

地熱発電導入拡大研究開発

地熱発電高度利用化技術開発

# 地熱貯留層設計・管理のための 耐高温・大深度地殻応力測定法の実用化

伊藤 高敏

(国)東北大学

2023年2月2日

【委託先】

(国)東北大学  
(株)物理計測コンサルタント  
応用地質(株)

問い合わせ先

東北大学流体科学研究所  
伊藤高敏

E-mail: [ito@ifs.tohoku.ac.jp](mailto:ito@ifs.tohoku.ac.jp)

TEL: 022-217-5234

# 事業概要

## 1. 背景・目的

- 地下深部からの地熱流体の上昇が、既存の断層に沿って起こっており、その断層の中でも面に作用する応力が臨界状態にあるものが主要な役割を担っていることが、地熱を対象にした数多くの研究で明らかになっている。
- このため、地殻応力に基づいて地熱開発を行うことが、生産井の成功率を高め、貯留層の持続性を向上させるなど、調査から運用に至る様々な段階の大きなコスト削減につながると期待されている(例えば、米国エネルギー省, GeoVision, 2017)。
- そこで、超臨界地熱を対象としたNEDO研究開発プロジェクト(フェーズ I、2018～2020年度)では、大深度かつ高温な岩体の地殻応力測定を実現するための新しい方法(二重解放コア変形法)の原理の検証を行い、それを具体化する技術(二重ビットコアリング)の開発に成功した。
- これを踏まえて本プロジェクト(フェーズ II)では、現実に即したシビアな掘削環境とコストを考慮し、同方法を信頼性・堅牢性のあるものに完成させるための研究開発を行う。

