長期水圧モニタリング実施試錐孔(400～500m級)

図-1 間隙水圧モニタリング観測網

表-1 間隙水圧モニタリング観測孔

試錐孔名	掘削長 (m)	水圧計測方法	連続モニタ リング区間数	連続モニタリング計測期間
AN-1	994.1	直接計測	20	1999年9月～2000年11月
AN-3	408.0	直接計測	12	2001年3月～
MIU-1	1014.0	直接計測	5	2000年4月～
MIU-2	1014.0	直接計測	9	2000年5月～
MIU-2	1012.0	直接計測	10	2000年2月～2001年11月
MIU-3	1014.0	直接計測	12	2003年3月～
MIU-4	1014.0	直接計測	8	2000年12月～
MIU-4	790.0	直接計測	10	2001年12月～
DH-2	501.0	ピエゾ水頭計測	7	2002年12月～
DH-9	1030.0	直接計測	5	2001年12月～
DH-11	1012.0	直接計測	5	2001年12月～
DH-13	1015.0	直接計測	7	2002年3月～

直接水圧計測方式



ピエゾ水頭計測方式

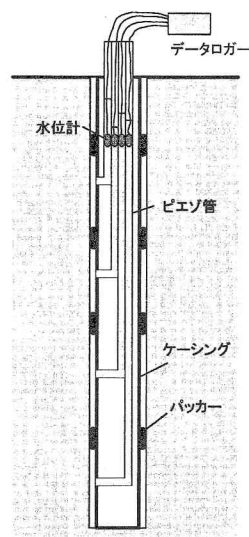


図-2 間隙水圧モニタリング方法

程度の新第三系の堆積岩に不整合で覆われており、花崗岩の上部には水平割れ目が卓越したゾーン（上部割れ目帯）が発達している。また、東西走向で南に70-80°傾斜した断層（月吉断層）が用地内に存在しており、その上下には幅100m程度の割れ目帯が発達している（図-4）。月吉断層主部は断層粘土を挟在することから水理学的には遮水性を有し、その下盤側は上盤側に対して水頭で30m程度被圧されている。また、花崗岩の上部割れ目帯で透水性が大きいことが分かっている⁴⁾。

(1) 試験掘削時の圧力応答による水みちの連続性の評価

正馬様用地で連続モニタリングを実施している試験孔近傍において、掘進長約400mの試験孔（MS-06孔）を掘削した際の間隙水圧をモニタリングした。図-4に試験孔のレイアウト

とモニタリング結果の一例を示す。MS-06孔を掘削中に逸水が発生したため、逸水深度が分かっている場合、周辺試験孔のモニタリング区間において圧力応答の大小を観測することにより孔間の相対的な透水性の違い及び連続性を評価することが可能である。ただし、掘削深度255m以浅では10ℓ/min以上逸水した場合、LCM(Lost Circulation Material)を用いた逸水止めかセメンチングを実施したが、それ以深は逸水を止めずに掘削を行った。このため深度

