

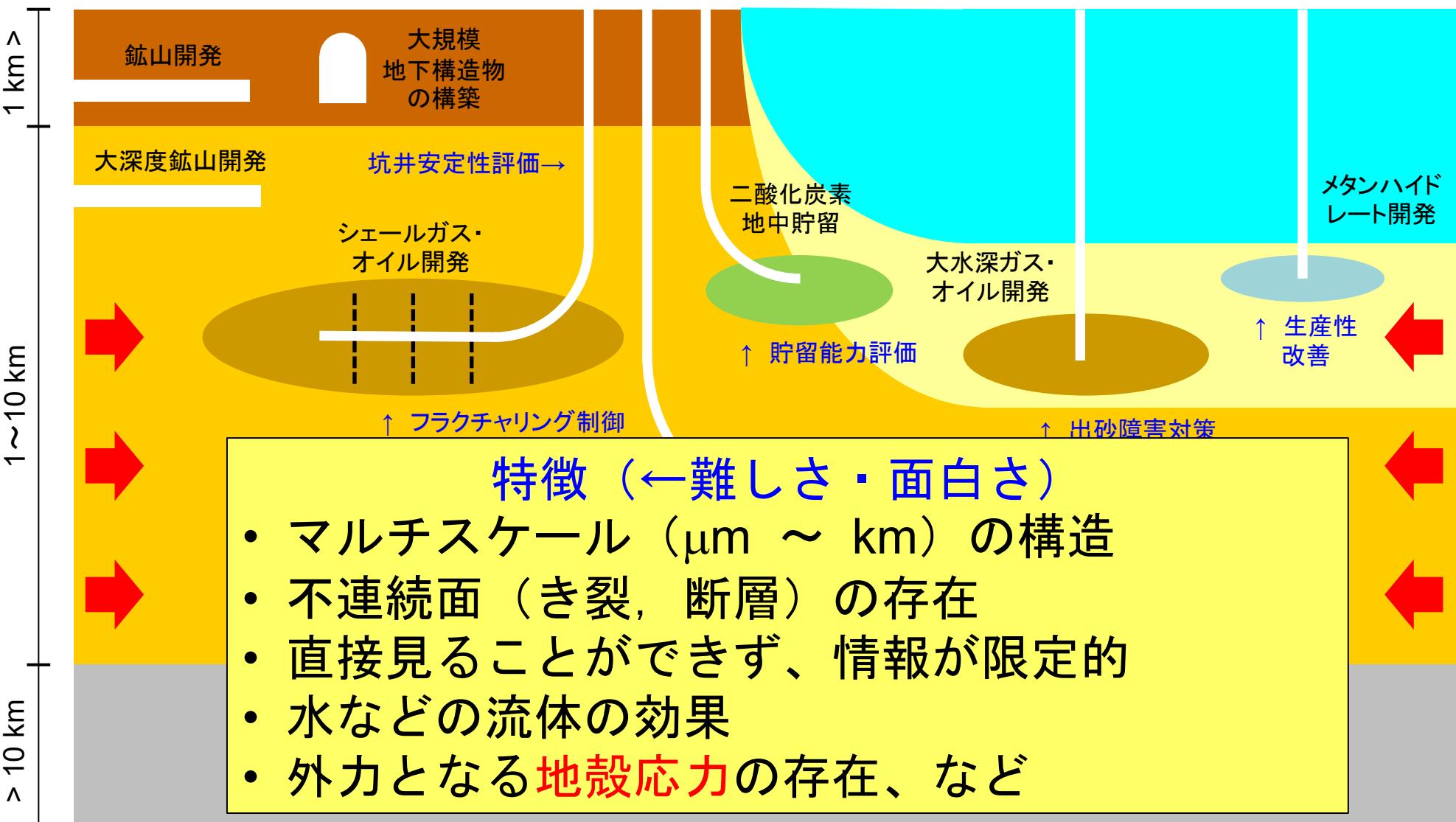
径違いのビットを切り替えて行う
二重ビットコアリング(Dual-bit Coring, **DBC**)による
地殻応力測定法の開発
～地熱開発への応用展望～

伊藤高敏
東北大学流体科学研究所

自身の研究分野

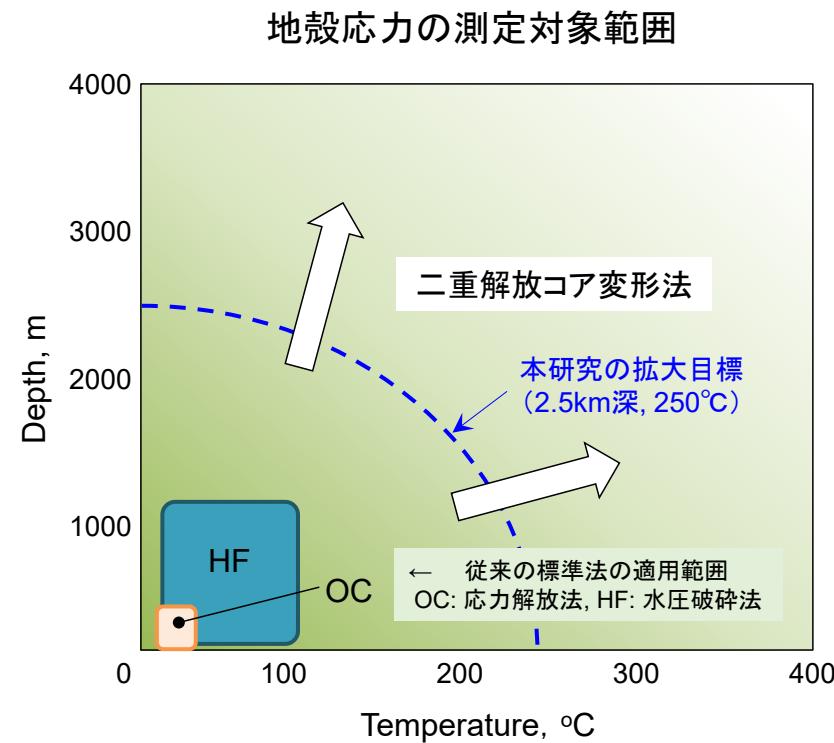
- 岩石にかかる力と、それに派生する動き(変形、破壊など)の学問体系(Rock Mechanics; 岩石力学)
- 地層にかかる力と、それに派生する動きの学問体系(Geomechanics; ジオメカニクス)

深度

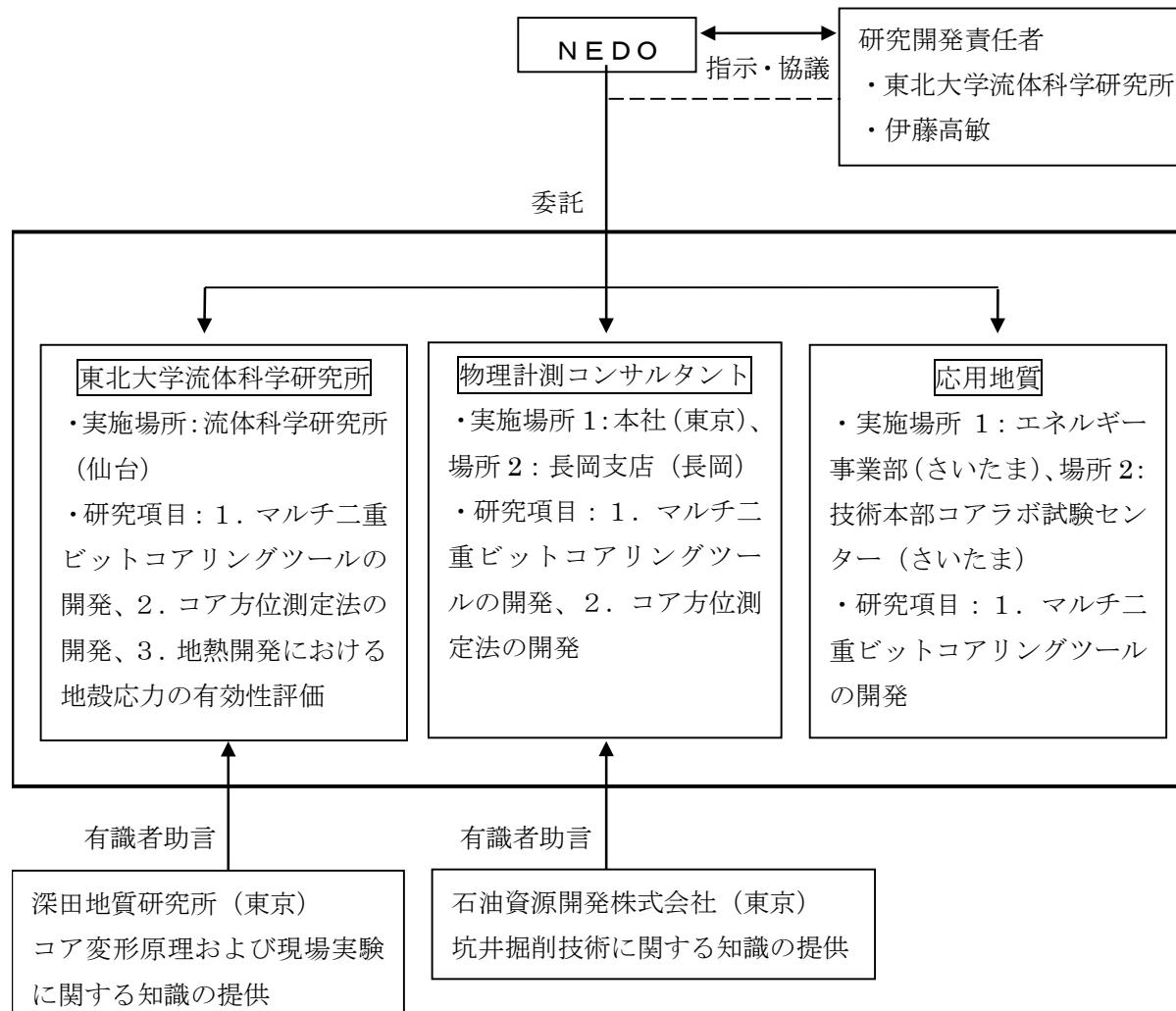


DBC法を開発したNEDOプロジェクトの背景と目的

- 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、初めのNEDO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、Dual Bit Coring, DBC）を提案・検証した。
- これを踏まえて、後継のNEDOプロジェクト（フェーズⅡ、2021～2024年度）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°C以上の耐熱性能**を有するDBCツールを完成させた。
- 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%以上削減**できることを明らかにした。