## 2. 実施期間

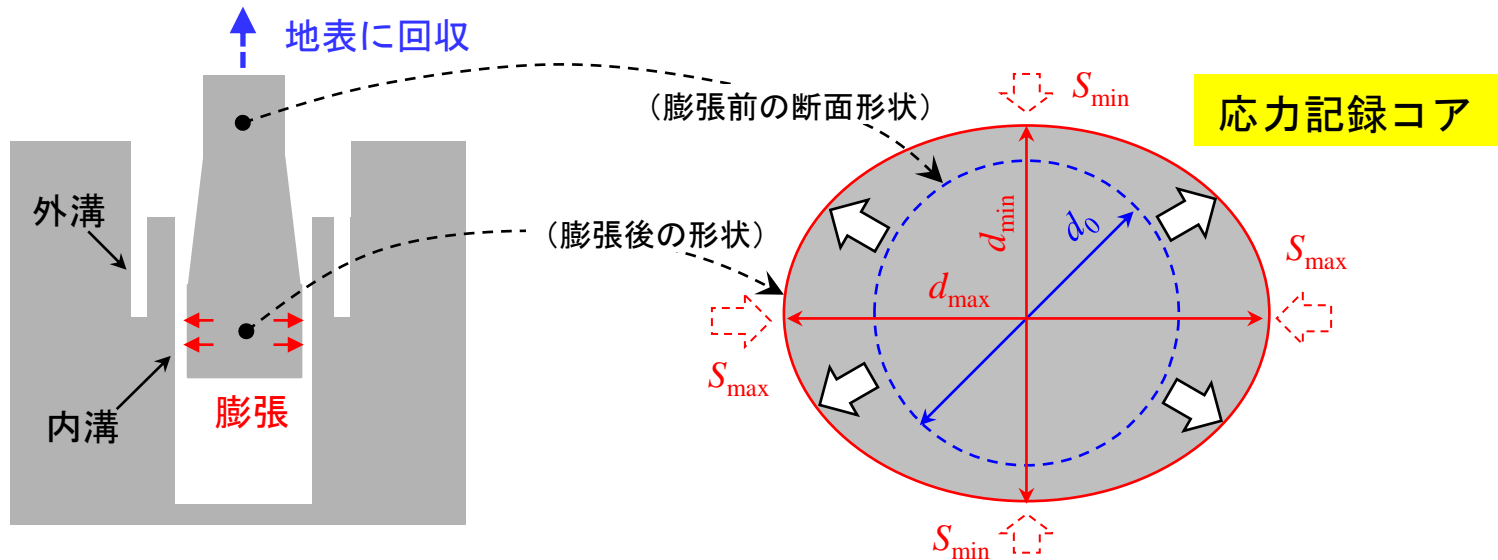
開始 : 2021年6月

終了(予定): 2024年3月

# 新たな原理に基づく応力測定法：二重解放コア変形法

## 二重ビットコアリングとコア

## 地表に回収されたコアの断面形状



変形後の形状 - 変形前の形状 = 変形量  $\longleftrightarrow$  地殻応力

- 原位置試験が不要
- パッカーやひずみゲージ等の耐久性の低い部品が不要



適用深度／温度条件  
の大幅な向上

### 3. 実施内容・最終目標

本プロジェクトでは、2.5 km以上の深度で、応力記録コアを定方位で2個以上、連続的に採取でき、250℃以上の耐熱性能を有する二重コアリングツールを完成させる。また、数値シミュレーション結果に基づき、地殻応力を考慮することで調査・生産井の掘削および貯留層維持・管理に要するコストを10～20%削減できることを明らかにする。これらを達成するために下記のテーマ①～③の研究開発を実施する。

#### ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

2つの方式(ワイヤーライン型および改良ロッド型)による二重ビットコアリングツールを開発してコア掘削試験を行い、性能評価と課題を抽出し、それを踏まえた改良を行ってコアのマルチ化を実現する。

#### ② コア方位測定方法の開発

耐熱性があるメモリ記録型の方角測定器を開発する。さらに、その測定器を①の二重ビットコアリングツールと組み合わせてコアチューブの方角を測定する方法を開発する。

#### ③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

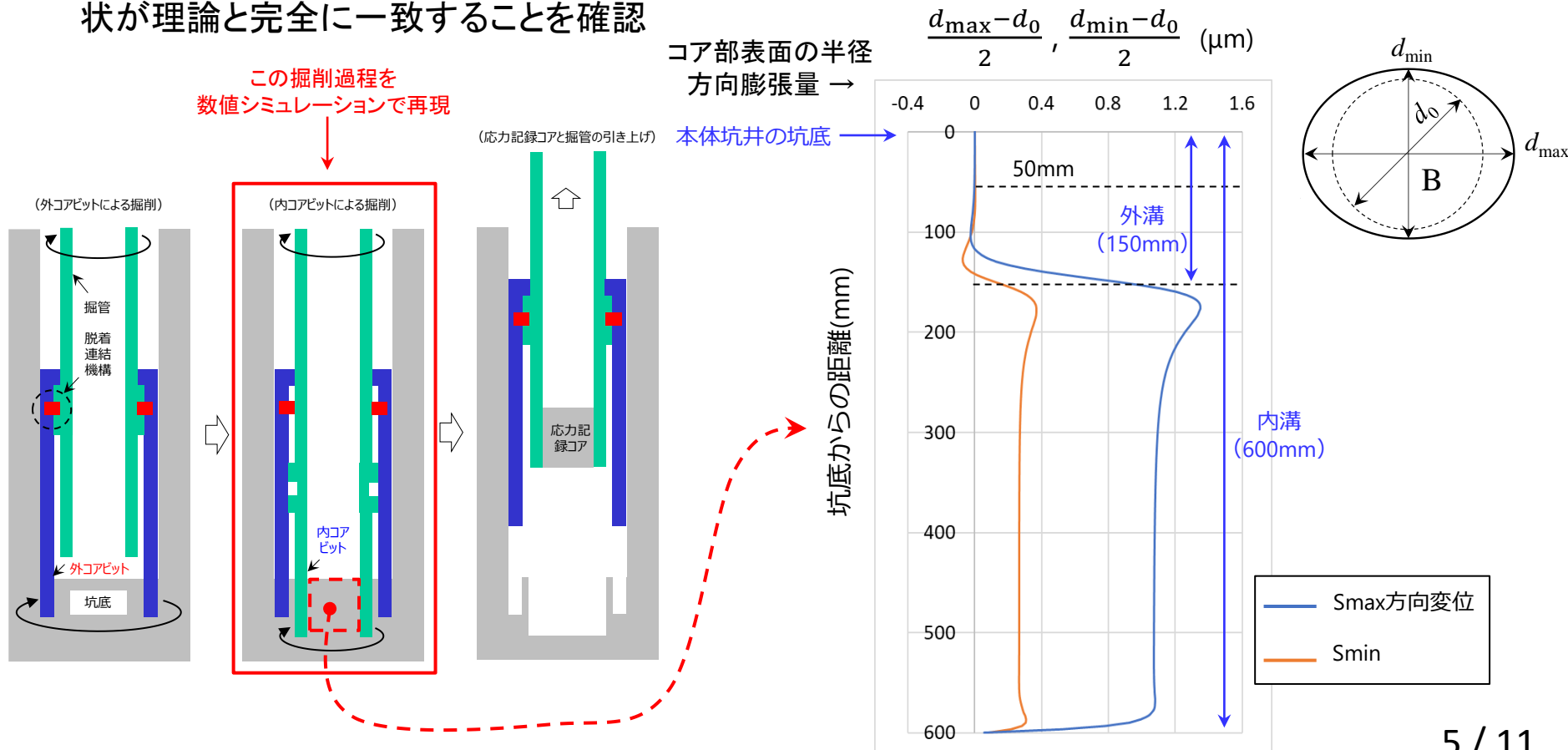
地殻応力が調査・生産井の掘削等にもたらす効果を、数値シミュレーションによって定量化する。また、断裂系の地熱貯留層を模擬する数値モデルを作成し、地熱流体の分布、効率的な生産井の配置、生産量の変化などに対する地殻応力の影響を明らかにする。

