

(4) 深地層の研究施設計画に関する 第2期中期計画取りまとめ案について

②個別の成果の取りまとめ案について

—a. 地質・地質構造—

**地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット
幌延深地層研究ユニット**

実施概要・要点(地質・地質構造分野)

【知見の抽出】

第2期中期計画として超深地層研究所計画(瑞浪:～深度500m)および幌延深地層研究計画(幌延:～深度350m)において得られた地質分野の知見を抽出

⇒成果マップ

【成果および課題の評価】

まとめ群(A1群～A3群)として構造化された時間軸に沿った各意思決定ポイントにおける達成目標に対する達成度および今後の課題として現状を整理

⇒成果ダイジェスト, 課題ダイジェスト

【今後の研究計画への反映】

各分野における課題ダイジェストから両地下研究施設における今後の課題を整理

⇒必須の課題

A1) 地質環境の初期状態の理解:

処分パネルの展開に適した岩体の分布, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査解析技術やモデル化技術

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域を把握するための調査技術

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

地形, 地質構造の長期変遷を推定するための調査・モデル化技術

A1) 取りまとめの着眼点(地質・地質構造分野)

A1) 地質環境の初期状態の理解:

処分パネルの展開に適した岩体の分布, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査解析技術やモデル化技術

➤ 着目した地質環境の特性とプロセス

- ・ 対象岩盤の分布と形状
- ・ 岩盤の地質学的不均質性
- ・ 移行経路として重要な構造

➤ 達成目標

- ・ 地上からの調査で地質学的に好ましい環境条件の領域を判断できる。
- ・ 処分パネル展開の位置を検討するために必要な情報である, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握できる。

A1) 地質環境の初期状態の理解:

処分パネルの展開に適した岩体の分布, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査解析技術やモデル化技術を整備

➤ 共通

- ✓従来は個別に進められてきた調査内容をトップダウン的に整理することにより, 各種調査結果に基づき地質構造モデルを構築するための方法を整備した。
- ✓従来のモデルでは明示されなかった, 調査の進展にともなう地質環境の理解度や構築した地質構造モデルの不確実性の表示方法を整備した。(一部整備中)。

➤ 対象岩盤の分布と形状

- ✓地表地質調査, 物理探査, ボーリング調査を組み合わせにより, 対象岩盤とその周辺の岩盤の分布と形状を概ね把握することが可能となった。

➤ 岩盤の地質学的不均質性

- ✓地表地質調査, 物理探査, ボーリング調査の組み合わせにより, 断層の分布や割れ目の頻度などを考慮した対象岩盤の地質学的分類が可能になった。(瑞浪・幌延相違点: 電気・電磁探査法による断層抽出: 塩水系地下水分布域, 花崗岩露岩地域で有効)
- ✓地表露頭調査, ボーリング調査等の組み合わせにより, 地質図に記載されていない断層の方向性や頻度分布を概ね把握することが可能になった。(瑞浪・幌延相違点: 断層幅: 瑞浪: 十数～数十m程度, 幌延: ～1m程度)

A1) 地質環境の初期状態の理解:

処分パネルの展開に適した岩体の分布, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査解析技術やモデル化技術を整備

➤ 移行経路として重要な構造

- ✓ 透水性の異なる岩盤領域を, 岩盤の割れ目頻度や地山強度比(幌延)から区分して, モデル化することが可能となった。
- ✓ 対象岩盤に相当する地層・岩体が地表に露出する場合には, 断層・割れ目の分布やその透水性の有無などの水理地質構造概念の構築に必要な情報を取得できることが明らかになった。
- ✓ ボーリング調査以外で把握することが困難であった花崗岩中の断層分布について, 前方探査(逆VSP探査)により把握できる可能性を示した。(岩盤の弾性波速度の変化が大きくない場合に有効)
- ✓ 坑道の壁面観察により, 従来は少数の事例が知られているにすぎなかった, 岩盤中の割れ目や断層等の詳細な分布・特性を確認できた。
- ✓ コンパートメントなどの地下水流動に影響する構造の分布を, 坑道掘削中の自然電位測定により把握できる可能性を示した。(花崗岩の割れ目帯や礫岩層などの透水性の高い構造を指標とした場合に有効)

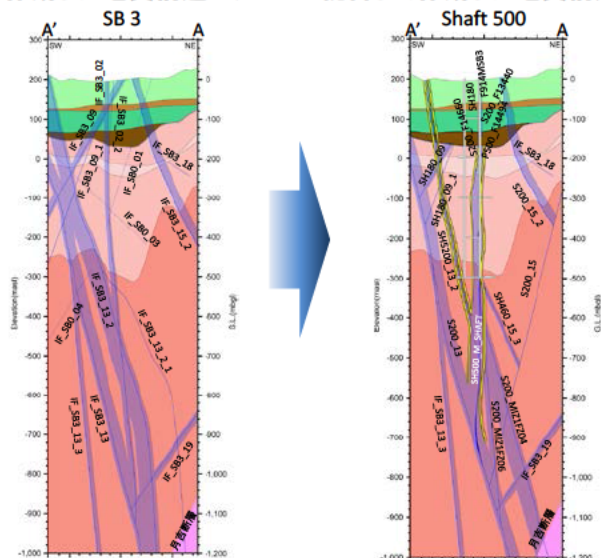
成果ダイジェストA1)地質環境の初期状態の理解

—対象岩盤の分布と形状、および岩盤の地質学的不均質性を把握するための調査技術—

地表地質調査、物理探査、ボーリング調査の組み合わせにより、断層の分布や割れ目の頻度などを考慮した対象岩盤の地質学的分類が可能になった。

(瑞浪) 地上からの調査結果を統合して作成した地質構造モデル

立坑深度500mまでの調査結果を統合して作成した地質構造モデル

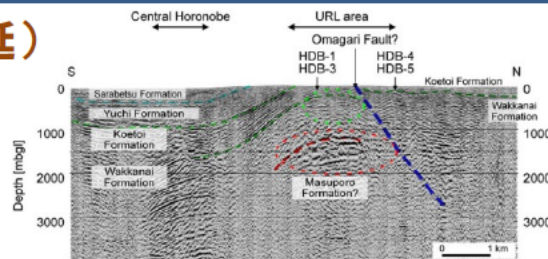


赤色で示される領域が割れ目の少ない花崗岩

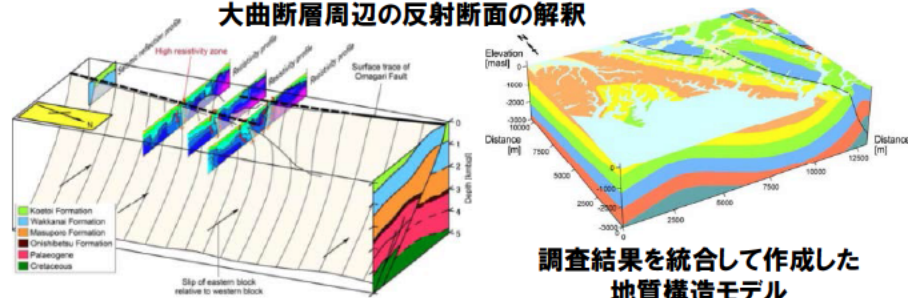
- 花崗岩と堆積岩の分布・形状や断層の分布について、地表地質調査、地上の物理探査(反射法地震探査など)、地上からのボーリング調査を組み合わせることによって概ね把握できることを確認。
- 地層処分に適すると考えられる、岩質が均一で割れ目の少ない領域を概ね把握することが可能。
- 地上の調査で把握した割れ目帯の区分は、坑道掘削中の調査により数m以内の誤差で把握できたことを確認。