NEDOプロジェクトの実施体制



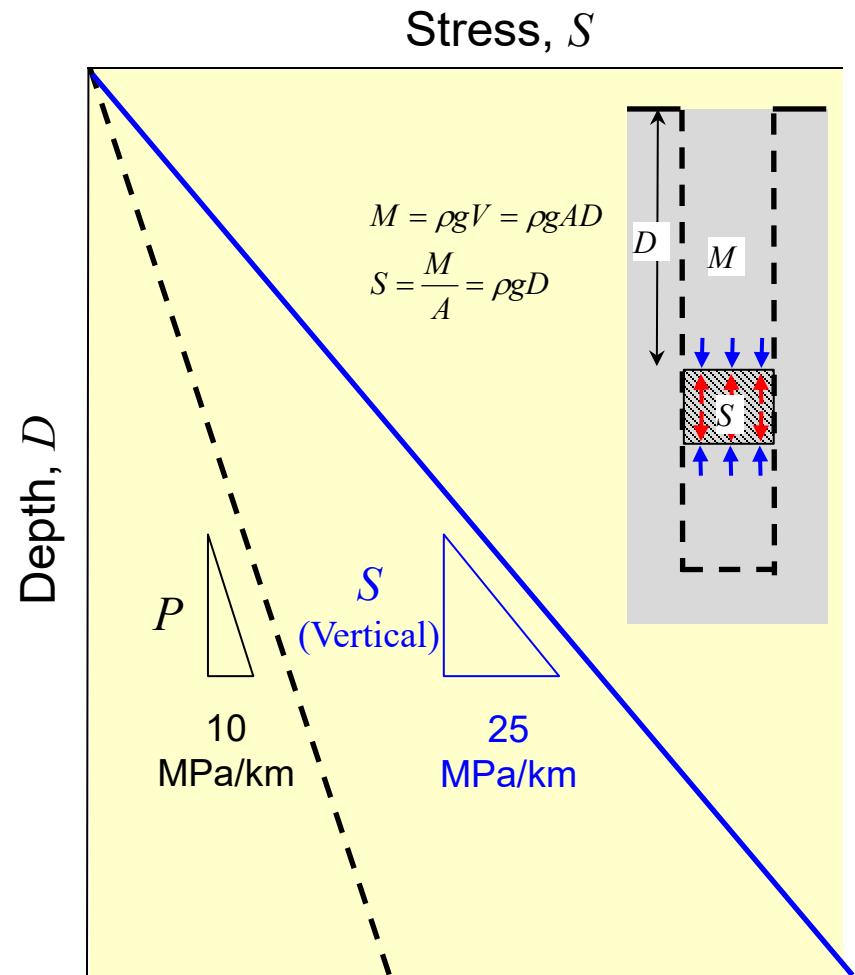
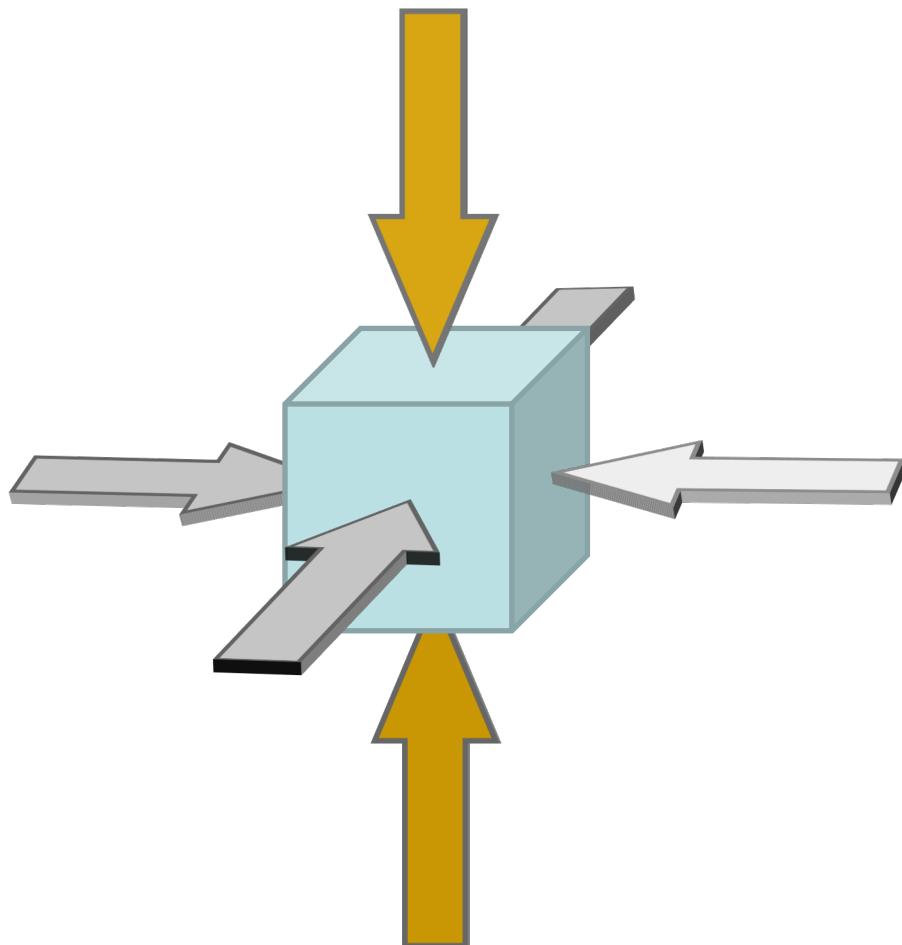
本日の発表内容

1. 地殻応力とその特徴
2. 地熱流体の流れと地殻応力の関係
3. 新しい地殻応力測定法(DBC法)の原理
4. 測定ツールの開発と実証

本日の発表内容

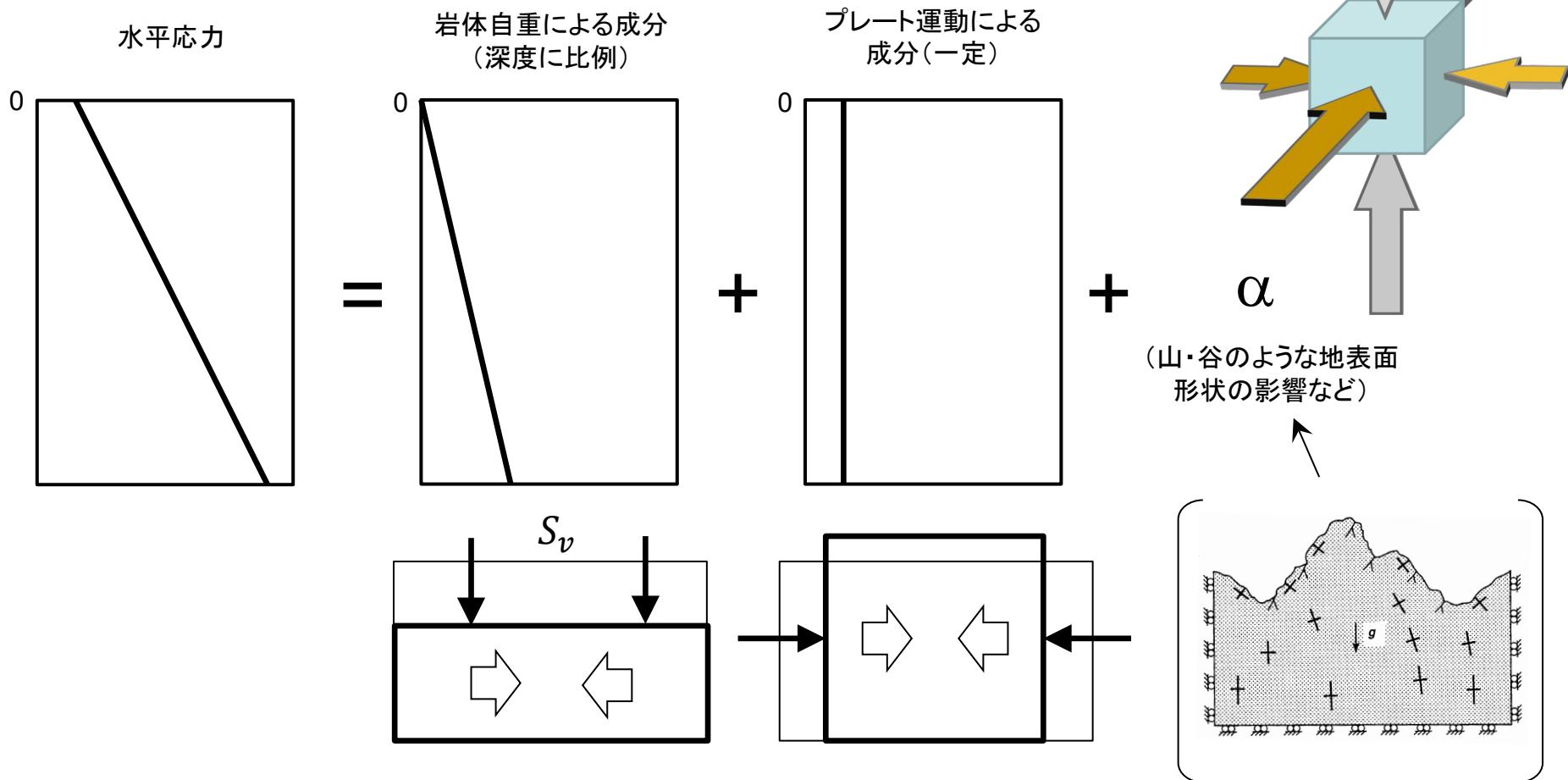
1. 地殻応力とその特徴
2. 地熱流体の流れと地殻応力の関係
3. 新しい地殻応力測定法(DBC法)の原理
4. 測定ツールの開発と実証

地殻応力(岩体に作用する応力)



- 地殻応力の鉛直成分は基本的に深度に比例して増加：勾配 25 MPa/km ,
e.g. 75 MPa at 3 km deep

水平応力の要因



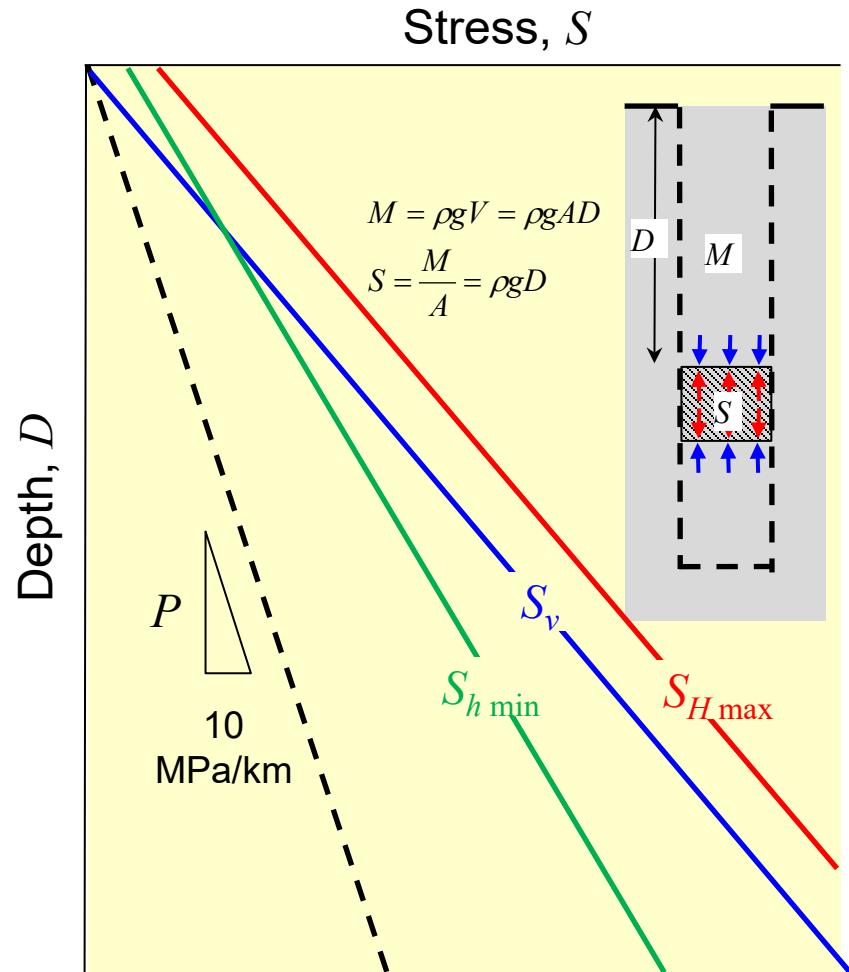
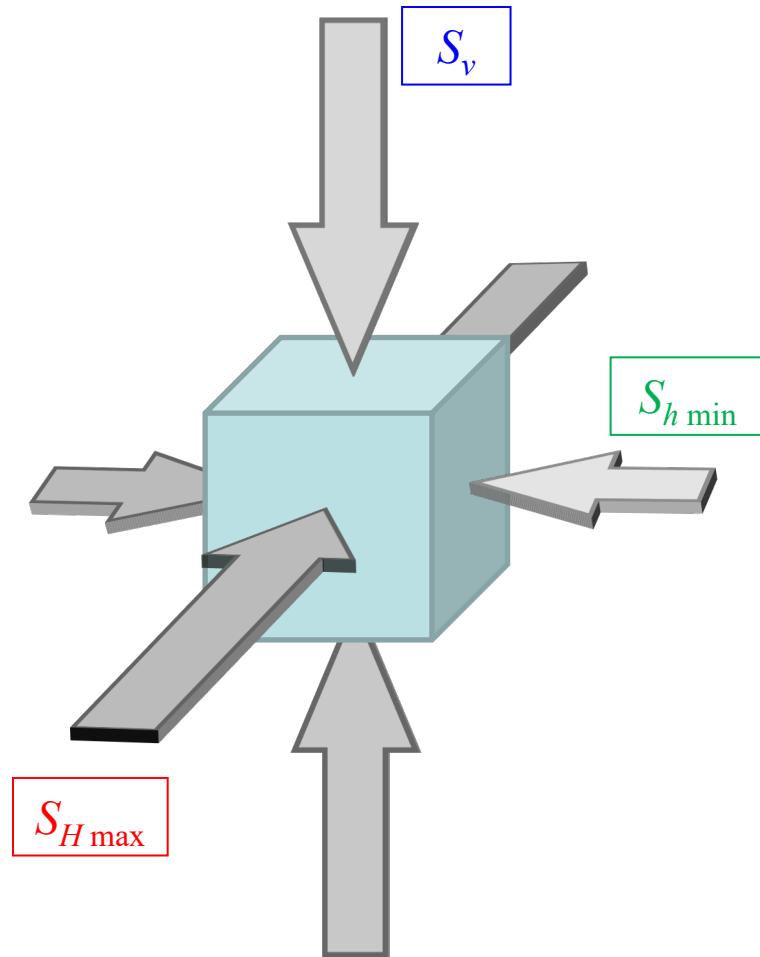
$$S_{H_average}$$