# 研究成果

## テーマ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

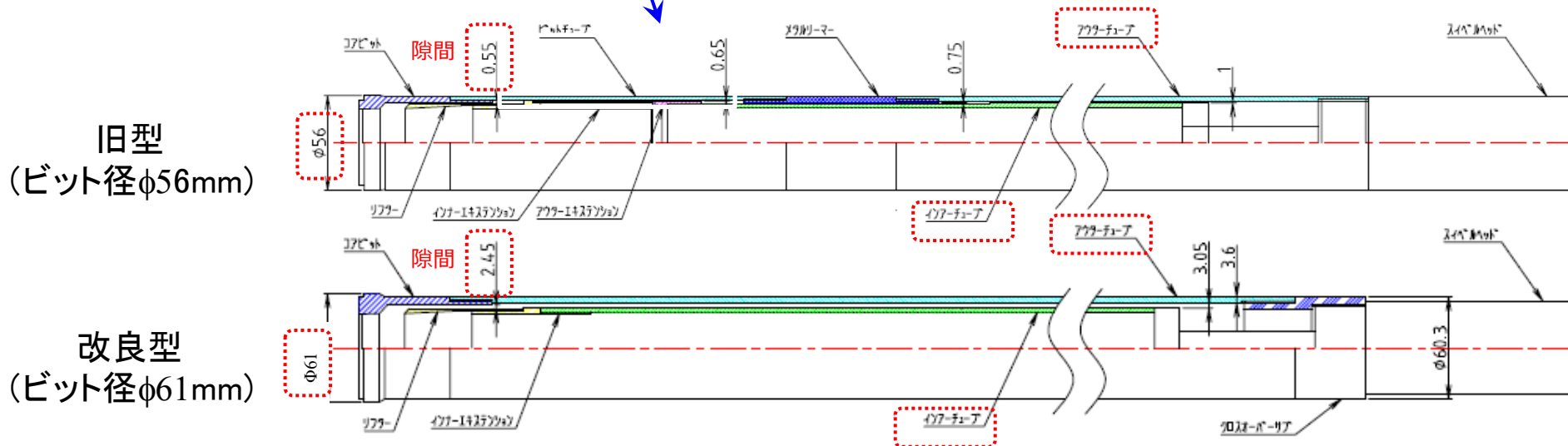
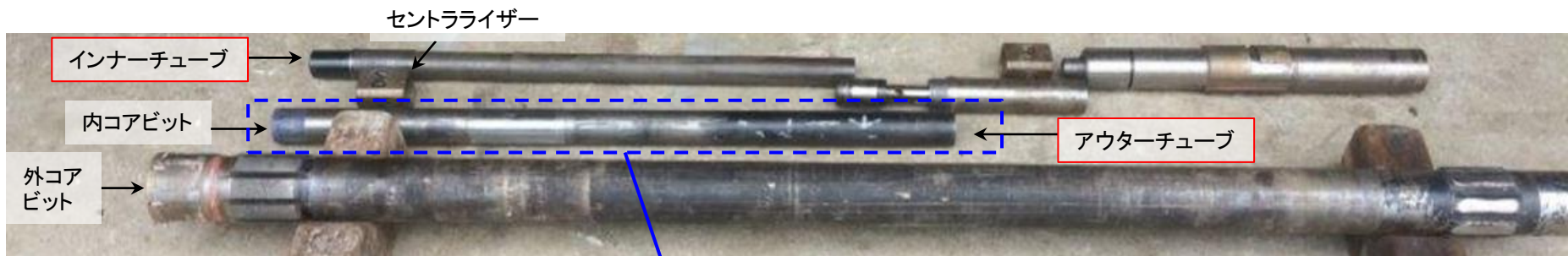
### ● 二重ビットコアリングで採取されるコア形状の数値シミュレーション