対象岩盤となる割れ目が少ない領域は水平方向への深度変化が激しいと推定されることから、処分パネル配置の検討のためには、広い範囲の割れ目の不均質性や形成プロセスの把握のための知見が必要

(幌延)



大曲断層周辺の反射断面の解釈



調査結果を統合して作成した地質構造モデル

AMT法探査により大曲断層の位置を推定

- 堆積岩の堆積構造や断層の分布について、地表地質調査、地上の物理探査(反射法地震探査など)、地上からのボーリング調査を組み合わせることによって概ね把握できることを確認。
- 地層に顕著な物性変化がない場合や褶曲により地層が高角である場合などの、反射法地震探査で明瞭な結果が得られない場所では、他の調査手法による情報の補完が必要。塩水系地下水の分布域において、地層に顕著な物性変化がない場合には、断層の分布位置の補完手法として電気・電磁探査が有効。

今後の課題 メッセージ案(地質・地質構造分野)

A1) 地質環境の初期状態の理解(サイト選定～処分開始に関する意思決定ポイントへの反映):

処分パネルの展開に適した岩体の分布, 地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査・評価技術の整備

主要な課題は達成。(今後は, A2), A3) の課題の対応を通じて, 以下に関する情報を適宜, フィードバック)

- **割れ目の不均質性や形成プロセスの把握に資する知見の蓄積と, それらの調査・評価手法の整備**

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域を把握するための調査技術

- 着目した地質環境の特性とプロセス
 - 掘削損傷領域(EDZ)の分布

- 達成目標
 - 坑道掘削に支障がないことを判断できる。

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解:

地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域を把握するための調査技術を整備

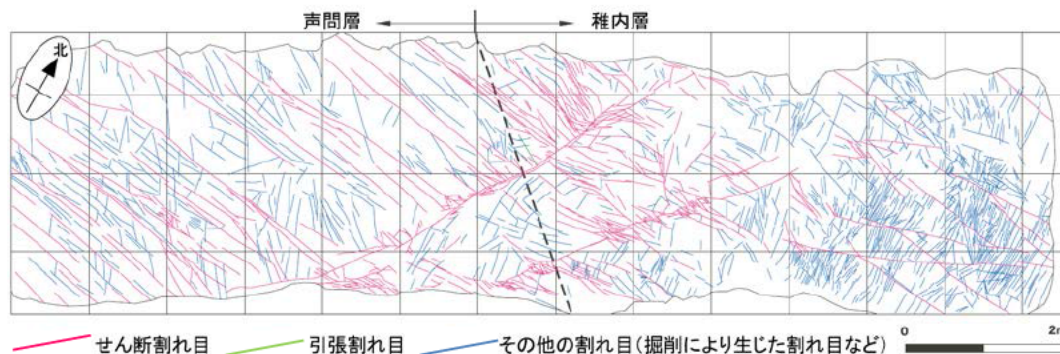
➤ **掘削損傷領域(EDZ)の分布**

- ✓ 坑道の壁面観察により、坑道の掘削影響領域の詳細な分布を推定することが可能になった。(瑞浪・幌延相違点:花崗岩では目視による識別が困難)

成果ダイジェストA2)地質環境の短期変動・回復挙動の理解 —EDZの範囲を把握するための調査技術—

坑道の壁面観察により坑道の掘削影響領域の詳細な分布を推定することが可能になった。

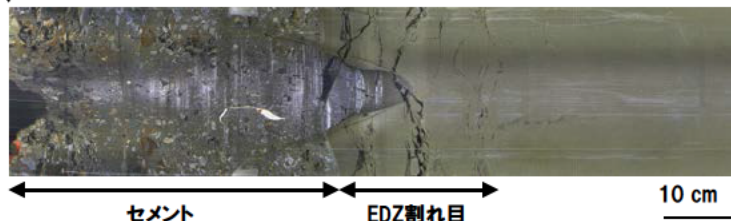
(概要)



深度250mポンプ座の底盤における割れ目の分布

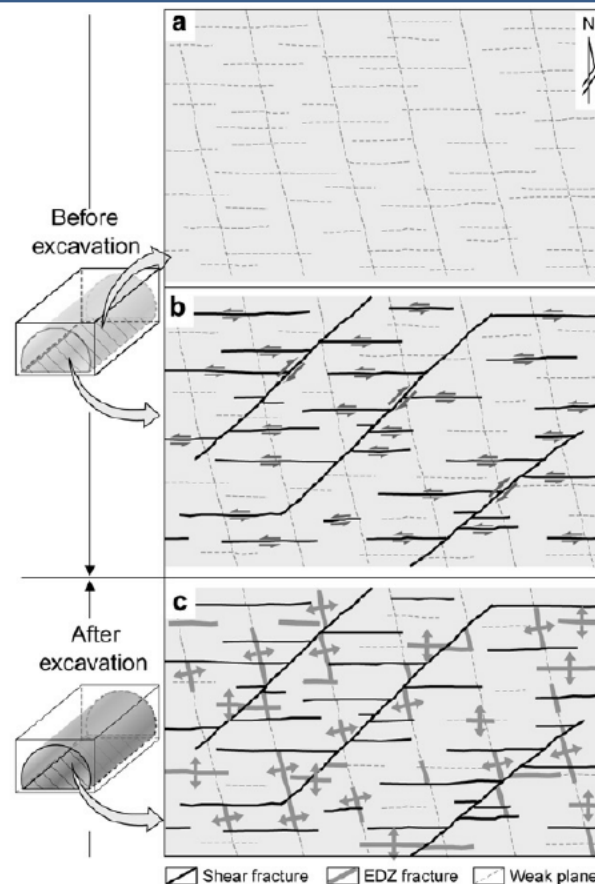
- 坑道壁面や底盤の地質観察により, EDZ割れ目の分布・特性を把握することが可能

坑道側壁



350m試験坑道のボーリング孔内(稚内層)で確認されるEDZ割れ目

- 坑道周辺においてEDZ割れ目が発達する範囲を把握することが可能



EDZ割れ目の形成過程の概念図

- EDZ割れ目の性質は, 天然割れ目や岩石がこれまで置かれた応力場と関連付けられる

坑道掘削に伴う損傷領域内での割れ目の変化を把握する手法の構築や坑道閉鎖(埋戻し)後の割れ目の閉塞・充填に関わる知見の蓄積が必要

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解(処分開始～最終閉鎖に関する意思決定ポイントへの反映):

地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域の割れ目の変化を把握するための調査技術の整備

- 坑道掘削に伴う損傷領域内での割れ目の変化を把握する手法の構築
- 坑道閉鎖(埋戻し)後の割れ目の閉塞・充填に関わる知見の蓄積

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

地形、地質構造の長期変遷を推定するための調査・モデル化技術

- 着目した地質環境の特性とプロセス
 - ・ 地形／地質構造の時間変化

- 達成目標
 - ・ 対象岩盤の長期安定性を推定できる。

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解:

地形、地質構造の長期変遷を推定するための調査・モデル化技術を整備

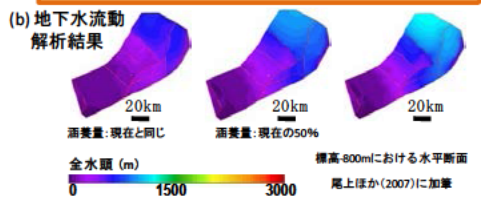
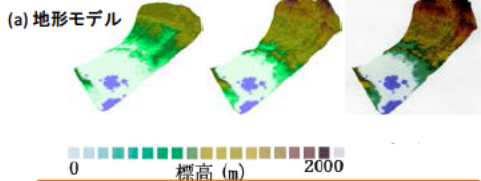
➤ 地形／地質構造の長期変化

- ✓従来は現在の応力場と過去の応力状態は個別に検討されてきたが、地質構造の形成を考慮することによって、過去から現在に至る応力変遷を推定することが可能になった。
- ✓従来はノウハウ的な情報であった、地形・地質の変遷モデルを構築するための考え方、手順を、エキスパートシステムおよびタスクフローとして整備した。
- ✓地形・地質構造の変化については、従来は隆起・沈降、侵食、堆積、圧密作用などを個別に考慮するのみであったが、地形・地質構造や物性の変化を統合し、連続的にモデル化・解析する手法を構築した。

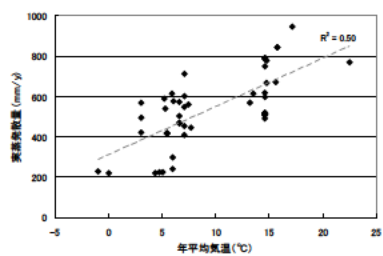
成果ダイジェストA3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解 —地質／地質構造の長期変化を推定するための調査技術、モデル化・解析技術—

地形・地質構造の変化については、従来は隆起・沈降、侵食、堆積、圧密作用などを個別に考慮するのみであったが、地形・地質構造や物性の変化を統合し、連続的にモデル化・解析する手法を構築した。

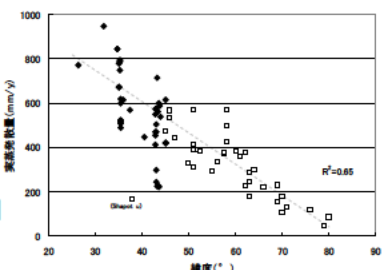
(瑞浪)



既存情報に基づいて概括的に推定した木曾山脈から伊勢湾までの古地形(時間断面)とそれを用いた地下水流動解析結果(水頭分布)



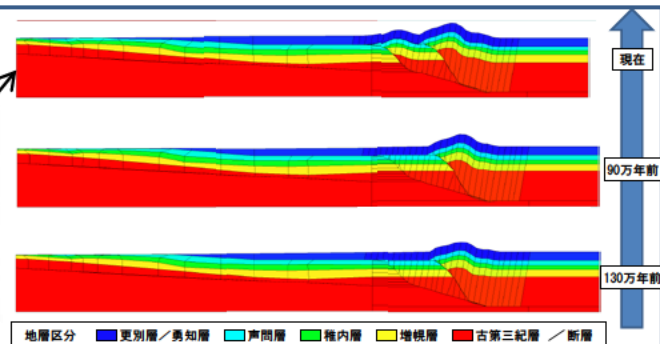
緯度と年間実蒸散量の関係



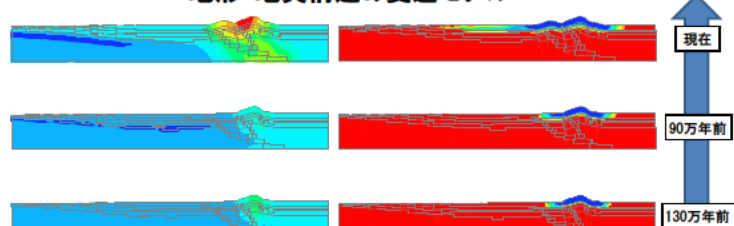
年平均気温と年間実蒸散量の関係

- 地下水流動特性に対する影響因子の一つである地形変化に着目し、主要な山地や平野の発達過程を考慮して広範囲の古地形変化を概略的に推定。また、古地形変化と他の影響因子である涵養量の変化や断層の水理特性を考慮した地下水流動解析を実施し、地下水流動特性の長期変化に与える影響を概括的に評価

(幌延)



地形・地質構造の変遷モデル



全水頭分布 塩分濃度分布
解析結果の一例

- 地下水流動に影響を与える天然現象を地下水流動解析に取り込む枠組みとして、三次元地質構造モデルおよび複数の時間断面における変動を考慮できる解析手法を開発し、海水準の変動と地下水涵養量を連動させた地下水流動と塩分濃度の長期的な変遷を評価が可能であることを確認

幌延深地層研究所計画 平成23年度調査研究成果報告

今後の課題 メッセージ(地質・地質構造分野)

A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解(処分開始～追加対策に関する意思決定ポイントへの反映):

地形／地質構造の長期変化を推定するための体系的な調査・モデル化技術の整備と断層などの天然現象の地質環境への影響把握

- **地質環境の長期変動に関わる知見の蓄積によるモデル化精度の向上と、多分野を含むモデル化・解析に関連する不確実性の評価手法の構築**
- **断層などの天然現象の地質環境への影響範囲を把握する手法の提示**

まとめ

A1) 地質環境の初期状態の理解(サイト選定～処分開始に関する意思決定への反映):

- 処分パネルの展開に適した岩体の分布、地下深部の断層や物質・地下水の移行経路となる構造の分布を把握するための調査解析技術やモデル化技術の整備を概ね完了
- A2) ,A3) の課題の対応を通じて、割れ目の不均質性や形成プロセスの把握に資する知見や、それらの調査・評価手法の整備に関する情報をフィードバック

A2) 地質環境の短期変動・回復挙動の理解(処分開始～最終閉鎖に関する意思決定への反映):

- 地下施設建設・操業に伴う掘削影響領域を把握するための調査技術の事例を提示
- 坑道掘削に伴う損傷領域内での割れ目の変化を把握する手法の整備が必要
- 坑道閉鎖(埋戻し)後の割れ目の閉塞・充填に関わる知見の蓄積が必要