$$\frac{\nu}{1-\nu} S_v$$

間隙水圧のように深度から推定できるのは鉛直成分のみであり,
水平成分は未知で、測定しない限りわからない

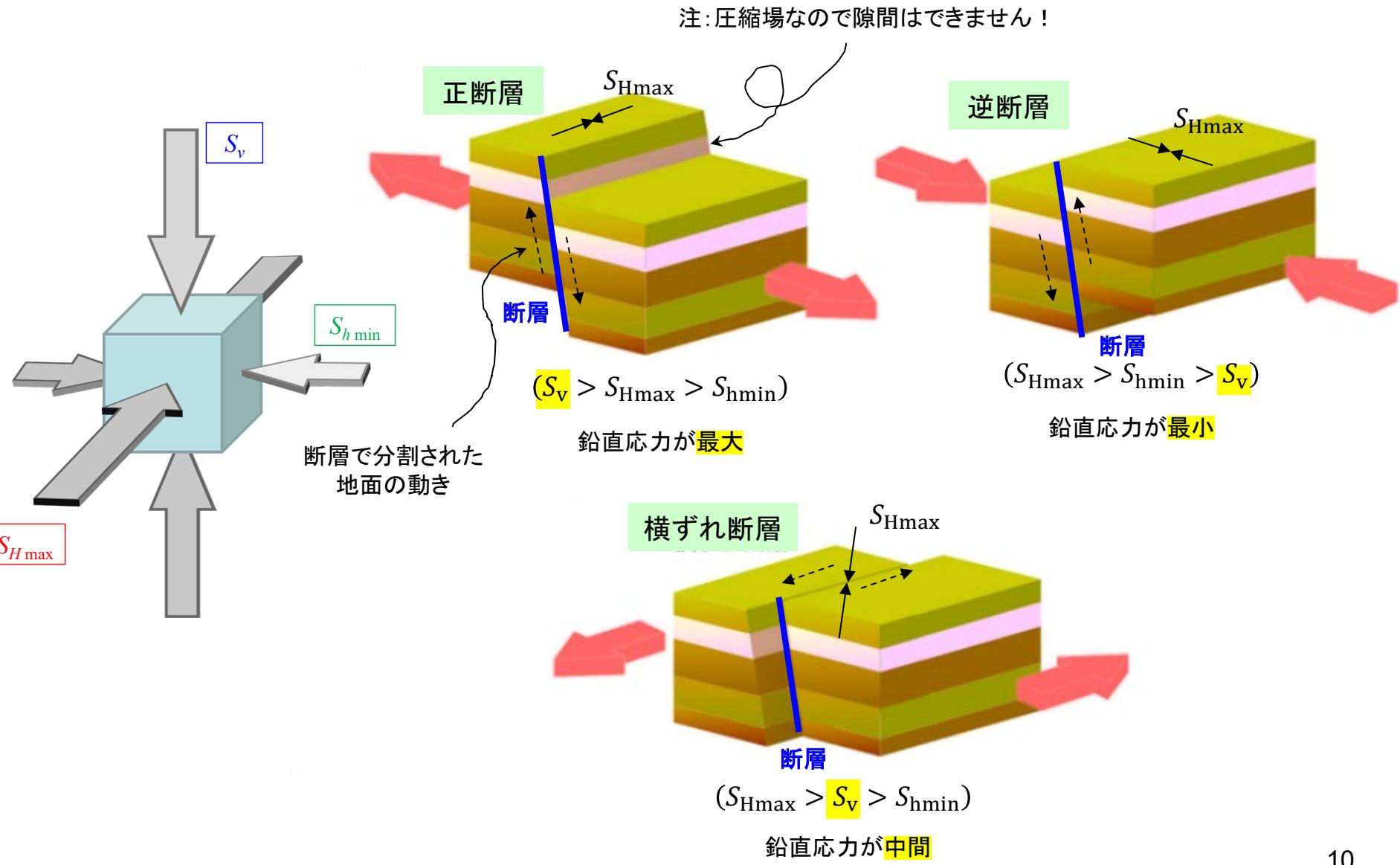
地殻応力(岩体に作用する応力)

地殻応力



- 地殻応力には方向性があり、**大きさが方向で変化**
- どの方向の成分が最大ないし最小になるかは地域によって変化
- ただし、**最小成分が間隙水圧より小さくなることはない**

断層運動に基づく地殻応力場の分類



本日の発表内容

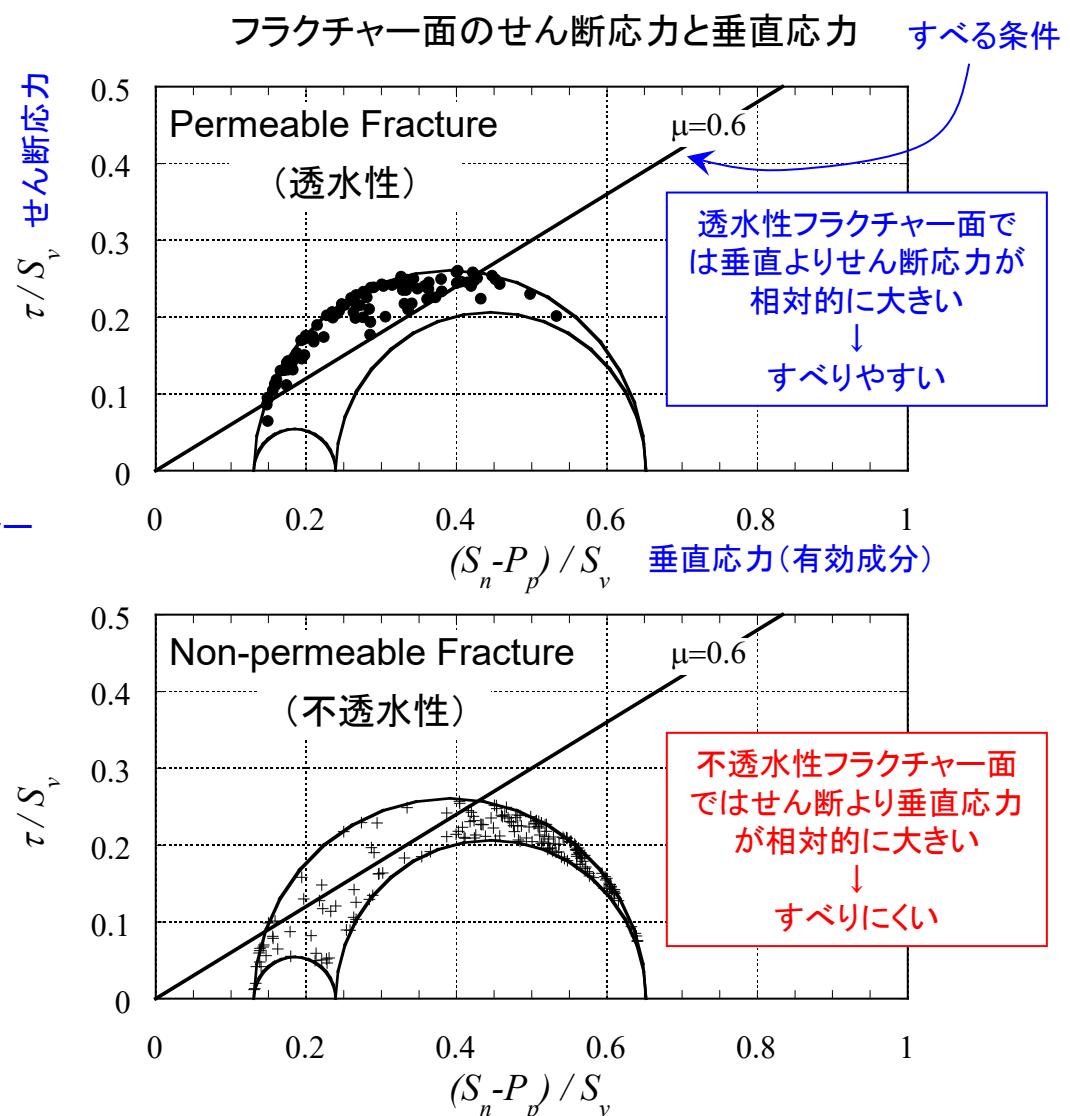
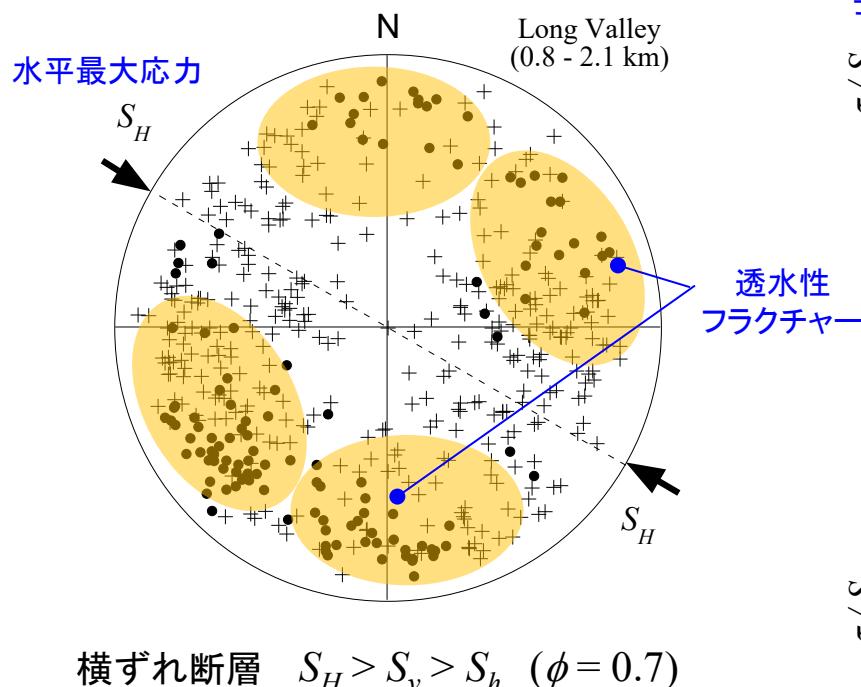
1. 地殻応力とその特徴
2. 地熱流体の流れと地殻応力の関係
3. 新しい地殻応力測定法(DBC法)の原理
4. 測定ツールの開発と実証