- 外コアビットによる掘削後に内コアビットでコアを切り出す過程を数値シミュレーションで再現し、コアの断面形状を評価
- 想定通りに外溝部分では膨張せず外溝から下側に離れた部分で膨張し、その膨張した断面形状が理論と完全に一致することを確認



● ツールの泥水対応改良

- 前プロジェクト(フェーズ I)で製作したツールは、坑道から掘削した浅い坑井での試験を前提としていたので清水掘削を想定
- しかし、実坑井では泥水掘削となるので、それに合わせてツール構造を変更
- 地表設備による泥水循環試験および神岡鉱山における泥水掘削試験を行って検証



# 地表設備(NLC社水戸工場)による泥水循環試験に成功(2021/12/6~12/9)

試験設備全景



泥水タンクに珪砂を少量ずつ投入



抗口の配管状況



# 神岡鉱山の鉛直坑井を用いた掘削試験に成功(2022/2/28~3/4)

掘削状況

試験サイトの全景(被り550m)



ボーリングマシン

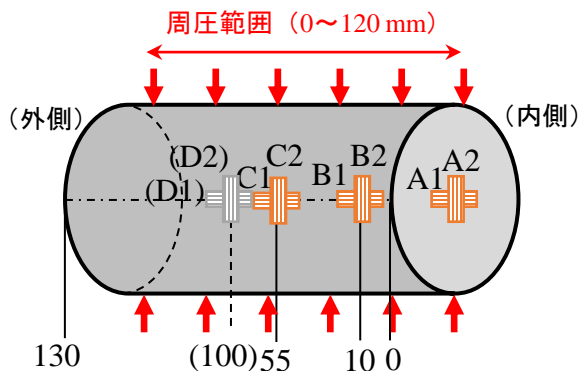


● 可搬型ヤング率測定機の開発と検証

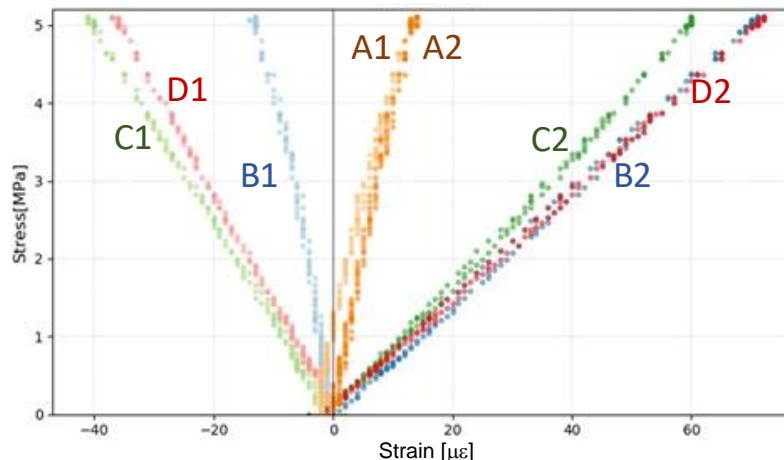
- コアの断面形状は現場測定が可能だが、それから応力を算出するためにはヤング率が必要
- しかし、従来の測定法では試験片作成と実験室設置型の装置を用いた力学試験という煩雑な作業が必要で、掘削現場での測定が不可能
- 応力を算出してみないと採取されたコアの良否がわからず、コアの取り直しすべきか現場で判断できない
- そこで、小型で持ち運び可能なヤング率測定機を考案し、室内実験で原理を検証
- これはコアに負荷した周圧とひずみゲージで測定したコアの変形からヤング率を求めるものであり、新たな試験片作成を要せず、コアそのものを用いてヤング率を測定可能

