

CO₂地中貯留におけるジオメカニックモデリング Geomechanic modelling for CO₂ geological storage

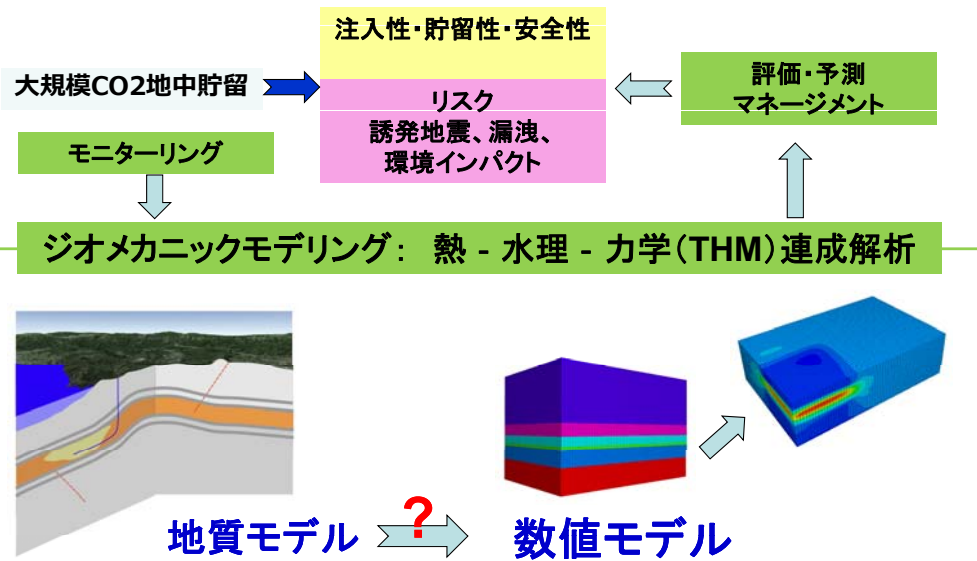
雷 興林

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門
地圏メカニクス研究グループ

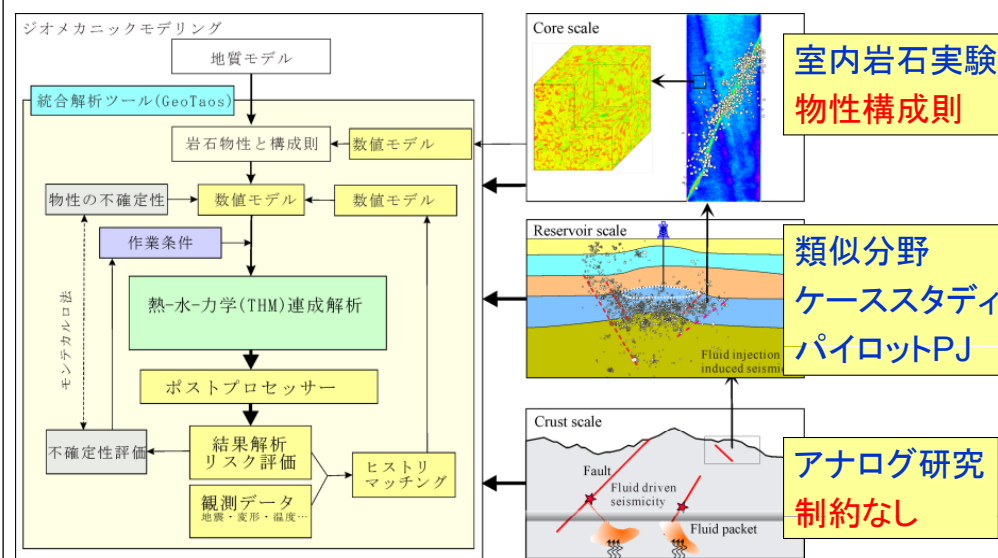
内 容

1. ジオメカニックモデリングの役割
2. ジオメカニックモデリングのフレームワーク
3. 物性値・構成則
 1. 室内実験
 2. フィールド試験
4. アナログ研究
 1. 類似分野: 廃液処分・シェルガス水圧破碎
 2. ナチュラルアナログ研究
5. 実用化に向け

ジオメカニックモデリングの役割



取り組み: ジオメカニックモデリングフレームワーク



内容

1. ジオメカニックモデリングの役割
2. ジオメカニックモデリングのフレームワーク
3. 物性値・構成則
 1. 室内実験
 2. フィールド試験
4. アナログ研究
 1. 類似分野: 廃液処分・シェルガス水圧破砕
 2. ナチュラルアナログ研究
5. 実用化に向け

実験室スケール(コアスケール)