地熱流体の移動 ⇌ フラクチャー (割れ目) ⇌ 地殻応力

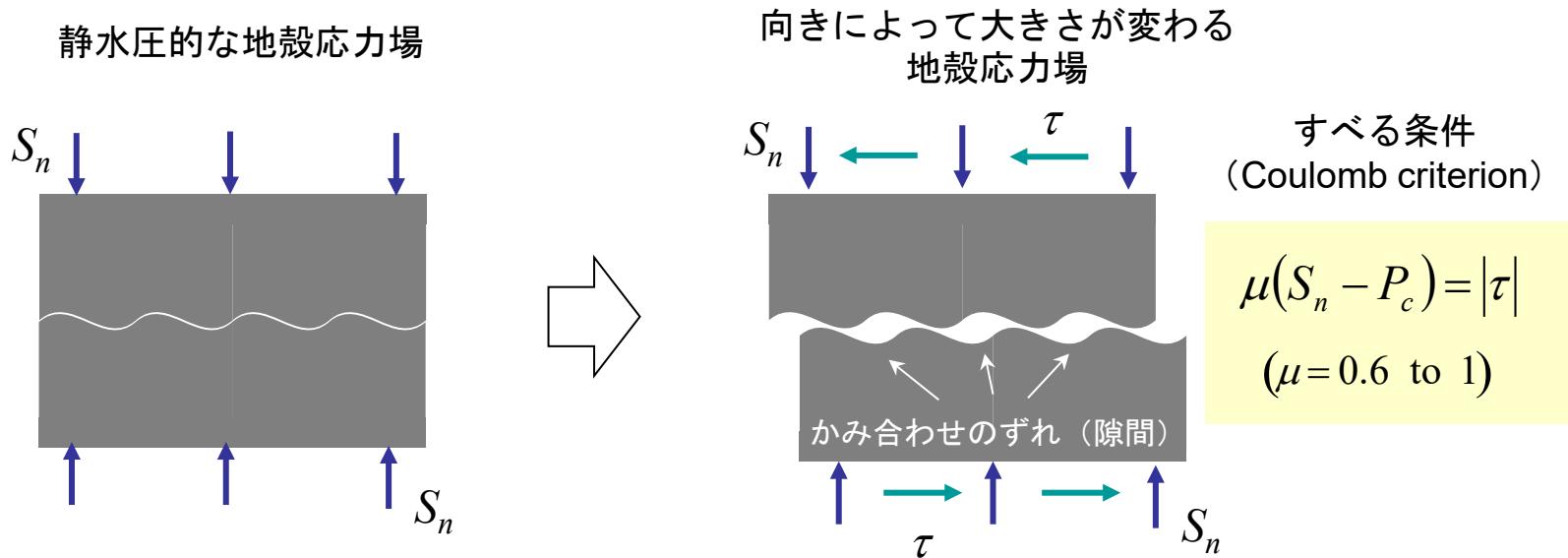
掘削坑井と交差するフラクチャーの透水／不透水性を地殻応力と比較した事例

(The Long Valley Caldera 米国地熱地帯, Barton, Zoback & Moos, 1995)

透水性(●)および不透水性(+)フラクチャーの向き(法線方向)

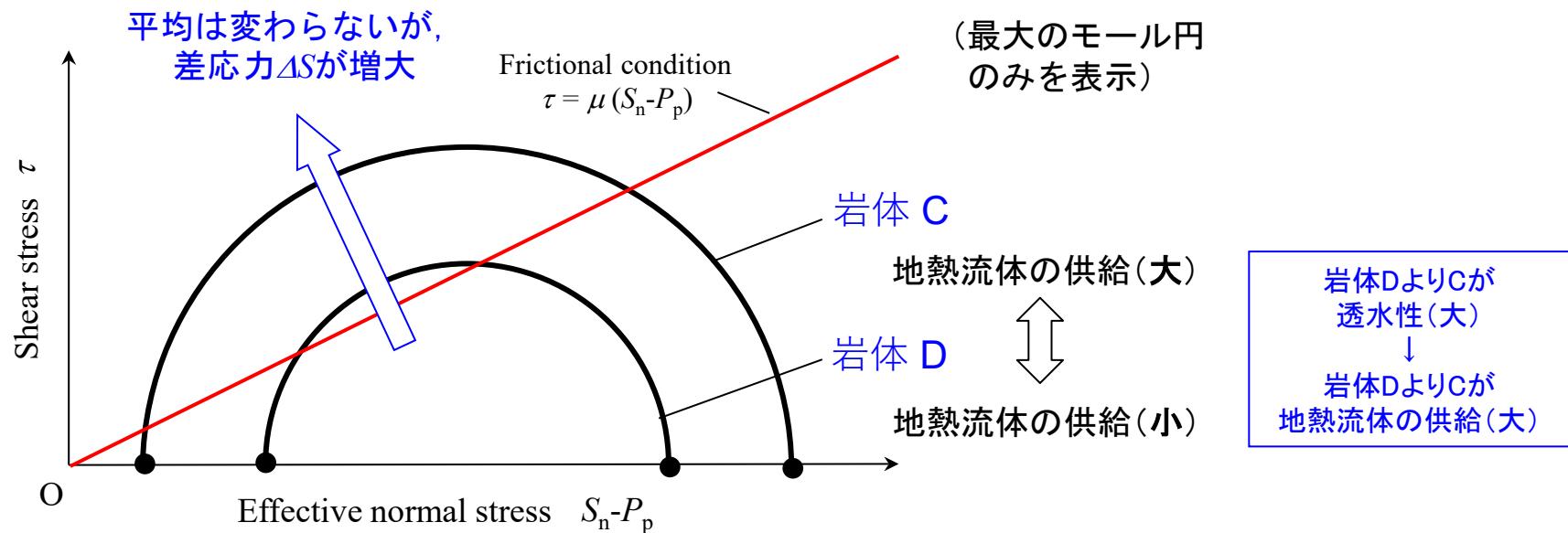
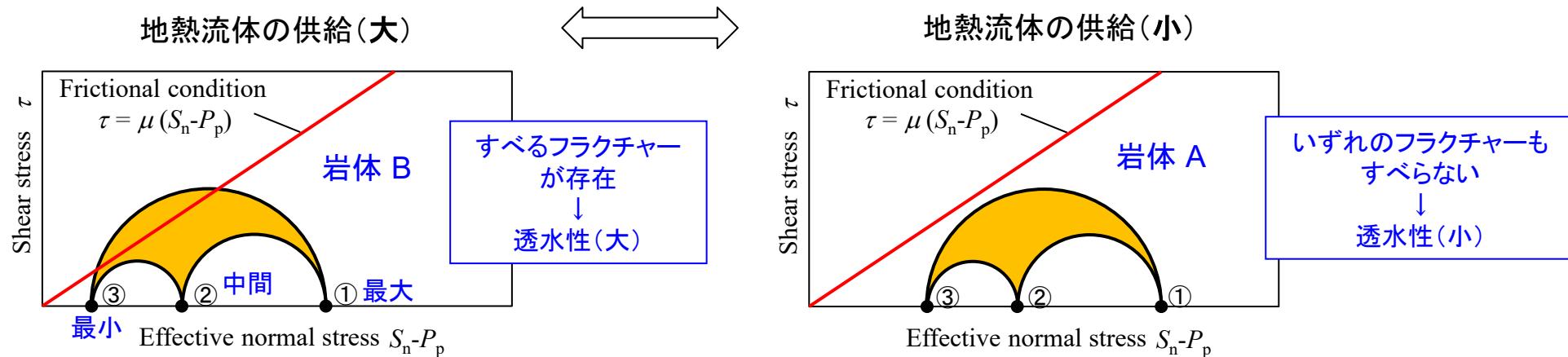


フラクチャー透水性と地殻応力の相関性の解釈



- 向きによる応力の違い（応力差）が、フラクチャー面と平行なせん断応力を発生
- せん断応力によるすべりで、フラクチャー面間の隙間が生じて透水性が増大
- せん断変形は、体積変化を起こさないので非常に大きな地殻応力下でも起こることが可能
- せん断すべりは継続して起こるので、何らかの理由でフラクチャーがいったん詰まつても、せん断すべりで詰まりが破壊され、透水性が改善

地殻応力の“大きさ”から予想される地熱流体挙動



地殻応力の“向き”から予想される地熱流体挙動

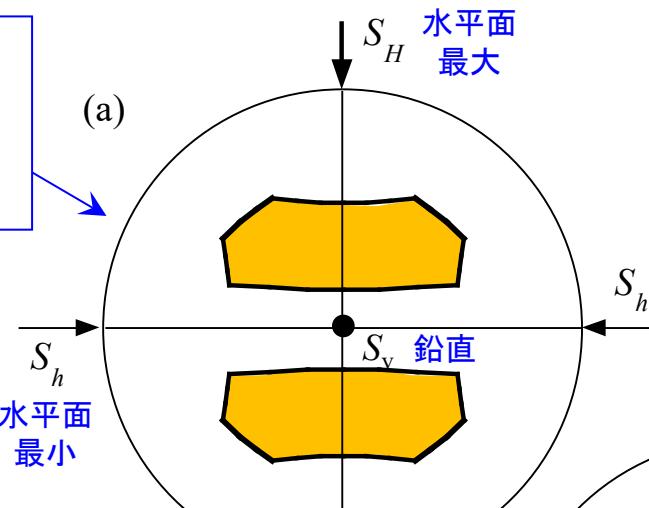
(Ito et al., PAGEOPH, 2003)

透水性フラクチャーの傾斜が水平に近い
↓
水平方向の地熱流体移動が卓越

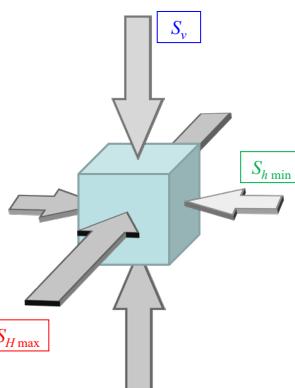
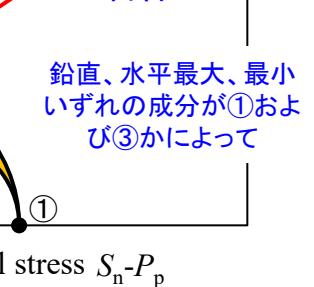
逆断層

$$S_H > S_h > S_v$$

鉛直応力が最小



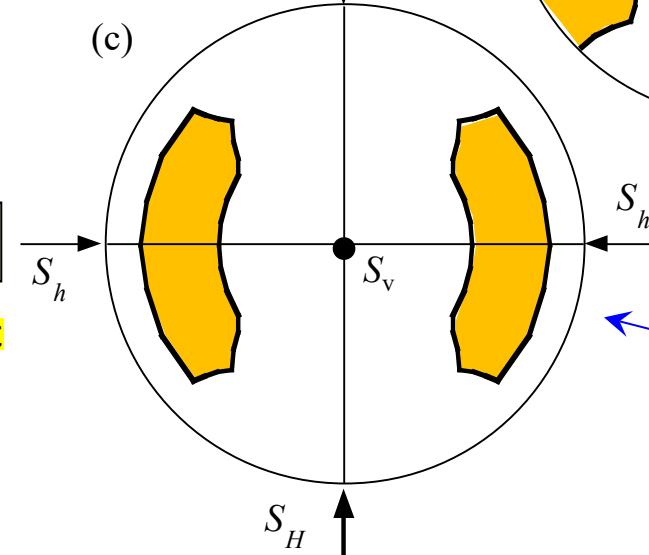
鉛直, 水平面最大／最小地殻応力軸に対して透水性フラクチャーの法線方向が取り得る範囲



正断層

$$S_v > S_H > S_h$$

鉛直応力が最大



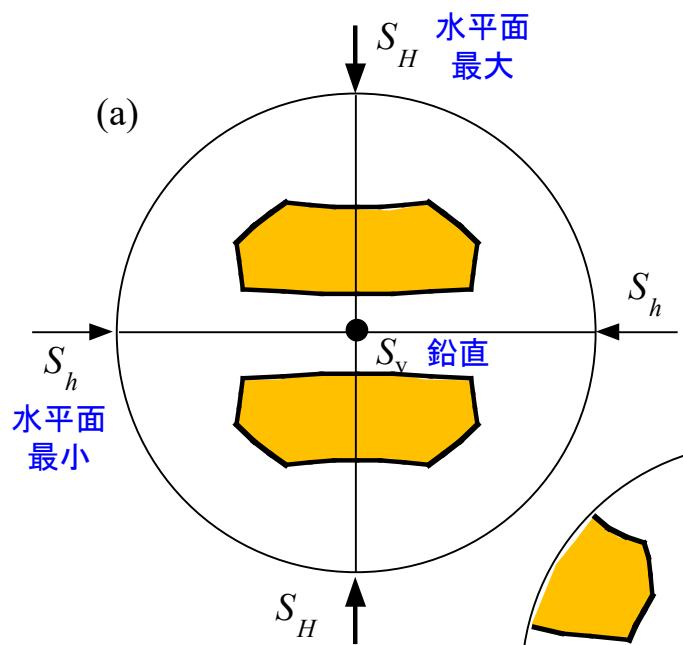
透水性フラクチャーの傾斜が鉛直に近い
↓
鉛直方向の地熱流体移動が卓越

(b)