既存の装置と模擬コア(φ66mm)を用いた予備実験の結果

ひずみゲージ(クロス型)貼り付け位置  
(側面 番号1:軸方向、2:周方向)



封圧(縦軸)とひずみ(横軸)の関係



- $E=56\sim 61\text{GPa}$
- 一軸圧縮試験( $E=56\text{GPa}$ )と整合



# 研究成果

## テーマ② コア方位測定方法の開発

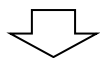
- 耐熱性と形状が適した方位測定器を市場調査してVES Survey International社の製品を選定
- 外径約φ45mm、ヒートシールド付きで204°C×8hの耐熱性
- 下記のいずれかの方式で二重ビットコアリングツールと組み合わせることを検討

### ・ ツール内蔵方式

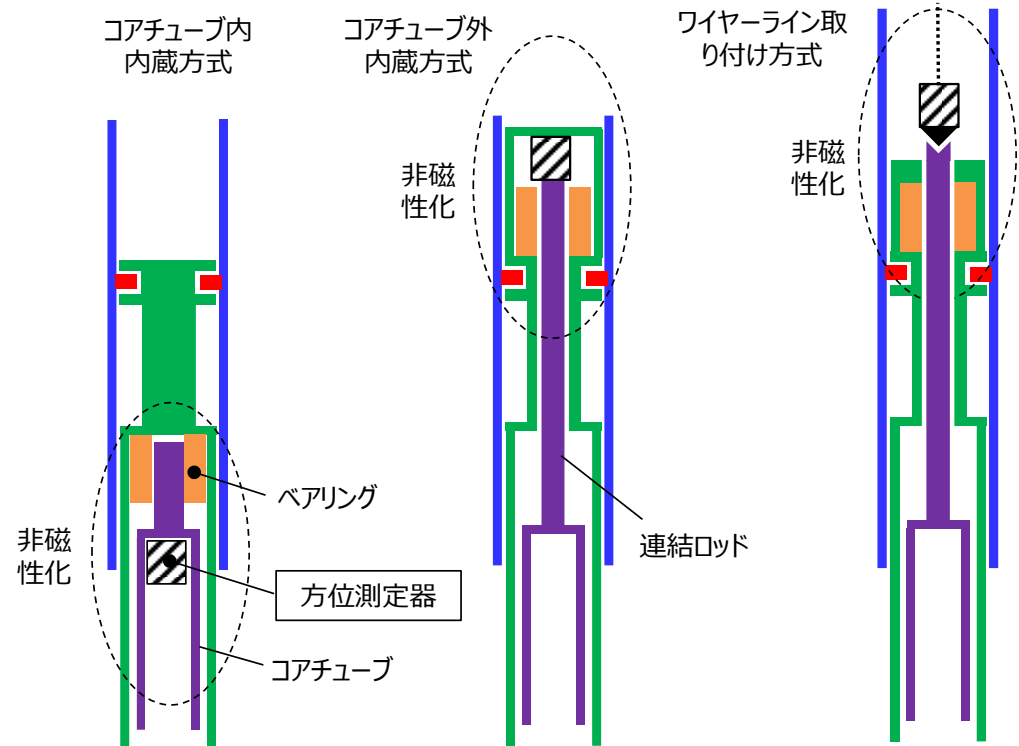
二重コアリングツールの中に方位計を組み込んでコアチューブの方位を測定

### ・ ワイヤーライン取り付け方式

地表から自由落下あるいはワイヤーラインで降ろした方位計を一時的に二重コアリングツールと連結させて方位を測定



作業が繁雑になるが、坑内滞留時間を短くできるので耐熱温度の向上が期待

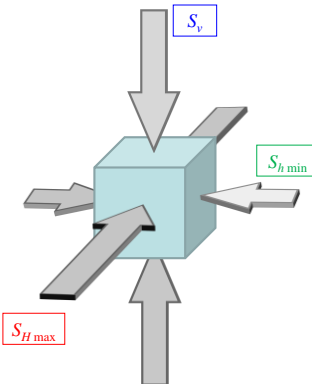
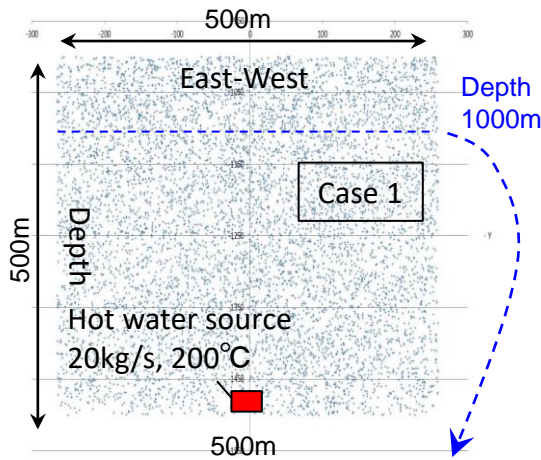