- ◆物性・変形・破壊等に関する構成則の解明
 - ◆岩石の物性・条件が良くわかる
 - ◆それを選択・制御することができる
 - ◆短時間で詳細かつ多様なデータが得られる
 - ◆要素を分割し系統的に行うことができる
- ◆アップスケーリング
 - ◆他のスケールの研究との融合により

産総研岩石実験装置(一部)



三軸岩石透水(気)実験システム
差圧下、岩石の浸透率・ひずみ・弾性波速度等を同時に測定

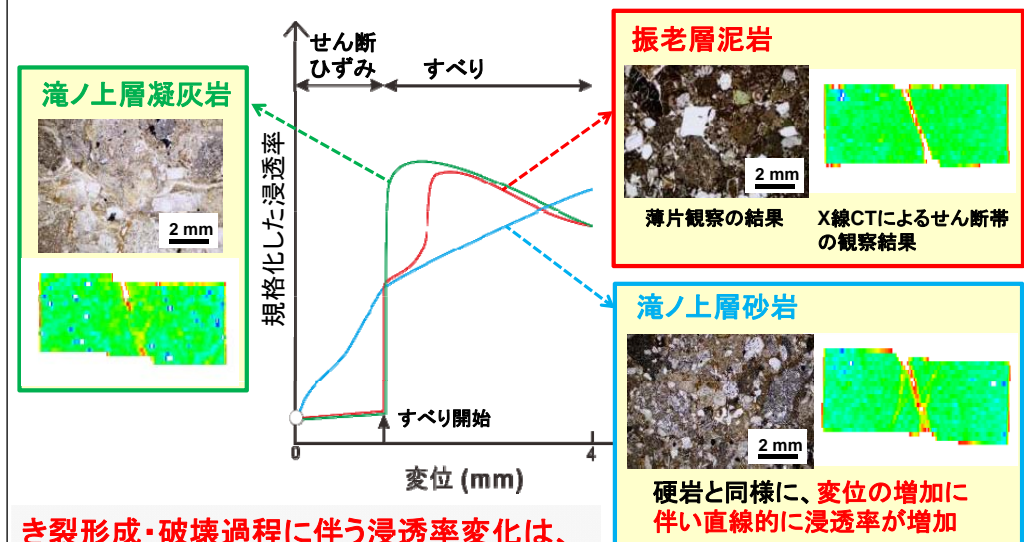


三軸岩石クリープ実験



弾性特性・水理特性・AE震源等同時計測

岩石変形・き裂形成・破壊に伴う浸透率の変化



き裂形成・破壊過程に伴う浸透率変化は、岩石種類により異なる

Fujii, et al. (2015)

軟砂岩、硬砂岩

硬岩

脆性破壊
変形小
微小地震監視

軟岩

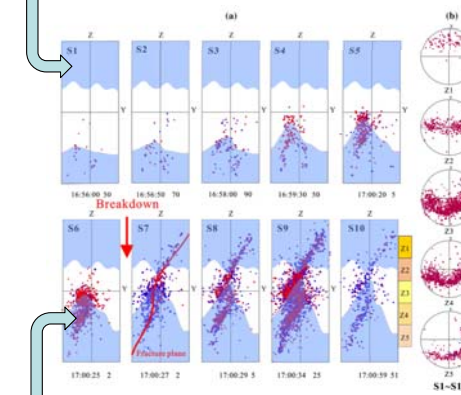
延性破壊
変形大
変形に着目監視

未固結

室内実験は困難

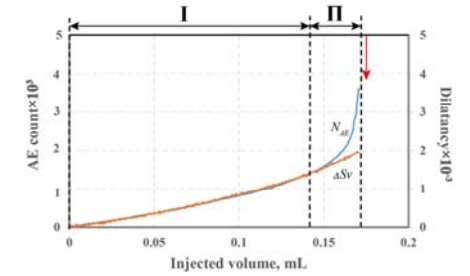
緻密砂岩の注水破壊

弾性波速度・減衰から流体分布



AE震源から破壊進展

Li, Lei, et al. (2016)



微小破壊は含水状態に依存
乾燥領域:より脆性 → 微小地震多発
湿潤領域:より延性 → 微小地震少発
破壊と流体拡散の間に相互促進
(Positive feedback)

破壊の段階性
流体が破壊を駆動 流体拡散 > 破壊進展
↓
破壊Pumping 流体拡散 < 破壊進展

軟岩:光ファイバ歪センサーを利用する現場揚水試験が有効

光ファイバ歪センサー

対象:連成解析の基本変数
感度:~10⁻⁶
時間:連続(10分間隔)
空間:井戸沿い連続(10cm間隔)