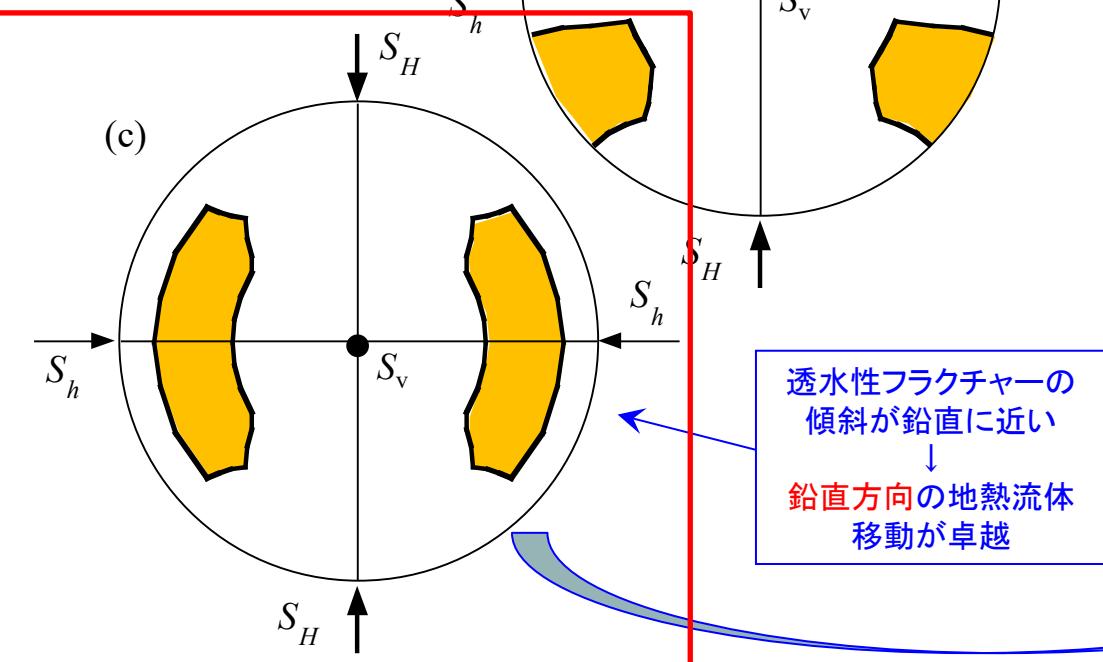
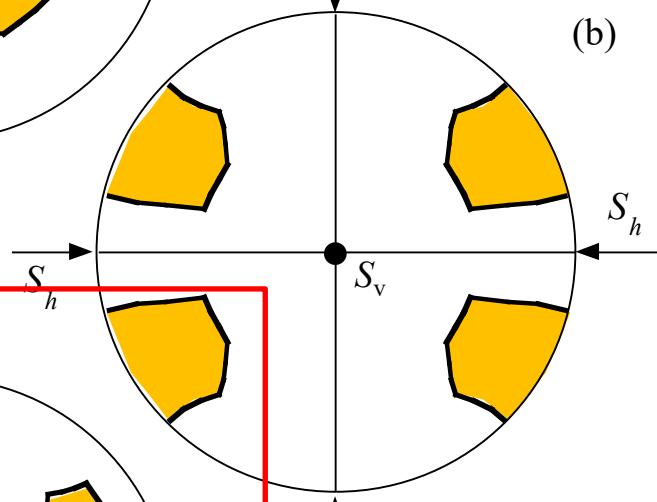
横ずれ断層

$$S_H > S_v > S_h$$

鉛直応力が中間

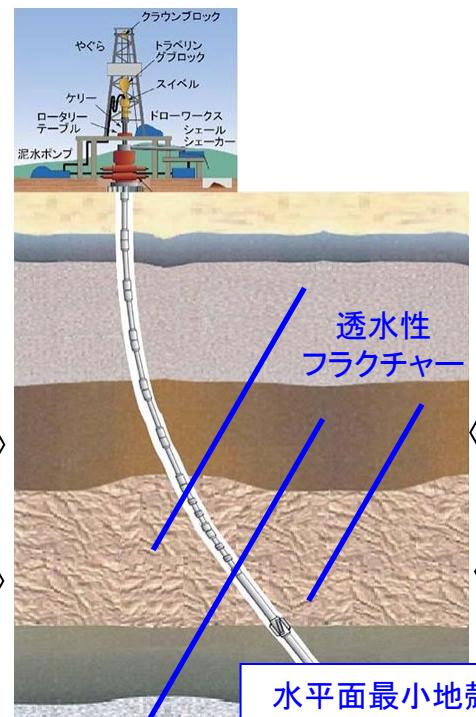


鉛直, 水平面最大／最小地殻応力軸
に対して透水性フランクチャーの
法線方向が取り得る範囲



水平面
最小

S_h

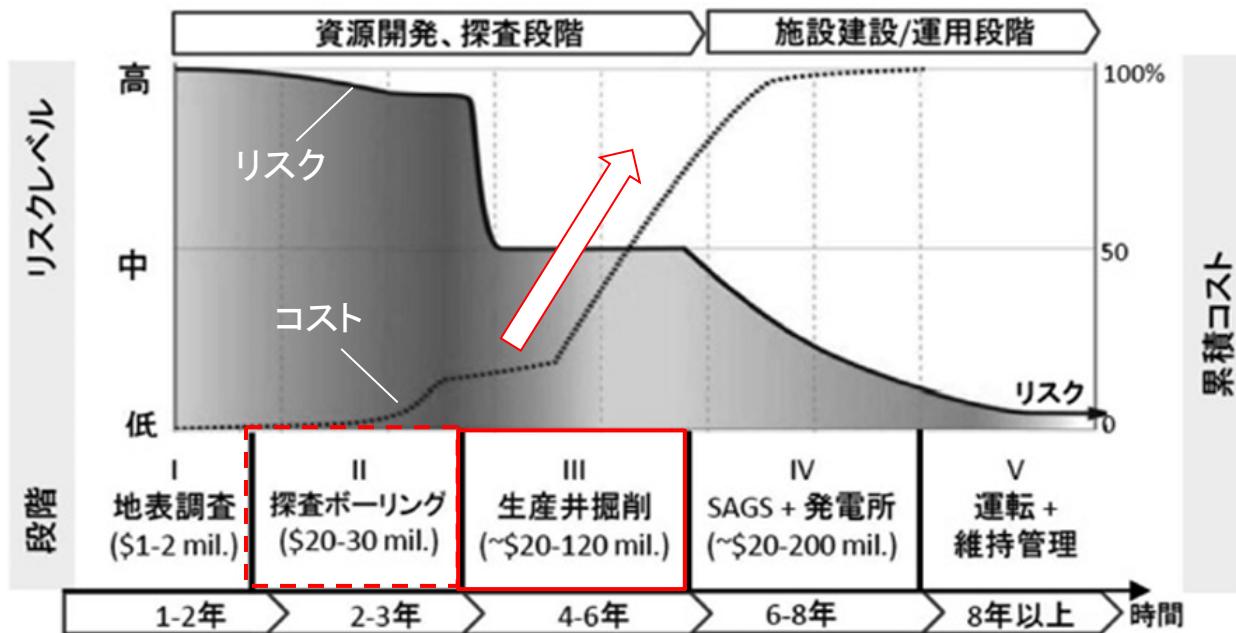


水平面最小地殻応力
の方向に傾斜掘りする
と透水性フランクチャー
に当たり易い

地熱開発のリスクとコスト

地熱開発における各開発段階のリスクとコスト

(安川ほか, 日本地熱学会誌, 2015)



- 地熱開発に占める掘削コストの割合が大きい(上図).
- このため、**地殻応力**を考慮することで掘削成功率が高くなれば全体の**大幅なコスト低減**が見込まれる.

本日の発表内容

1. 地殻応力とその特徴
2. 地熱流体の流れと地殻応力の関係
3. 新しい地殻応力測定法(DBC法)の原理
4. 測定ツールの開発と実証

新しい地殻応力測定法: DBC法の原理

(Funato & Ito, 2017)

(基本原理)

コア断面形状(d_{max}, d_{min}, d_0)

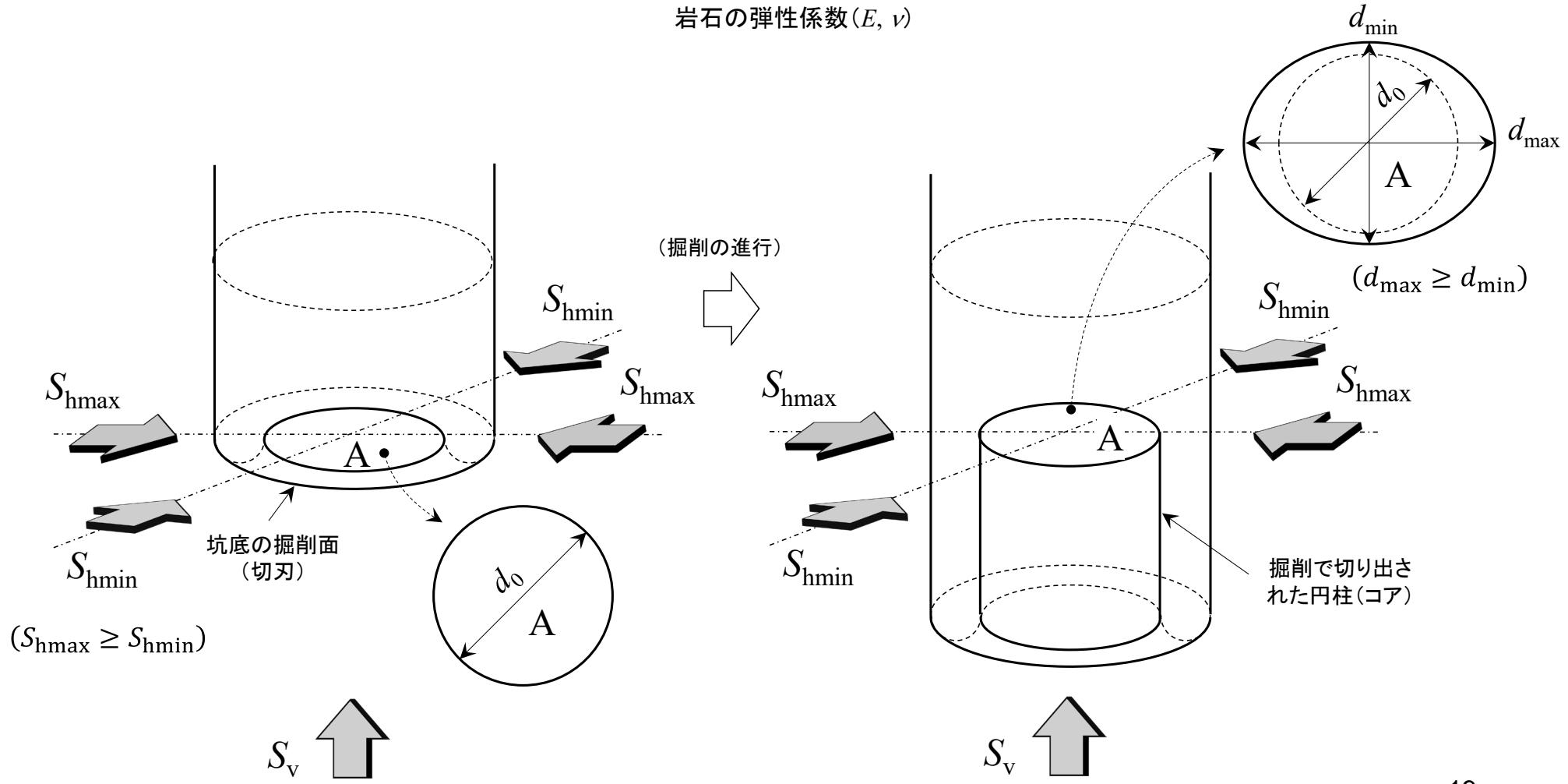
膨張ひずみ

地殻応力

地殻応力の差

通常得られるコアは全体が膨張後の
形状(d_{max}, d_{min}). そこで膨張前の形状
(d_0)も得られるように掘削要領を改良

岩石の弾性係数(E, ν)