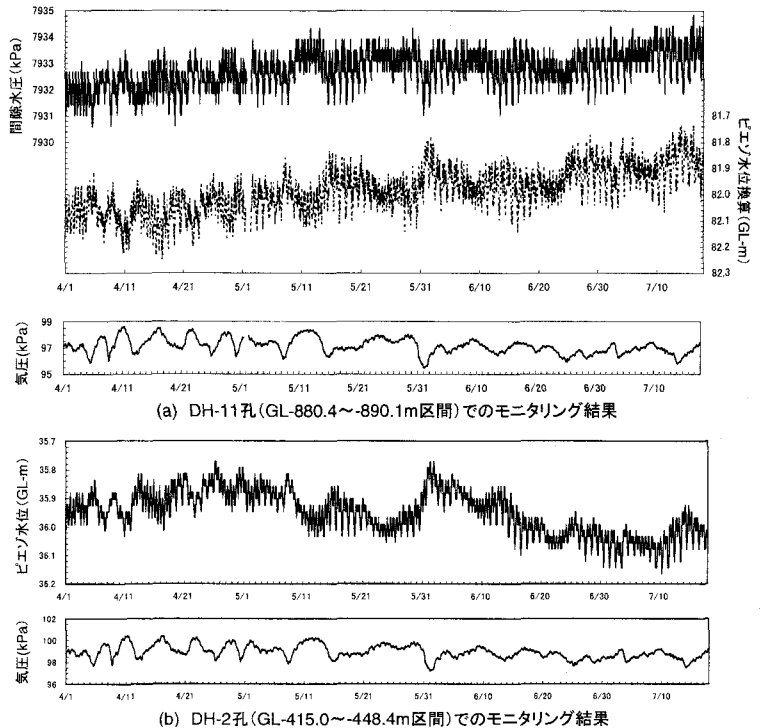


図-3 間隙水圧モニタリング結果の例

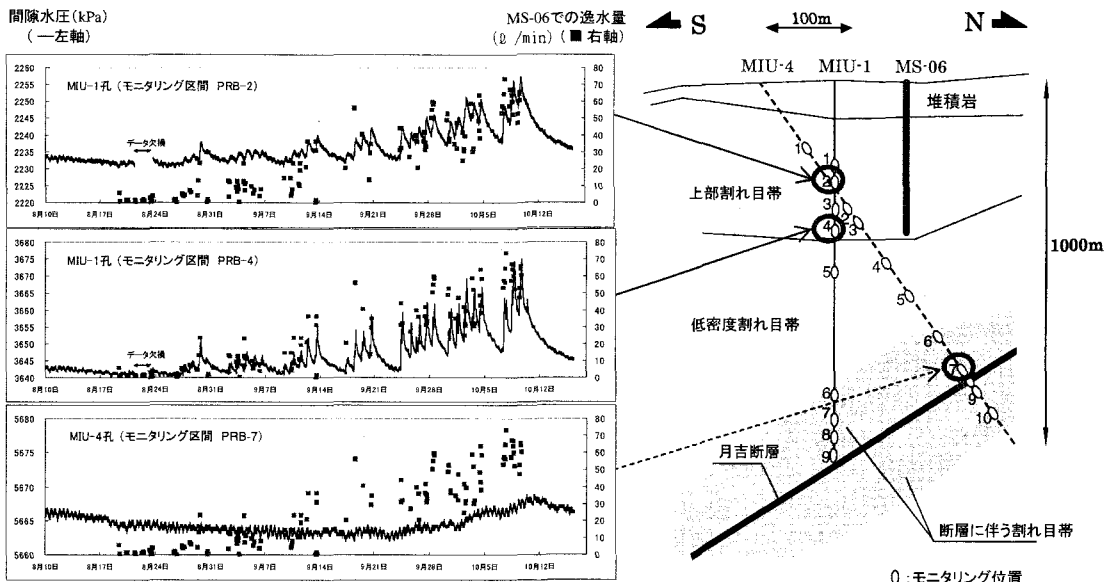


図-4 MS-06孔掘削に伴うMIU-1孔における圧力応答モニタリング結果の例

255m 以浅は逸水した箇所と掘削深度は一致しているが、それ以深では掘削深度以浅から逸水している可能性も含んでいる。

MS-06 孔の逸水のない区間を掘削中にはどのモニタリング区間においても圧力応答は観測されなかったが、逸水が大きくなった8月29日以降の深度150m以深の掘削においてMIU-1孔の上部割れ目帯中のモニタリング区間で明瞭な圧力応答が観測された。図-4に示すようにMIU-1孔のモニタリング区間における圧力応答は1日の掘削終了後、数時間遅れて最大値を観測し、その後定常値へ回復するという傾向が見られた。また、圧力応答の定常時からの最大増分値は1日の総逸水量とほぼ比例関係を示したが、その傾きはモニタリング区間により異なっていた。図-5にMIU-1孔の3箇所のモニタリング区間（PRB-1,4,6）について、逸水量100ℓ/日当たりの応答圧の増分値とMS-06孔の掘削深度との関係を示す。この図からMS-06孔の深度270m付近の掘削に対しMIU-1孔の深度380m付近の区間（PRB-4）での応答圧が最大であり、MS-06孔との間に高透水ゾーンが連続している区間であると判断できる。この検討を他のモニタリング区間についても行った結果、図-6に示すように上部割れ目帯中に水みちが連続した部分が存在していることが推定できた。以上の結果から、モニタリング結果が水みちの推定に利用できることが分かった。