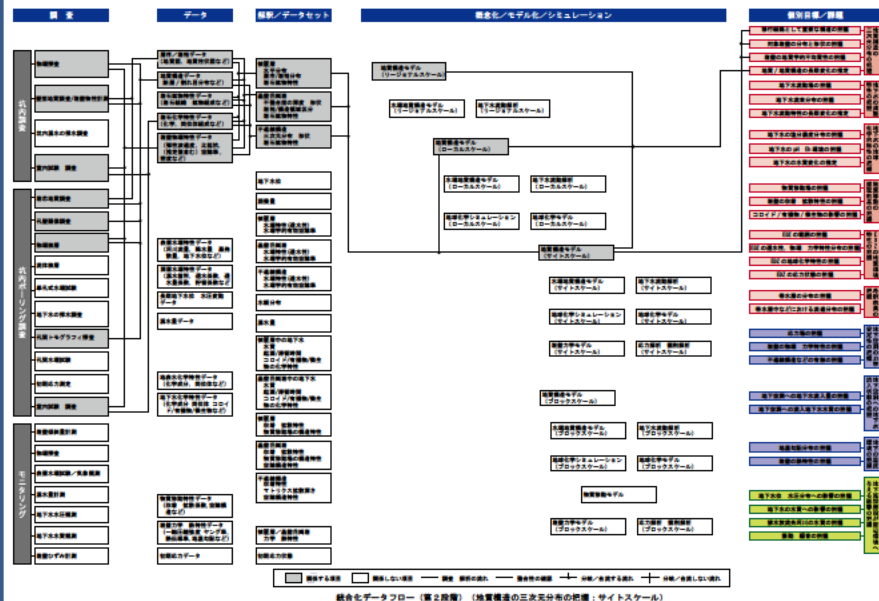
A3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解(処分開始～追加対策に関する意思決定への反映):

- 地形、地質構造の長期変遷を推定するための調査・モデル化技術を整備を実施中
- 地形／地質構造の長期変化を推定するための体系的な調査・モデル化技術の整備と断層などの天然現象の地質環境への影響把握が必要

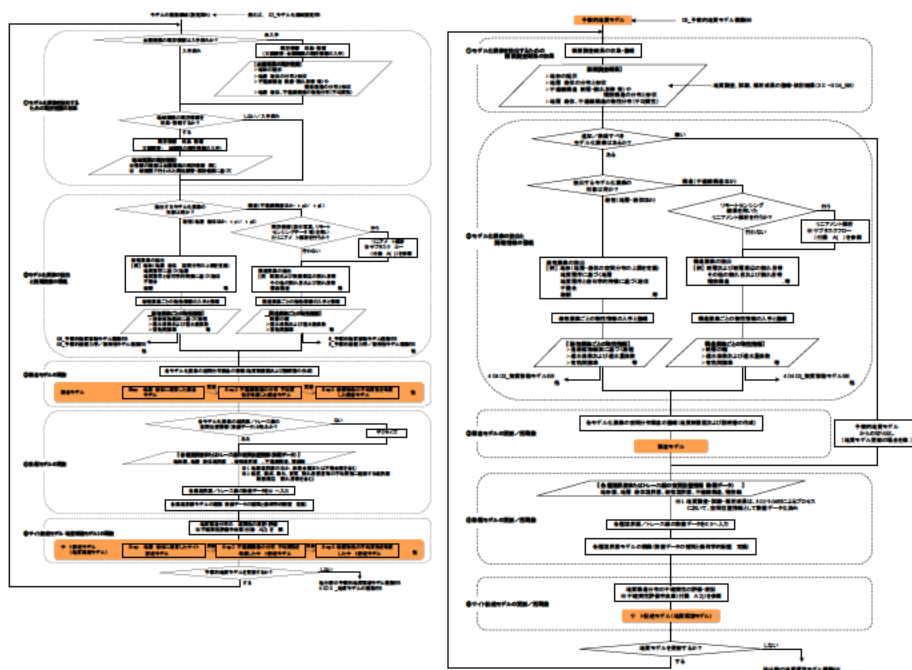
瑞浪における必須の実施項目	幌延における必須の実施項目
坑道閉鎖試験(再冠水・埋戻し)	坑道閉鎖試験(埋戻し)
地質環境の長期変動に関する調査・解析技術	

参考

（瑞浪・幌延）



- 地質モデルを作成するため、「調査」から「モデル化・解析」までの合理的な道すじを示した「統合化データフロー」を構築
- 「統合化データフロー」は、調査の種類と組み合わせ、取得するデータの種類、データの解釈および異なる分野で得られた情報の統合など、実際の作業の流れを示したものとして整備



- 調査計画の策定段階における予察的地質モデルを構築するための作業の流れ(タスクフロー)、および概要調査段階における地質モデルを構築するタスクフローを整備

上述の課題を踏まえた見直し(修正)が必要。

成果ダイジェストA1)地質環境の初期状態の理解

—岩盤の地質学的不均質性を把握し、構築した地質構造モデルが有する不確実性を表現するモデル化・解析技術—

従来のモデルでは明示されなかった、調査の進展にともなう地質環境の理解度や構築した地質構造モデルの不確実性の表示方法を整備した(一部実施中)。

(瑞浪・幌延)

ESLを用いて評価した大曲断層の不確実性コンター図



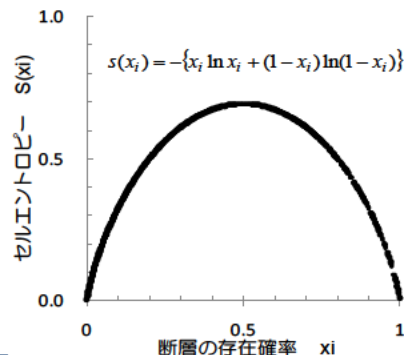
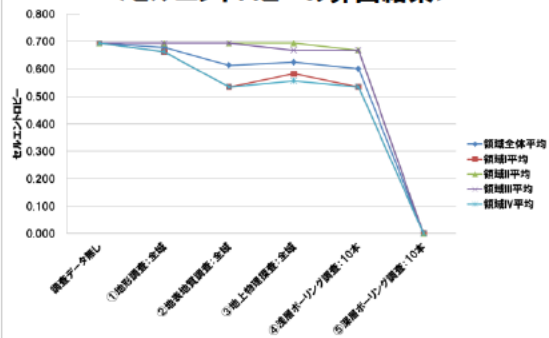
ESLによる大曲断層の不確実性評価例

<不確実性が高い地点(H-9地点)のESL解析結果例>

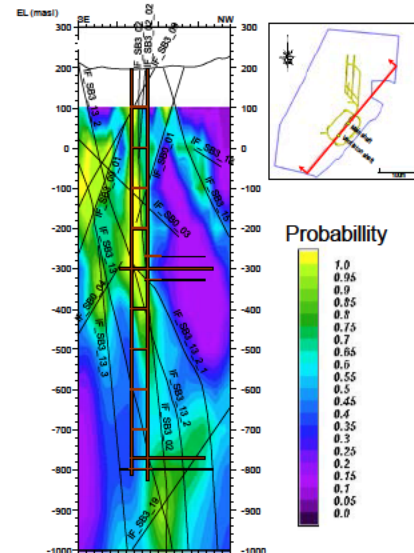
存在確率(支持):82%, 存在確率(否定):69%
不確実性の程度(1-(存在確率(支持)+(存在確率(否定)))-51%
証拠の確からしさ(存在確率(支持)/(存在確率(否定))):0.12