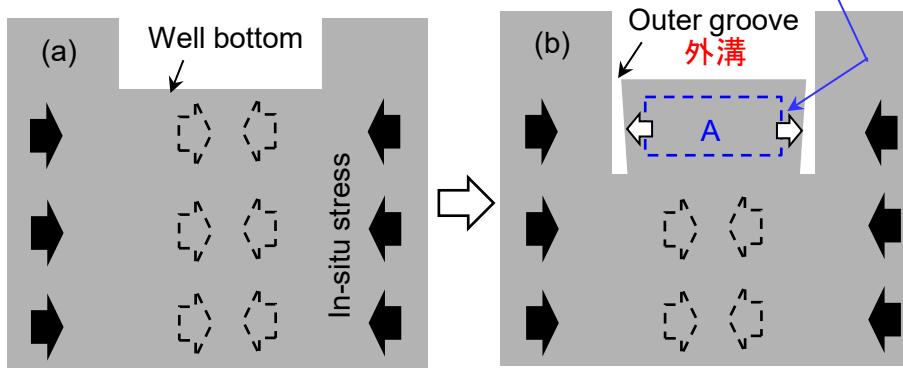


(Ito et al., *Geothermics*, 2022)

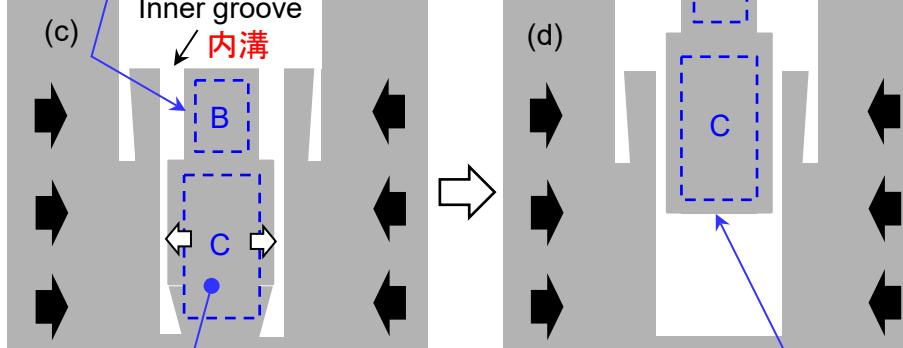
膨張前・後の両形状を保持したコアを採取する方法

(二重ビットコアリング)

局所的な応力解放



既に応力解放されているので掘削しても膨張せず

初期型
(原案)

コアリング掘削さえ出来れば良く、高温の地熱井にも適用可能

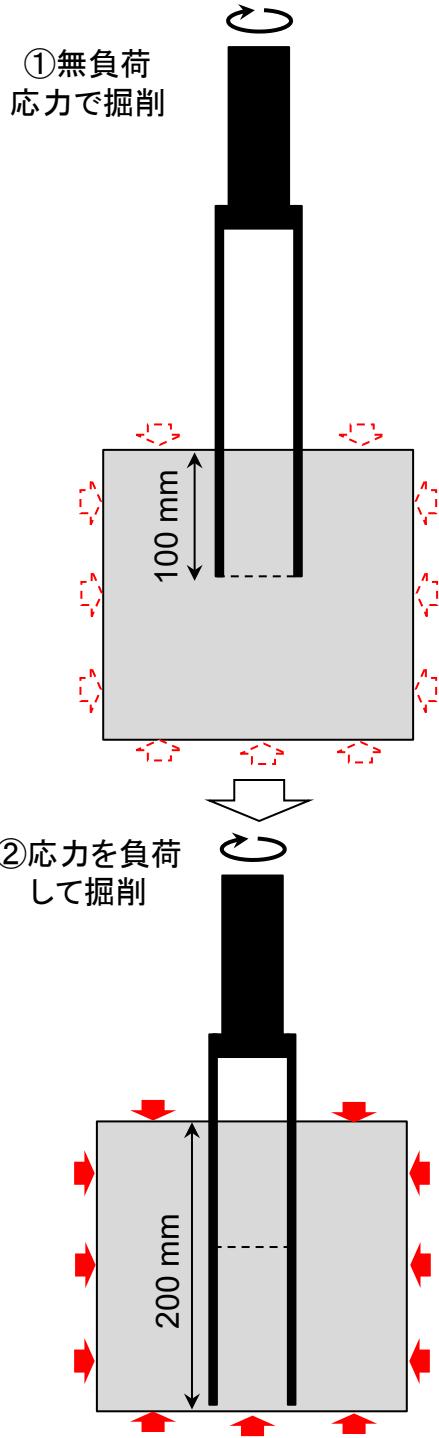
コア下部は膨張

$$\text{膨張後の形状} - \text{膨張前の形状} = \text{膨張量} \Leftrightarrow \text{地殻応力}$$

$$(d_{\max}, d_{\min}) - (d_0) = (S_{h\max}, S_{h\min})$$

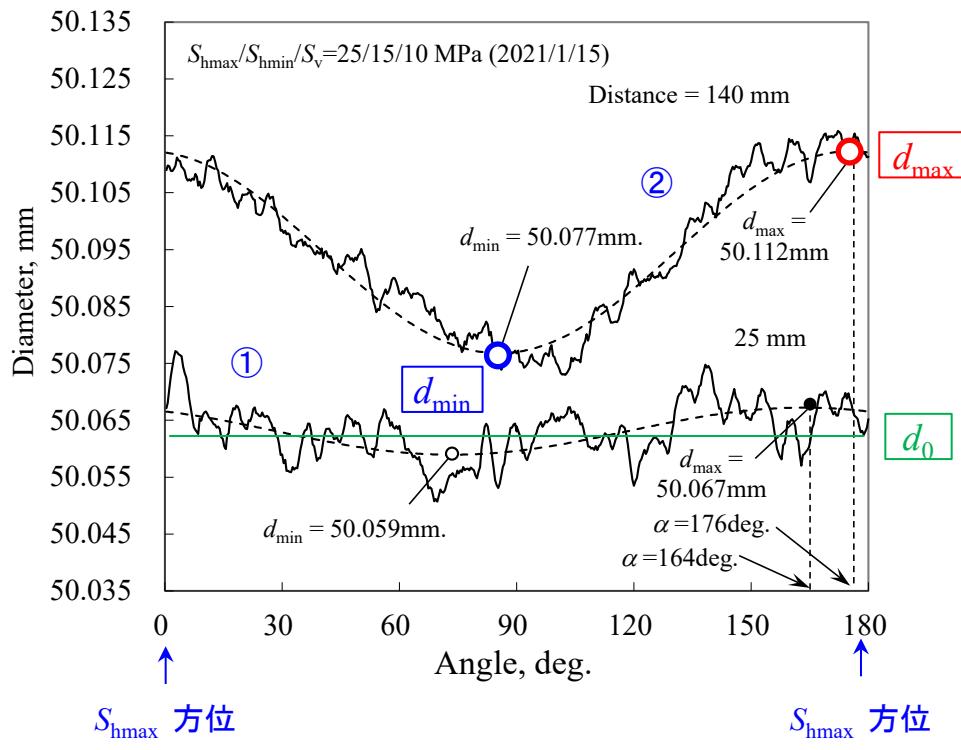
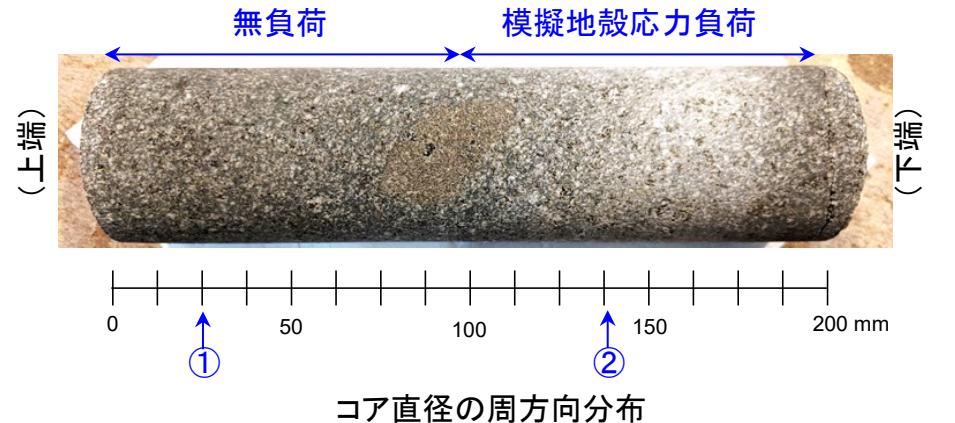
(基本原理)

岩石の弾性係数 (E, ν) および坑井軸方向応力 S_z



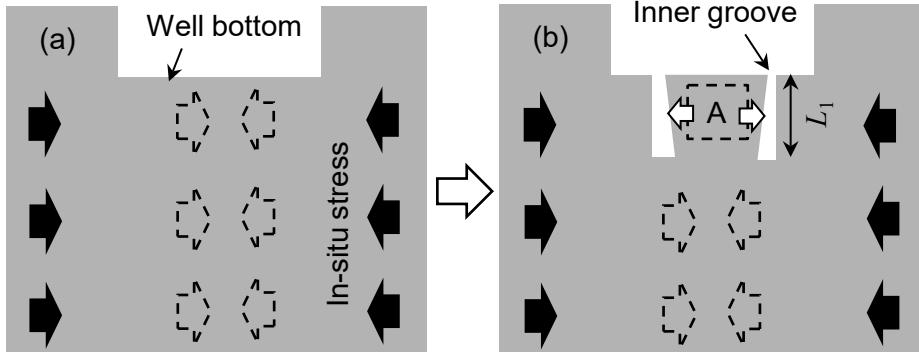
室内実験による原理の検証

室内実験で模擬地殻応力を負荷した試験片からコアを採取
(伊藤ら, 地熱学会, 2021)