# 研究成果

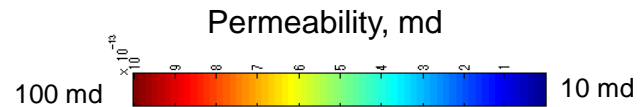
## テーマ③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

- 断裂系の地熱貯留層を模擬する数値モデルを作成し、地熱流体の上昇過程を再現
- このため、国内の地熱地帯を構成する熱源および貯留層と断裂構造を調査
- せん断型貯留層シミュレータ“SHIFT”(JAPEX)によるシミュレーションを試行

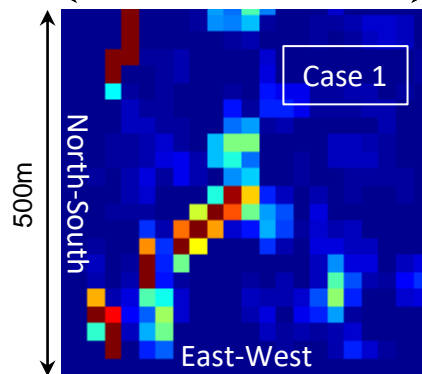
→  
せん断すべりが  
起きた既存き裂  
の分布  
(7835枚:  
全18250枚)



試行した3D数値シミュレーション  
結果の例

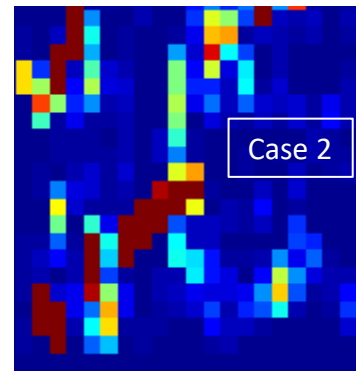


**Case1**  
横ずれ断層系応力場  
せん断後90%  
閉塞応力100MPa



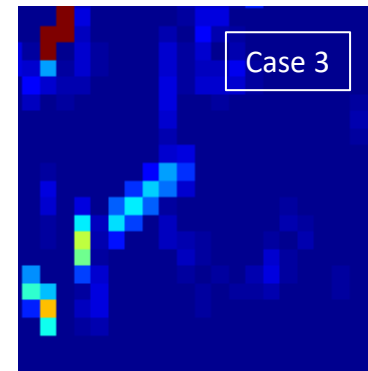
$$(S_{Hmax} > S_v > S_{hmin})$$

**Case2**  
正断層系応力場  
せん断後90%  
閉塞応力100MPa



$$(S_v > S_{Hmax} > S_{hmin})$$

**Case3**  
正断層系応力場  
せん断後90%  
閉塞応力30MPa



$$(S_v > S_{Hmax} > S_{hmin})$$

→  
深度:1000mにお  
ける水平断面の  
浸透率分布

# 今後の予定と課題

## テーマ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

- 地殻応力状態がより正しくコア断面形状に記録されるようにコアビットを改良
- マルチ二重ビットコアリングツール(ワイヤーライン型および改良ロッド型)を具体化
- 地表から掘削した実坑井および神岡鉱山の坑道から掘削した坑井を用いて開発したツールの掘削試験を実施

## テーマ② コア方位測定方法の開発

- 購入した方位測定器を二重ビットコアリングツールと組み合わせる方法の具体化
- 掘削試験による動作検証

## テーマ③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

- 国内の地熱地帯を構成する熱源および貯留層と断裂構造を踏まえた断裂貯留層モデルの作成
- 同モデルによるシミュレーションを実施して断裂に沿った透水性が地殻応力によって変化する挙動、さらに断裂に沿った透水性の違いが地熱流体の上昇過程に及ぼす影響を評価