- 大曲断層が存在する
 - 1 既存地質図によって分布が記載されている
 - 1.1 20万分の1地質図(地質調査所)
 - 1.2 地質図(1987)
 - 1.3 調査(1995)
 - 1.4 JAEA(2007)
 - 1.5 JAEA(2008)
 - 2 地形情報によって分布が推定される
 - 2.1 赤色崖線地図
 - 2.2 地質図
 - 2.3 今川河川地図
 - 2.4 尾根線地図
 - 2.5 地下断層図
 - 2.6 断層線図
 - 2.7 断層分布図
 - 2.8 断層分布図
 - 3 地上物建群によって分布が推定される
 - 3.1 電力真部の水平一次線分
 - 3.2 反斜地帯調査
 - 4 地表地質調査によって断層の存在が確認されている
- 不確実性の要因
 - ⇒ 既存地質図や既存物建調査結果に断層の分布が記載、推定される一方で、一部の既存地質図や数値地形情報に断層の特徴が確認されないため
 - ⇒ 断層の存在がより明確に肯定もしくは否定される条件
 - ⇒ 既存地質図間の不一致や断層の特徴が数値地形情報に現れない理由(仮説・追加の調査データ等)が必要であることを示唆

<セルエントロピーの算出結果>



$S(x_i)$: i地点におけるセルエントロピー
 (x_i) : i地点における断層の存在確率



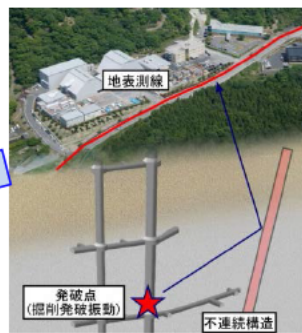
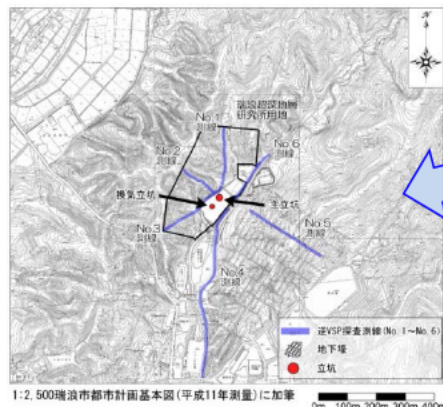
立坑を通過する断面における不連続構造の不確実性の表示例

地上および研究坑道からの一連の調査によって得られる情報を網羅的に利用し、精密調査の際に利用可能な情報として整理。

成果ダイジェストA1)地質環境の初期状態の理解 —岩盤の地質学的不均質性を把握するための調査技術—

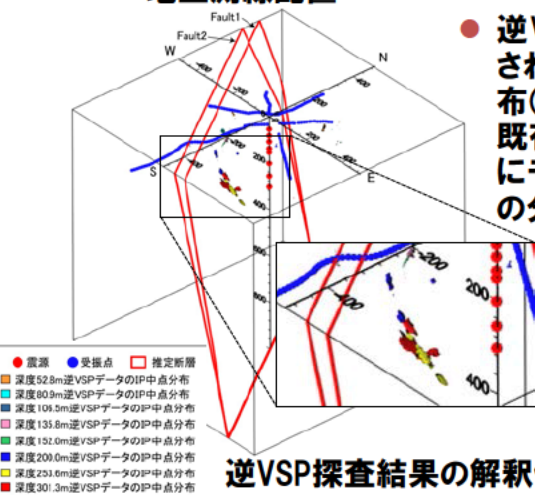
坑道周辺に分布する断層について、ボーリング調査以外で把握することが困難であった花崗岩中の断層分布について、前方探査(逆VSP探査)により、分布を把握できる可能性を示した。

(瑞浪) 【地上における逆VSP探査】



主立坑掘削の発破を震源に利用

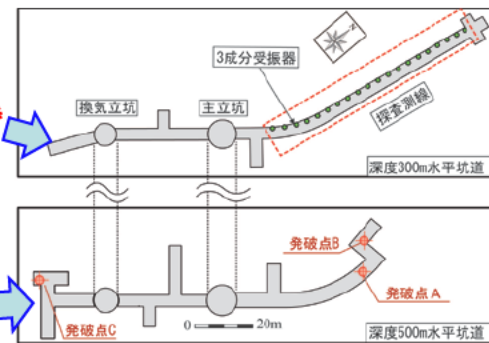
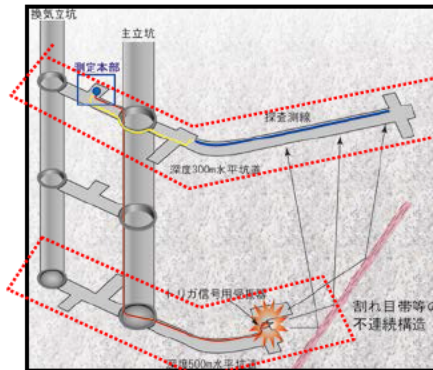
地上測線配置



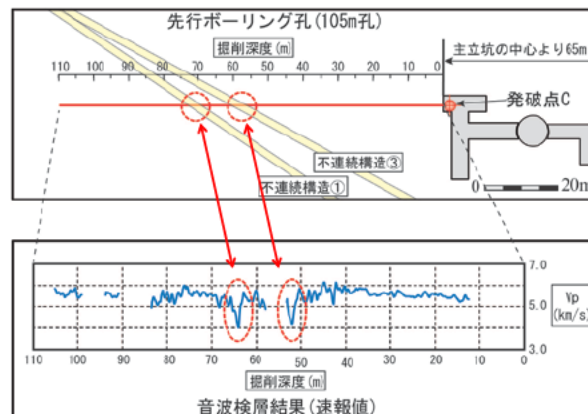
逆VSP探査結果の解釈例

- 逆VSP探査により推定された不連続構造の分布(図の赤い平面)は、既存の地質構造モデルにモデル化された断層の分布と概ね一致。

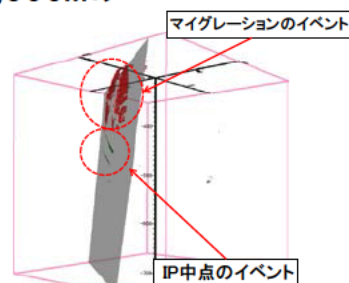
【坑道を利用した逆VSP探査】



深度300mアクセス坑道に測線を設置し、深度500mの水平坑道掘削の発破を震源に利用



- 逆VSP探査により推定された不連続構造の分布は、先行ボーリングで確認された低速度帯(断層)の位置と概ね一致

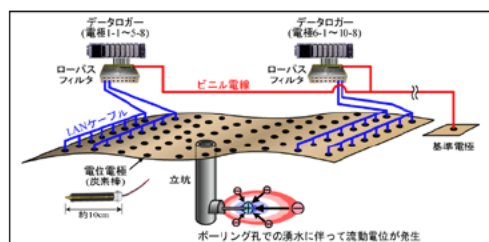


坑道周辺の断層の分布を推定するための調査・解析技術として、前方探査による花崗岩中の断層分布の把握に関する適用条件の確認が必要

成果ダイジェストA1)地質環境の初期状態の理解 —移行経路として重要な構造を把握するための調査・観測技術—

コンパートメントなどの地下水流動に影響する構造の分布を、坑道掘削中の自然電位測定により把握できる可能性を示した。

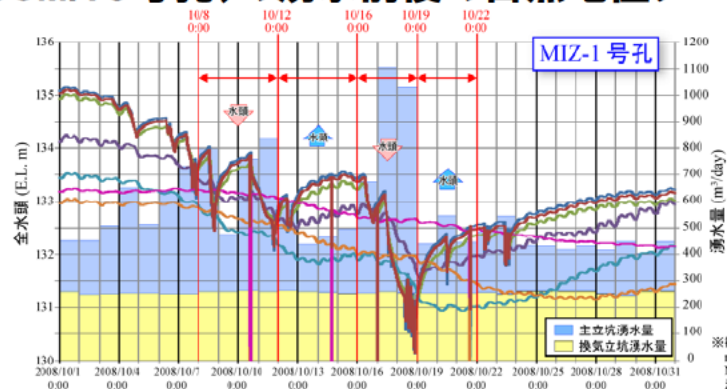
(瑞浪) 深度300m研究アクセス坑道の先行ボーリング(08MI13号孔)の湧水前後の自然電位データについて解析を実施