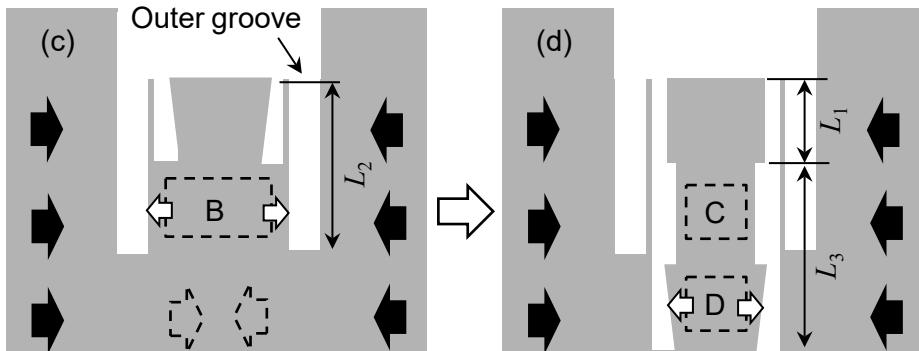


DBC掘削方法の改良

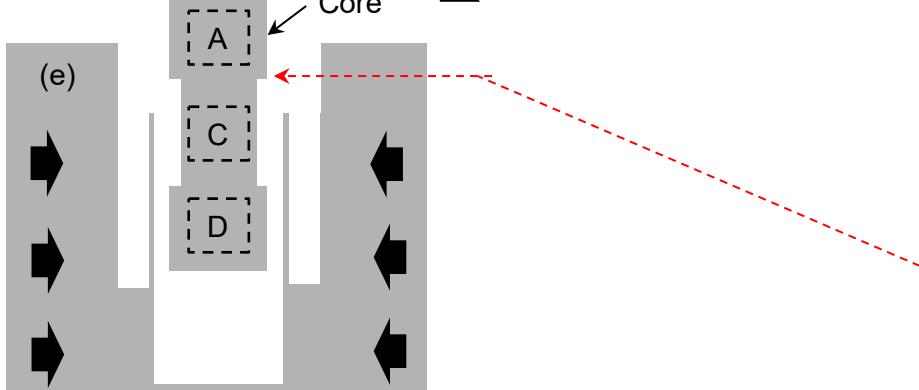
内溝掘削その1



内溝掘削その2

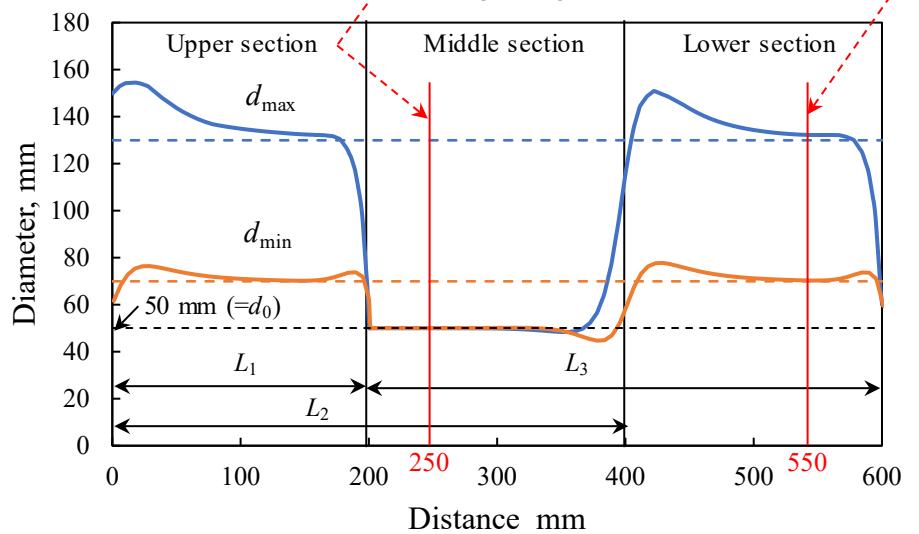
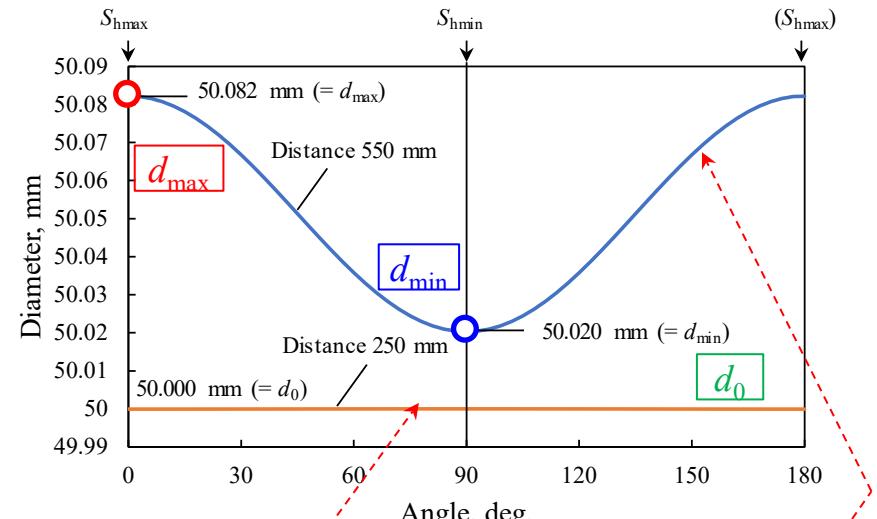


Retrieving



数値シミュレーションによる測定原理の検証

(Ito et al., US Rock Mech./Geomech. Symp., 2024)



A(膨張区間)

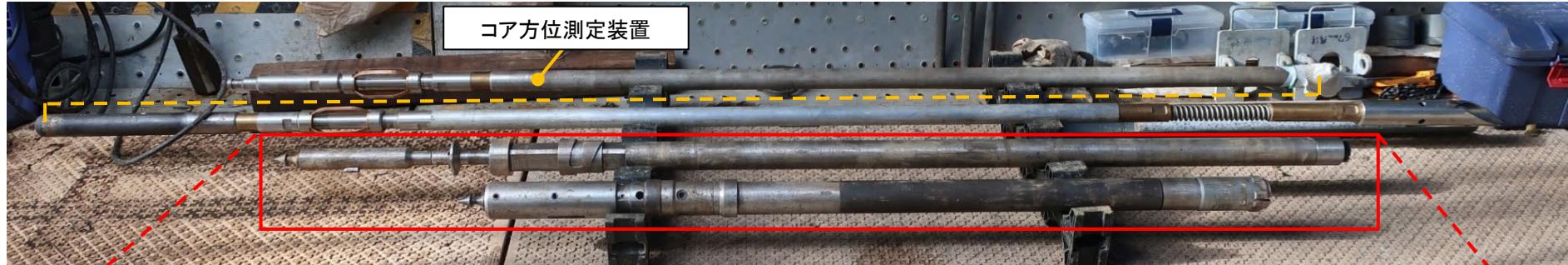
C(非膨張区間)

D(膨張区間)

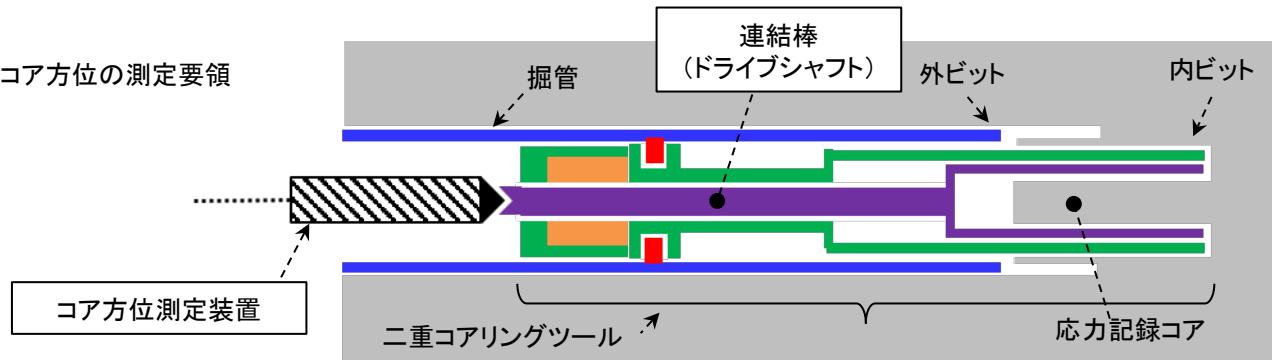


改良型方式のDBCツール一式(HQ坑井用)

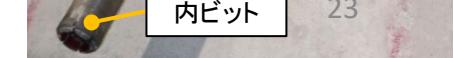
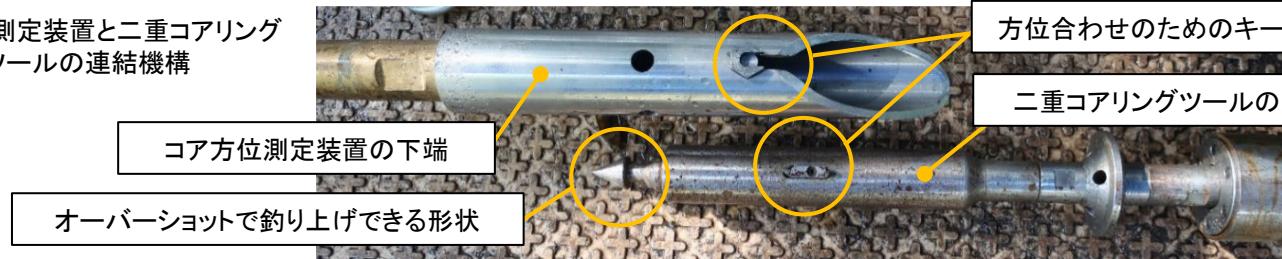
23