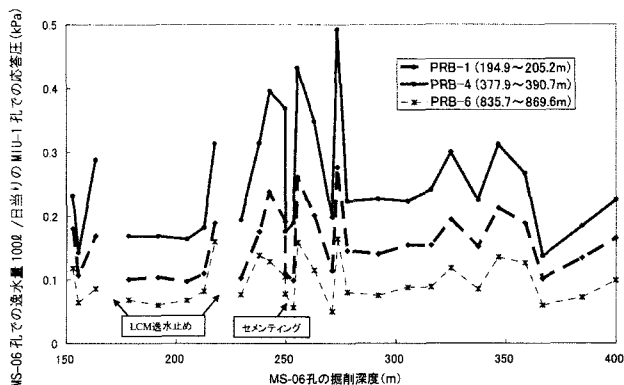


図-5 MS-06 孔の単位逸水量あたりの MIU-1 孔での応答圧との MS-06 孔の掘削深度との関係

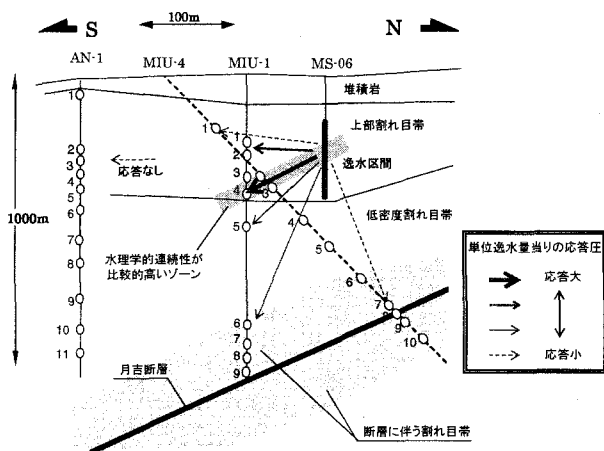


図-6 応答圧から推定される水みちの連続性

(2) 断層近傍のパッカー収縮による間隙水圧変化の評価

正馬様用地のMIU-2孔に設置していたモニタリング装置を撤去した際に、周辺試験孔における間隙水圧の圧力変動のモニタリングを行った。MIU-2孔は遮水性の月吉断層をGL-890m~915mで貫いているが、モニタリング実施時には、断層近傍にパッカーを設置することにより、MIU-2孔が断層の上盤側と下盤側の水みちとして働くことを遮断していた。図-7にモニタリング装置撤去に伴うパッカー収縮時の周辺試験孔（MIU-1、MIU-3孔）での区間水頭変化を示す。パッカー収縮後、断層上盤側に位置するMIU-1孔の各モニタリング区間とMIU-3孔のPRB-1~4のモニタリング区間においては水頭が上昇したが、断層下盤側に位置するMIU-3孔のPRB-5~8の区間では減少した。図-8は、これら周辺の試験孔におけるモニタリング結果を基に、パッカー収縮前とパッカー収縮後から30日経過時の全水頭分布を示したものである。このモニタリング結果は、パッカー収縮前は断層を境に水頭の差が存在していたが、パッカー収縮後はMIU-2孔を介して被圧された下盤の水圧が上盤側に伝播したため上盤側の水頭が上昇し、逆に下盤側は圧力が開放され水頭が減少したものと解釈できる。これから遮水性を有する断層への試験孔が、周辺の間隙水圧へ影響を与えることが分かる。また、パッカー収縮後の断層上盤における水頭変化の分布を見ると、MIU-1孔、MIU-3孔での上部割れ目帯中に増加量が大きい部分が存在する。この結果は、MIU-2孔とMIU-1孔、MIU-3孔間で上部割れ目帯において水理学的連続性が大きい部分が存在することを示しており、(1)での推定結果とも一致している。以上の結果から、モニタリングにより遮水性を有する断層を貫く試験孔が間隙水圧へ与える影響を把握で

き、また、断層周辺の水理特性の確認に有用な情報が得られることが分かった。

(3) 地球潮汐や気圧変化による変動の分離による間隙水圧のベースラインの把握

間隙水圧モニタリングによる計測値には大気圧や地球潮汐等による変動が含まれている。このため、対象地域における季節変動といった間隙水圧のベースラインを正確に把握するには、これらの影響を除去する必要がある。また、水理試験による圧力応答や周辺試錐孔の掘削応答の観測により水理地質構造の評価をする場合、岩盤の水理特性や試錐孔間距離等によっては圧力応答量が小さくなることから、気圧変化や地球潮汐等による水圧変動は除去して評価する必要がある。一方、大気圧や地球潮汐による水圧変動は測定区間の水理特性に依存しているため、この変動に着目すると測定区間の水理特性の評価が可能になる⁵⁾。これらのことから、モニタリング結果から大気圧や地球潮汐等の変動成分を分離することは重要であると考えられる。