自然電位測定電極配置と
測定のイメージ



推定されるコンパートメント構造と
研究所周辺ボーリング孔



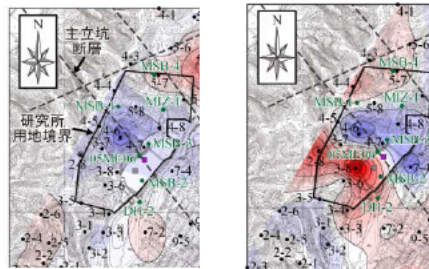
立坑湧水量とMIZ-1号孔における水頭変化

※10/12, 10/20にグラウチングによる止水を実施



自然電位測定電極配置

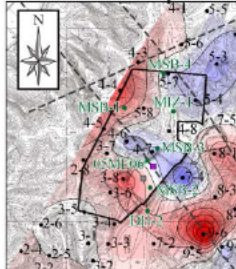
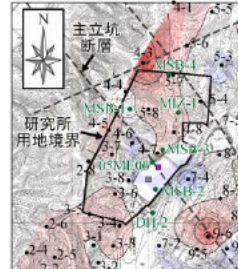
10/08 12:00 10/10 12:00



10/08 0:00を基準とした
電位変化(ΔSP)

10/16 12:00

10/19 12:00

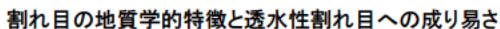
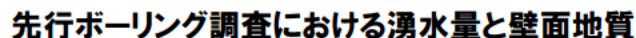


10/16 0:00を基準とした
電位変化(ΔSP)

- 08MI13号孔が位置する、主立坑断層の北東側で正の電位変化を確認
⇒湧水箇所に向かう地下水流動に伴う流動電位が発生したと考えられる。

自然電位測定を用いた水理地質構造の把握における適用条件の確認が必要

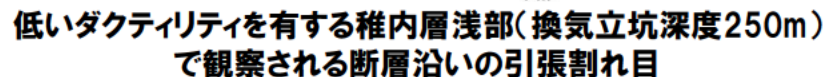
(瑞浪)



- グラウト充填有無や充填鉱物、母岩の変質などの特徴から割れ目を分類し、透水性割れ目の特徴を整理

割れ目の不均質性や形成プロセスの把握に資する知見の蓄積と、それらの調査・評価手法の整備。

(幌延)

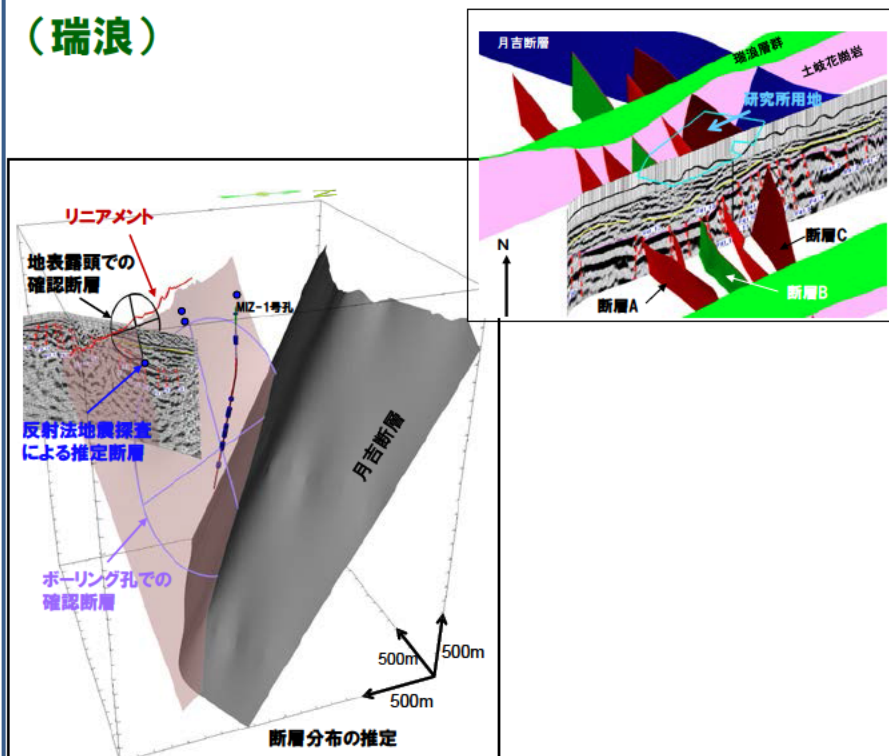


- 地上からの調査で予測した小規模断層と断層沿いの割れ目に関する概念を坑道の壁面観察で確認

成果ダイジェストA1)地質環境の初期状態の理解 —岩盤の地質学的不均質性を把握するための調査技術—

地表露頭調査, 物理探査, ボーリング調査等の組み合わせにより, 従来の地質図には記載されていなかった断層についても, 方向性や頻度分布を概ね把握することが可能になった。

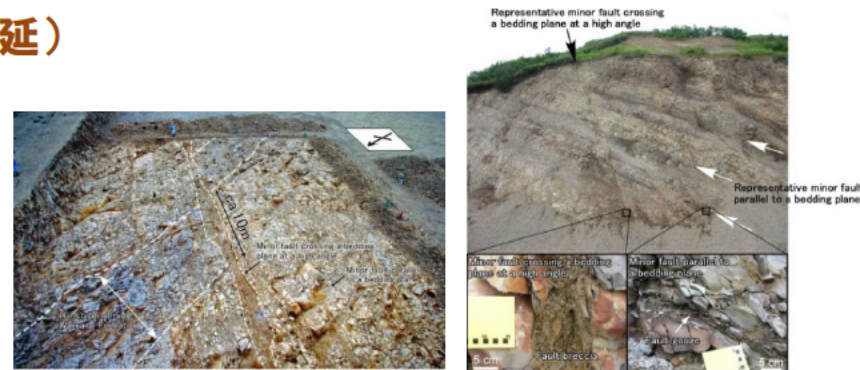
(瑞浪)