コア方位の測定要領



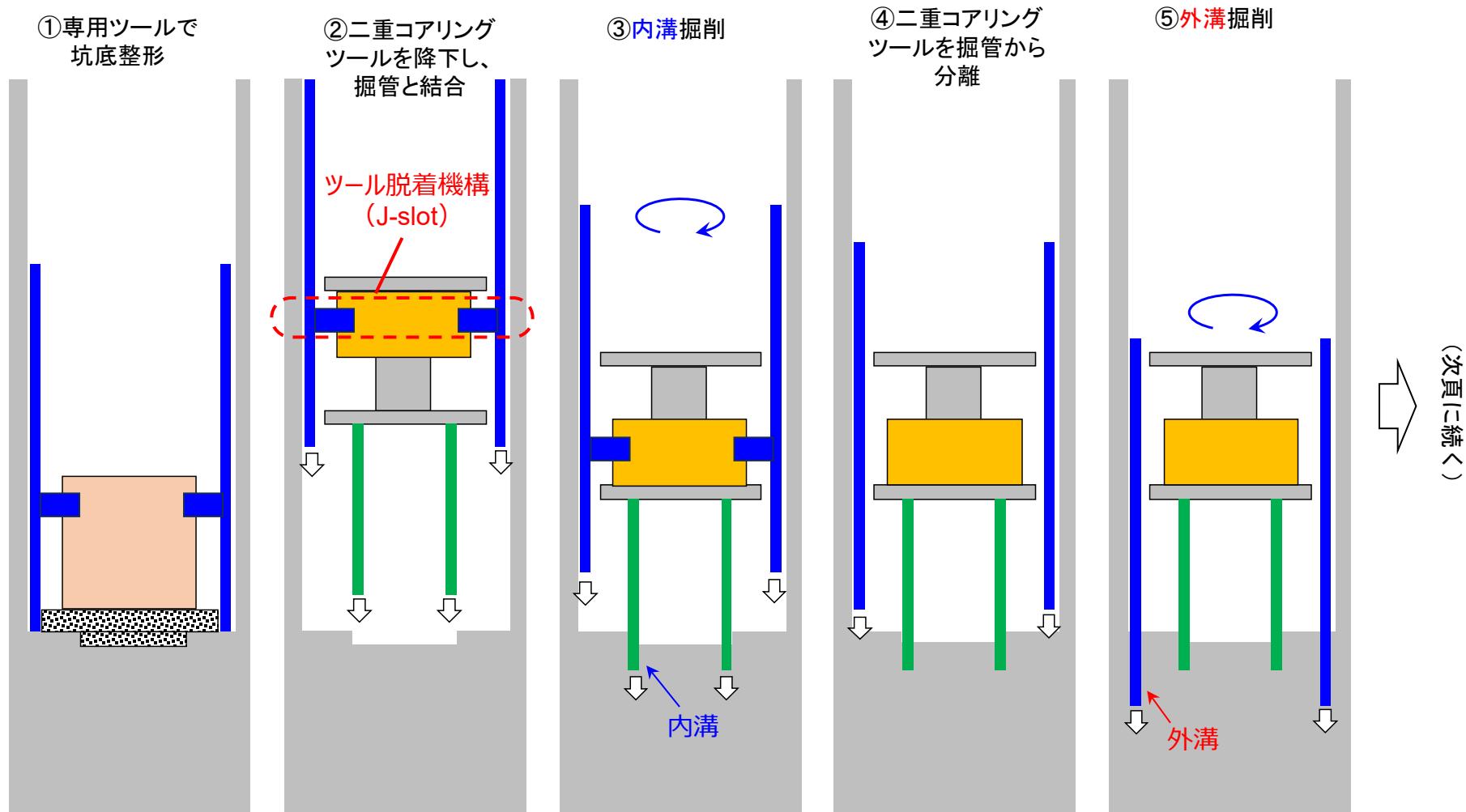
コア方位測定装置と二重コアリングツールの連結機構



23

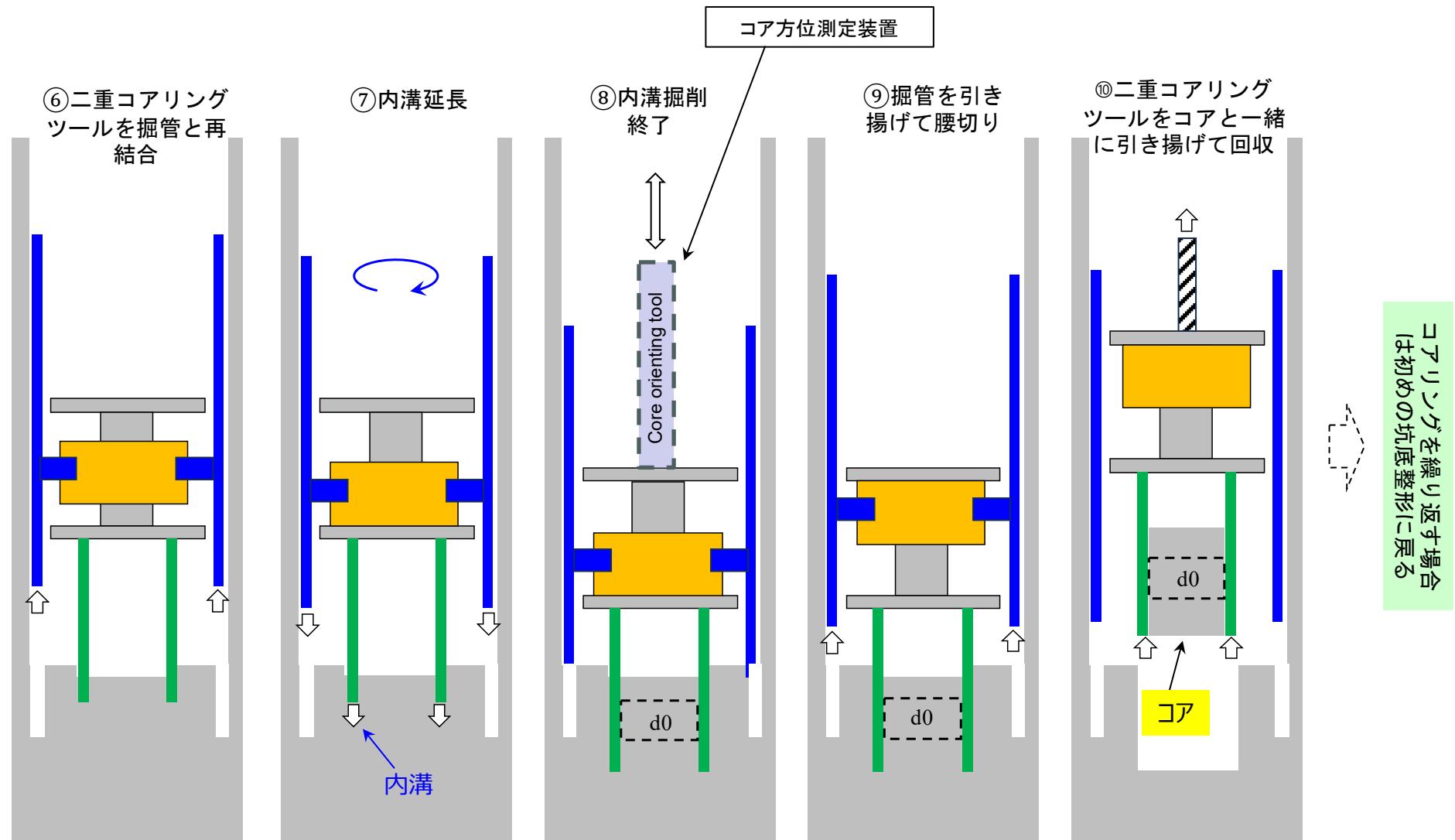
改良型DBCツールによる測定の実施手順

24



二重コアリングの実施手順(続き)

25



測定の流れ

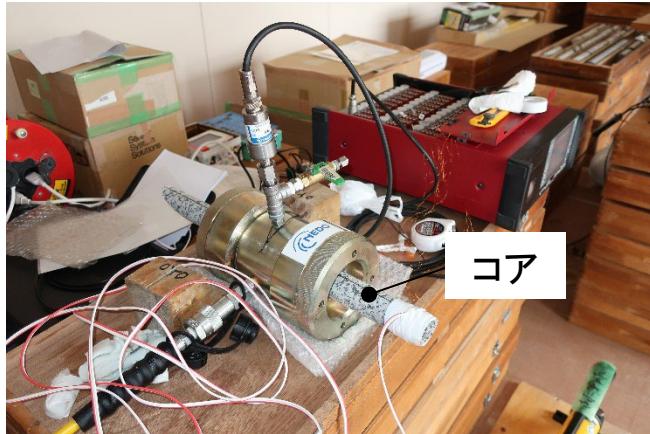
コアリング



1. 掘管設置
2. 坑底整形
3. 二重ビットコアリング
4. コア方位測定
5. コア回収

ヤング率測定

(非破壊でコア自体に応力を負荷して変形を測定)



コア直径測定



地殻応力評価

コア直径測定結果

$$(d_0, d_{\max}, d_{\min})$$

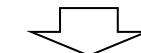


$$\begin{cases} \varepsilon_{\max} = \frac{d_{\max} - d_0}{d_0} \\ \varepsilon_{\min} = \frac{d_{\min} - d_0}{d_0} \end{cases}$$



$$\begin{cases} S_{\max} = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\varepsilon_{\max} + \nu \varepsilon_{\min}) + \frac{\nu}{1-\nu} S_z \\ S_{\min} = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\nu \varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}) + \frac{\nu}{1-\nu} S_z \end{cases}$$

コア採取から地殻応力評価までの作業の全てを掘削現場で実施



評価結果に不具合が見つかれば、再度実施可能（重要）

実坑井試験サイト



神岡鉱山坑井試験（坑道床面掘削坑井）

（第1回：2022. 2. 28-3. 4, 第2回：2023. 2. 27-3. 11,
第3回：2023. 7. 3-7. 15, 第4回：2023. 12. 12-12. 22,
第5回：2024. 8. 19-8. 30）

床面直下の極浅い深度で十MPa以上の応力が作用する
岩体中での検証試験が可能

実坑井試験サイト

登米坑井試験（地表掘削坑井）

（2024. 12. 2-12. 7に実施）

深度数十mの坑井を掘削してPQ坑井用ツールの動作試験

北上坑井試験（地表掘削坑井）

（第1回：2022. 9. 27-10. 7, 第2回：2023. 10. 10-10. 20）

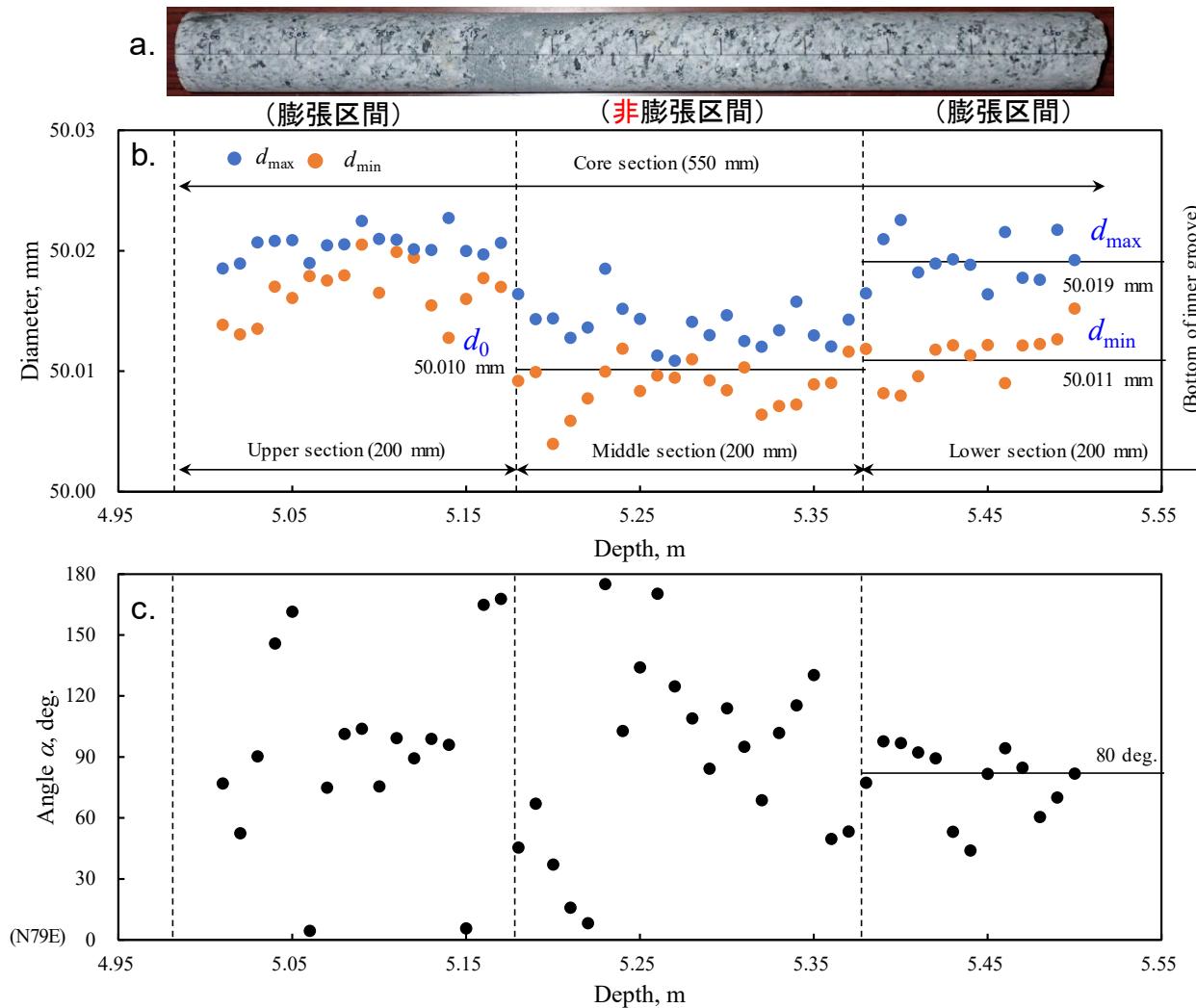
- ・ 実際の坑井掘削工程と環境での検証試験が可能
- ・ ただし深度百m足らずのため地殻応力はほぼゼロ



測定結果の一例(神岡鉱山)

(伊藤ほか, 石油技術協会春季講演会, 2024; Ito et al., US Rock Mech./Geomech. Symp., 2024)

(a)コアの画像、(b)測定された直径および(c)最大直径方位の軸方向分布の一例



評価値

$S_{h\max}$: 14.1 MPa
 $S_{h\min}$: 6.1 MPa
 Θ : N21°W

(S_v は13.7 MPaで既知と仮定)



同じサイトで過去に実施された
水圧破碎法の結果(Sano et al., 2007)

$S_{h\max}$: 15.0 MPa
 $S_{h\min}$: 6.0 MPa
 Θ : N32°W

開発経過のまとめ



室内設備／陸上大型設備による試験

- ・評価原理の検証
- ・DBCツールの動作検証
- ・掘削条件の検討

鉱山坑道での試験 (神岡鉱山)

- ・DBCツールの動作検証
- ・掘削条件の検討
- ・他の地殻応力測定法との比較検証

浅深度実坑井での試験 (北上山地, 登米地域)

- ・DBCツールの動作検証
- ・掘削条件の検討

大深度実坑井への適用

DBCツールの
製作・改良

小型／大型試験片

10~30 m

100~200 m

500~2500 m