本モニタリング結果から大気圧や地球潮汐等の変動成分を分離する方法として、分離解析プロ

グラムである BAYTAP-G⁶⁾を使用した。AN-1 孔において観測されたモニタリング結果に対し分離解析を実施した例を図-9 に示す。モニタリング結果から大気圧変動成分、地球潮汐変動成分、計測機器の分解能等に起因するイレギュラー成分が分離され、間隙水圧のベースラインの変動傾向が明瞭になることが分かった。また、この分離解析により得られた大気圧変動成分、潮汐変動成分を利用することにより、測定区間の定性的な水理特性の把握や観測データの品質の管理ができることも示されている⁷⁾。

4. おわりに

本報では、東濃地科学センターが掘削した 400m～1,000m 級の試錐孔の主として花崗岩部に設置した間隙水圧モニタリングの観測網を示した。また、これによって得られた結果を用いて、(1)水理地質構造の評価、(2)試錐孔に掘

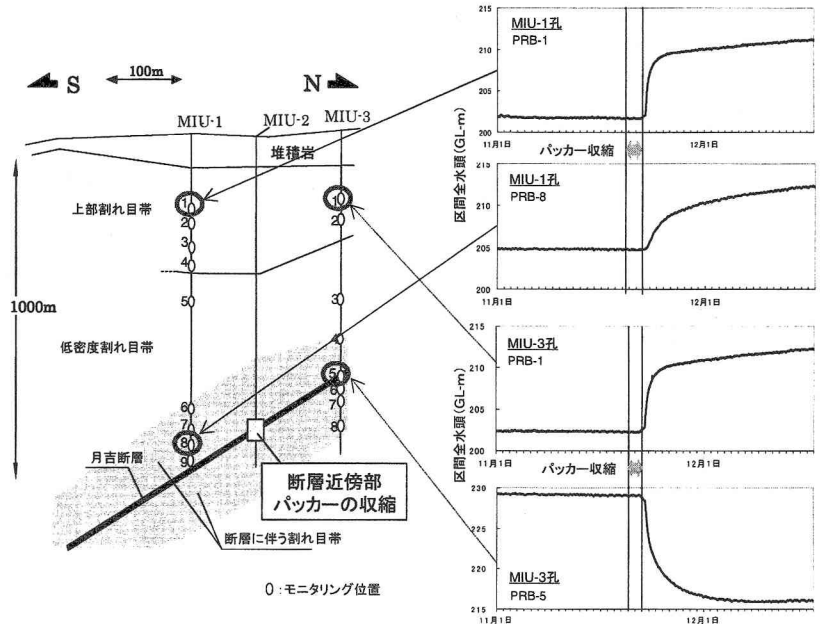


図-7 MIU-2 孔のパッカー収縮に伴う水圧モニタリング結果の例

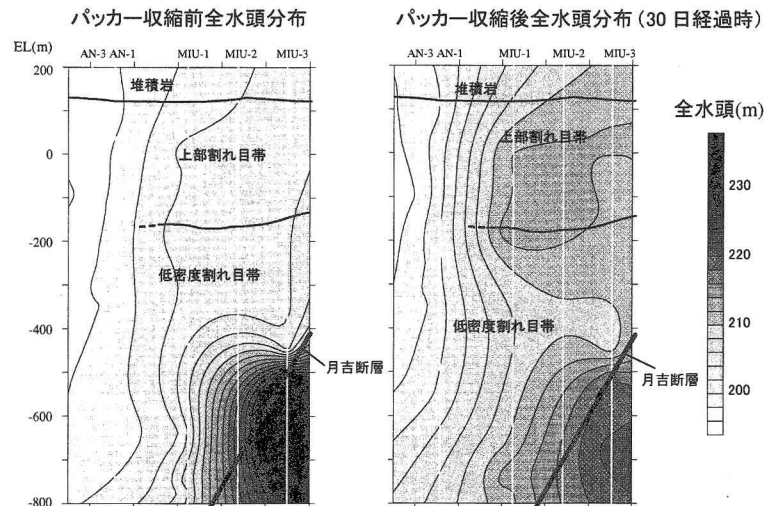


図-8 パッカー収縮前後の全水頭分布

削による間隙水圧へ与える影響の評価、(3)間隙水圧のベースラインの把握、を行い、間隙水圧モニタリング結果の評価方法の実例を示すことができた。今後、引き続きモニタリングを行い、地下施設建設中における間隙水圧変化の把握とモニタリング装置の長期適用性の確認を実施する予定である。