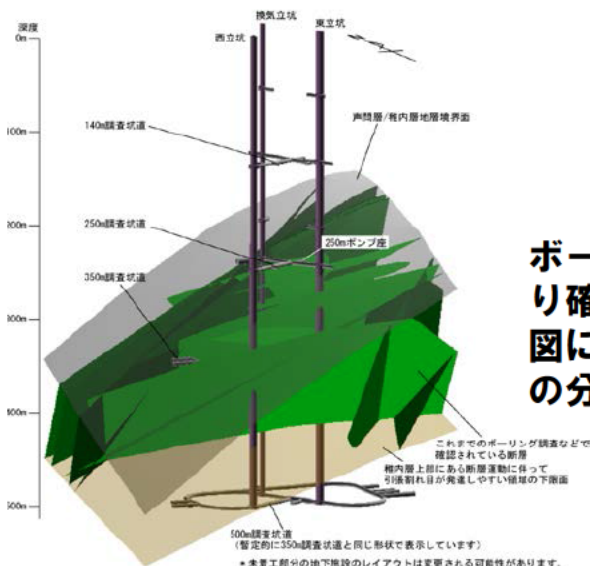
高角度傾斜の断層の解釈

- 地質図に記載されない断層について, 反射法地震探査で堆積岩部や花崗岩上面に対応する反射面の不連続を指標とした位置の推定結果と, 地表地質調査, ボーリング調査の情報を組み合わせて分布を推定。

(幌延)



小規模断層および割れ目を対象とした地表露頭調査

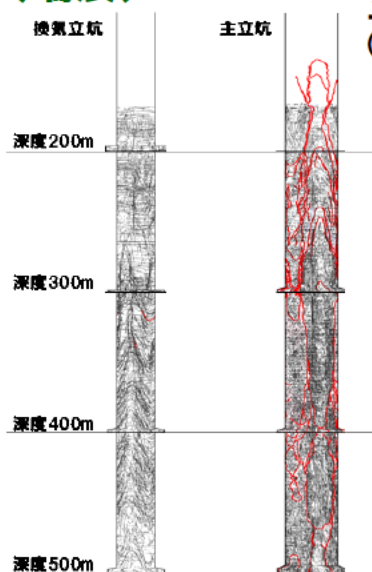


ボーリング調査等により確認・推定した地質図に記載されない断層の分布を推定。

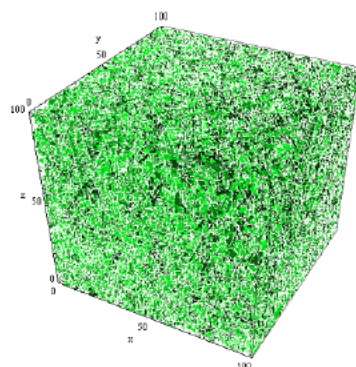
幅が数m以上の断層の存在は地上からの調査で把握できるものの, 地下深部では位置の推定に数十m以上の誤差を含むことから, 地下深部の断層の位置を把握するための調査技術の整備が必要

透水性の異なる岩盤領域を岩盤の割れ目頻度や地山強度比から区分して、モデル化することが可能になった。

(瑞浪)



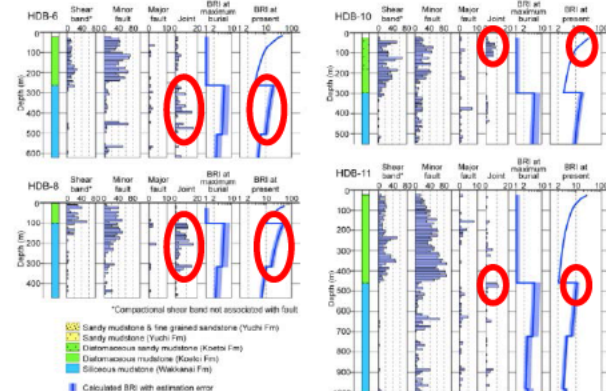
立坑における花崗岩中の割れ目分布
(赤線は断層)



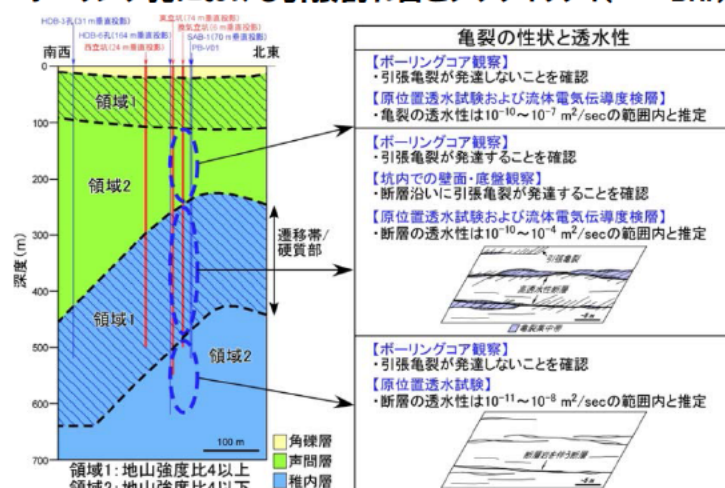
割れ目の実データに基づいて
作成した割れ目分布モデル
(100mブロック)

- 広域におよぶ割れ目分布の不均質性は、地上からの調査段階で行われたボーリング調査データから把握することができる。(←現在, 実施中。今年度中に成果取りまとめ)
- 割れ目の密度や傾斜角度から、割れ目帯として区分することが可能である。
- 割れ目帯ごとに割れ目帯分布モデルを構築することが可能

(幌延)



ボーリング孔における引張割れ目とダクティリティ($\propto^{-1}BRF$)の分布



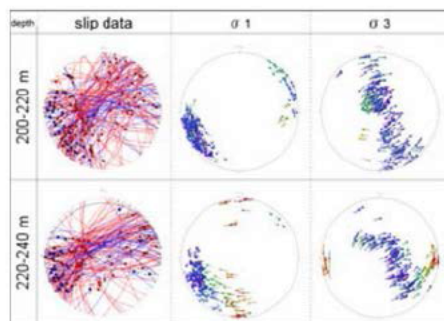
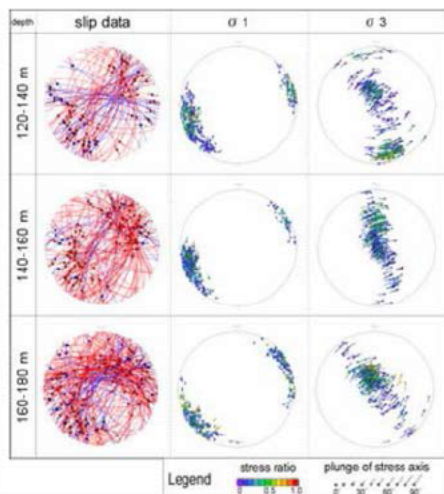
- 引張割れ目が発達する領域はダクティリティが低い領域に限定される