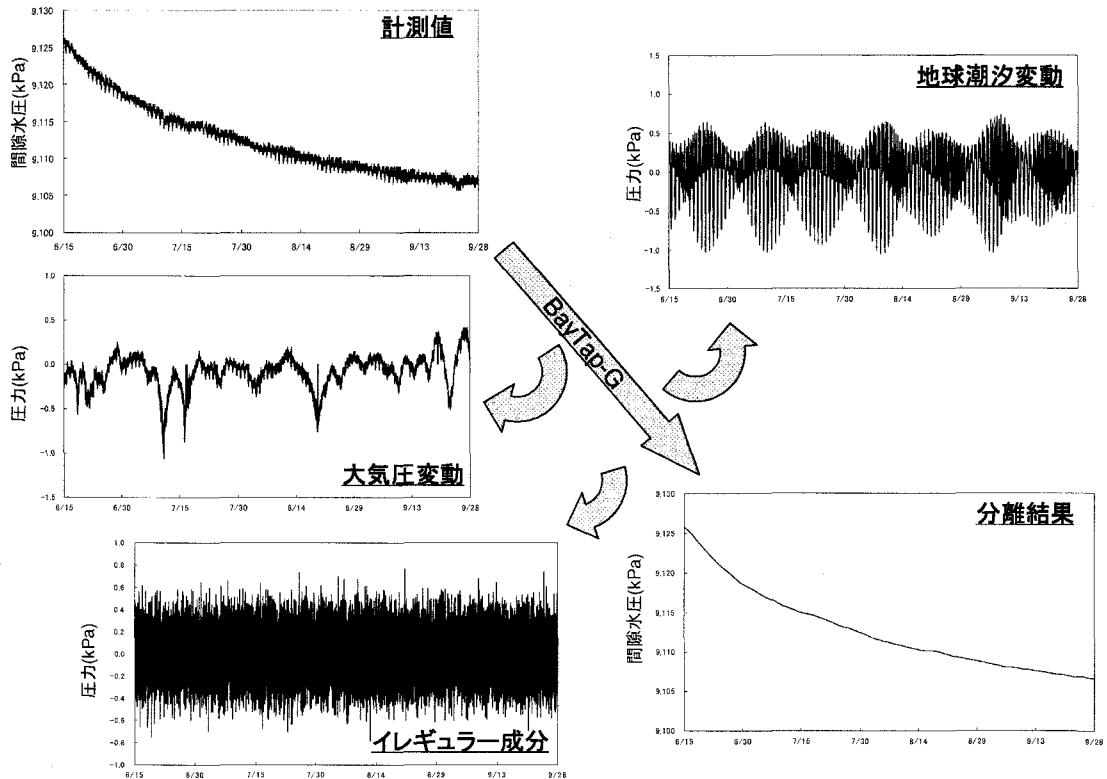


図-9 BAYTAP-G⁶⁾による分離解析結果の例

参考文献

- 1) 三谷泰浩：地層処分におけるモニタリング，第22回西日本岩盤工学シンポジウム，p.1-6，2001.
- 2) 動燃事業団：広域地下水流動研究基本計画書，動燃事業団計画資料，PNC TN7020 98-001，1997.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画，JNC TN7410 2001-018，2002.
- 4) 竹内真司，下茂道人，西嶋望，後藤和幸：1000m ボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，p.296-300，2001.
- 5) 細谷真一，徳永朋祥：間隙水圧の気圧変動応答、地球潮汐応答を用いた水理特性評価技術の展望，地下水学会誌，Vol.45，No.3，p.299-318，2003.
- 6) Isiguro, M., H. Akaike, M. Ooe and S. Nakai：A Bayesian Approach to the Analysis of Earth Tides, Proc. 9th International Symposium of Earth Tides, p.282-292, 1981.
- 7) 後藤和幸，升元一彦，向井圭，竹内真司：水圧モニタリングデータの地球潮汐・気圧変動成分の分離解析，第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2004. (投稿中)