割れ目の分布は深度方向および水平方向に不均質であるため、不均質性を把握する調査とモデル化の手法についての検討が必要

成果ダイジェストA3) 地質環境の長期変動・回復挙動の理解
—地形／地質構造の長期変化を推定するための調査技術、モデル化・解析技術—

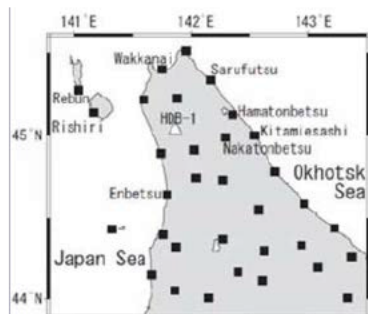
従来は現在の応力場と過去の応力状態は個別に検討されてきたが、地質構造の形成を考慮することによって、過去から現在に至る応力変遷を推定することが可能になった。

(幌延・瑞浪)

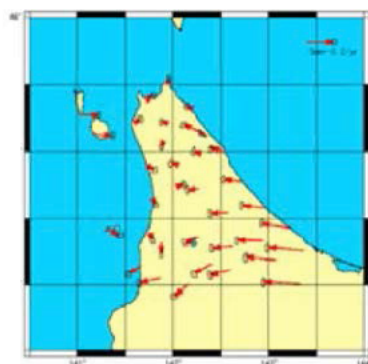


換気立坑の深度140m～240mにおいて破断ステップにより剪断センサが確認できたものを抽出した結果、数百の断層スリップデータが得られた。このデータを20m区間に分け、多重逆解析法による小断層解析を行った。その結果、深度による違いは認められず、 σ_1 軸が東西に対して反時計回りに数十度の角度を持ち、 σ_3 軸が鉛直方向に近い傾向が見られた(応力比: 0.1～0.7程度)。

換気立坑の壁面観察データを用いた多重逆解析法による小断層解析の結果

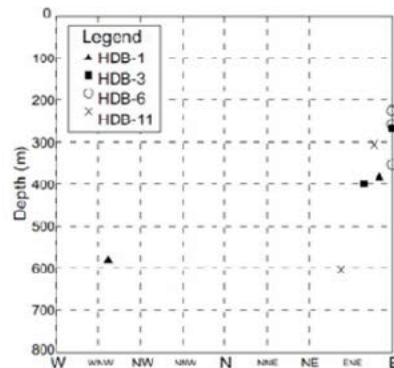


GPS観測点



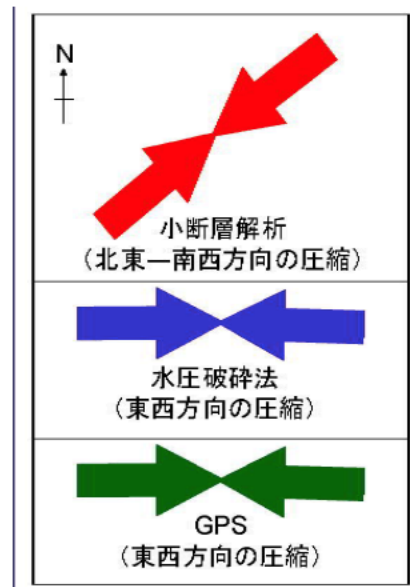
水平変位速度

GPS観測点と水平変位速度ベクトル



水圧破砕法による最大主応力軸はほぼ東西方向である(真田ほか, 2008)。

地上のボーリング孔での水圧破砕法による最大主応力方向

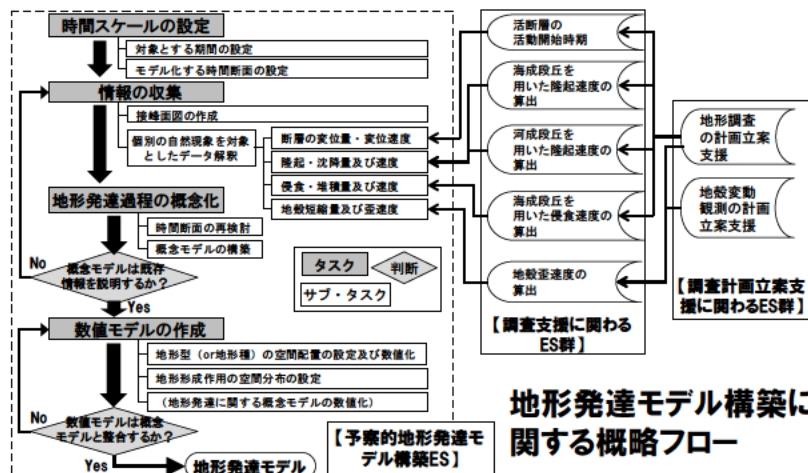


- 現在の応力状態(GPS、水圧破砕法)と、小断層解析で得られた応力方向の差異は、褶曲運動によるものであり、小断層形成時(褶曲開始前)と現在の応力場は同じ

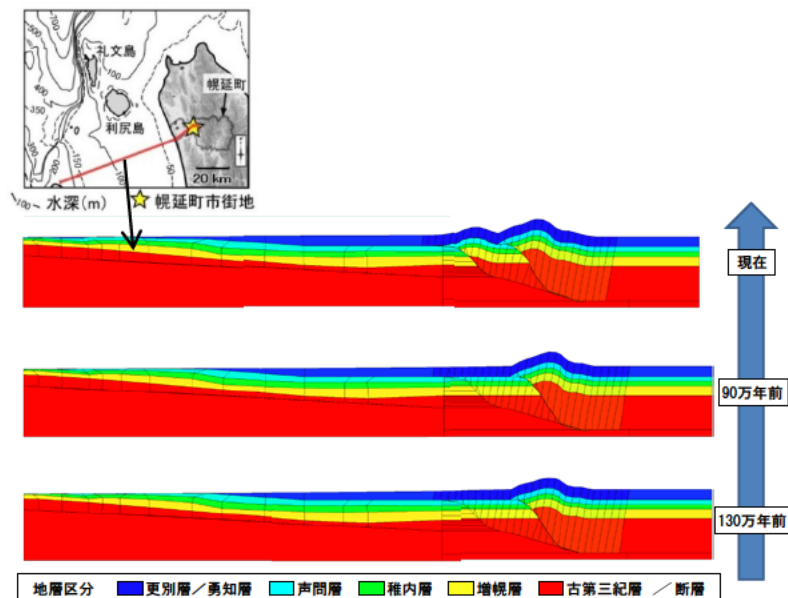
応力状態の差異の要因検討と、それに基づく応力変遷の推定手法の構築が必要

形・地質の
築のため
システム

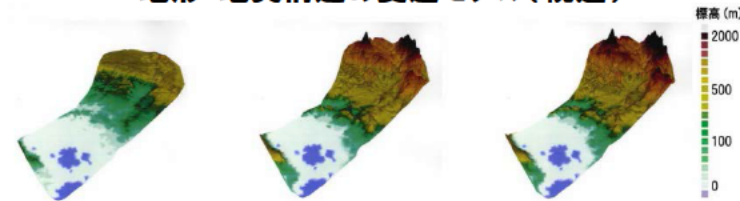
**地質環境モデル(地形・地質の
変遷モデル含む)構築のため
のエキスパートシステム**



地形発達モデル構築に 関する概略フロー



地形・地質構造の変遷モデル(幌延)



周辺山地の隆起開始頃

20 万年前

現在

既存情報に基づいて概括的に推定した木曽山脈から伊勢湾までの古地形(時間断面)

25