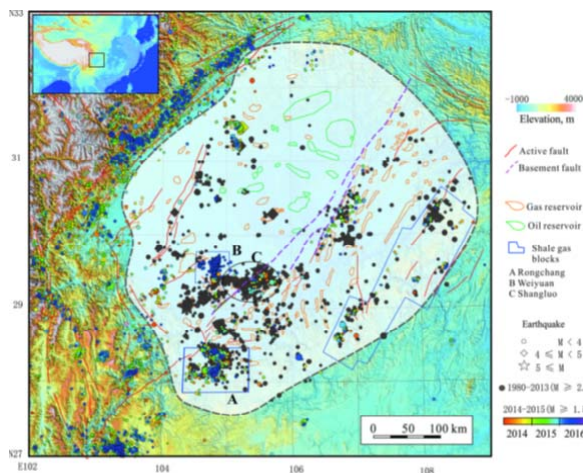
ジオメカニクスモデリングに非常に有効
コア試験の不足を解消
未固結軟岩:室内試験による物性値の獲得は困難
アップスケーリングが必要
光ファイバの利用を推進すべき
一本の観測井から全地層の物性値をえることが可能
アップスケーリングされたパラメータ

二酸化炭素地中貯留技術研究組合「二酸化炭素大規模地中貯留の安全管理技術開発」事業により実施

内容

1. ジオメカニクスモデリングの役割
2. ジオメカニクスモデリングのフレームワーク
3. 物性値・構成則
 1. 室内実験
 2. フィールド試験
4. アナログ研究
 1. 類似分野:廃液処分・シェルガス水圧破碎
 2. ナチュラルアナログ研究
5. 実用化に向け

廃液処分・シェルガス水圧破碎にける注水誘発地震に関する研究



注水誘発地震の課題

1. 特徴
2. 発生メカニズム
3. 発生条件
4. 発生モデル

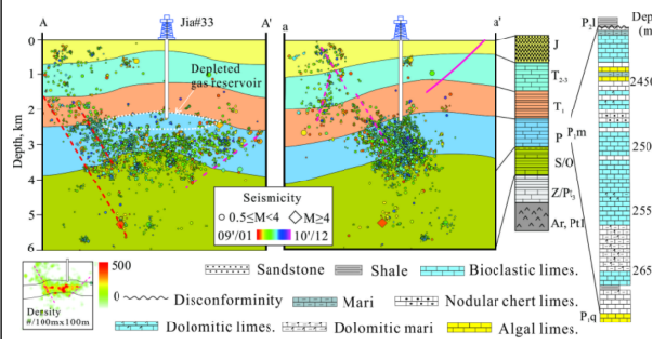
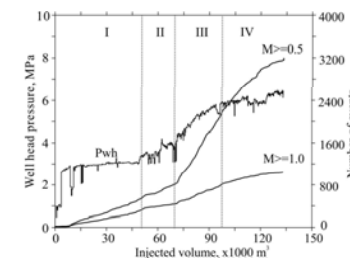
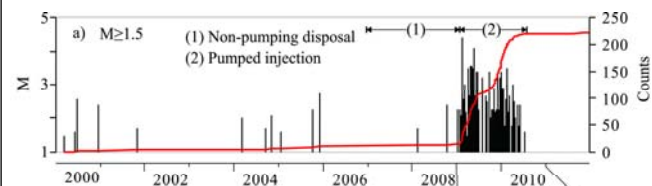
CCSの視点から学ぶこと 四川盆地の注水誘発地震

1. 枯渴ガス田廃水注入 M5.2
2. 岩塩生産 ~M5
3. シェルガス水圧破碎 M4.2

↑
今までの最大地震

Lei et al., 2008, 2013, Submitted

四川盆地ガス田廃水処分誘発地震



誘発地震の特徴

時間: 初期間隙圧を超えた時
空間: 既存断層の再活動
規模: M4~5.4まで
関連: 漏洩

誘発地震→断層発見

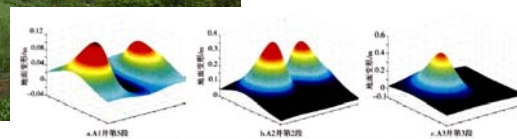
Lei et al., JGR, 2013

シェルガス水圧破碎による注水誘発地震

四川盆地シェルガス水圧破碎現場
31, Mar., 2016. 砂投入中

注水:
10000~100000 m³
水圧破碎が目的
地表隆起、10cmオーダー
微小地震 (M<0) が必ず発生

断層再活動:
水圧破碎がうまく行かない
小中誘発地震発生



水圧破碎に伴う地表変形(修乃嶺他, 2016)

Lei et al.,
submitted

シェルガス水圧破碎による注水誘発地震

注水誘発地震の評価モデル

Seismogenic index

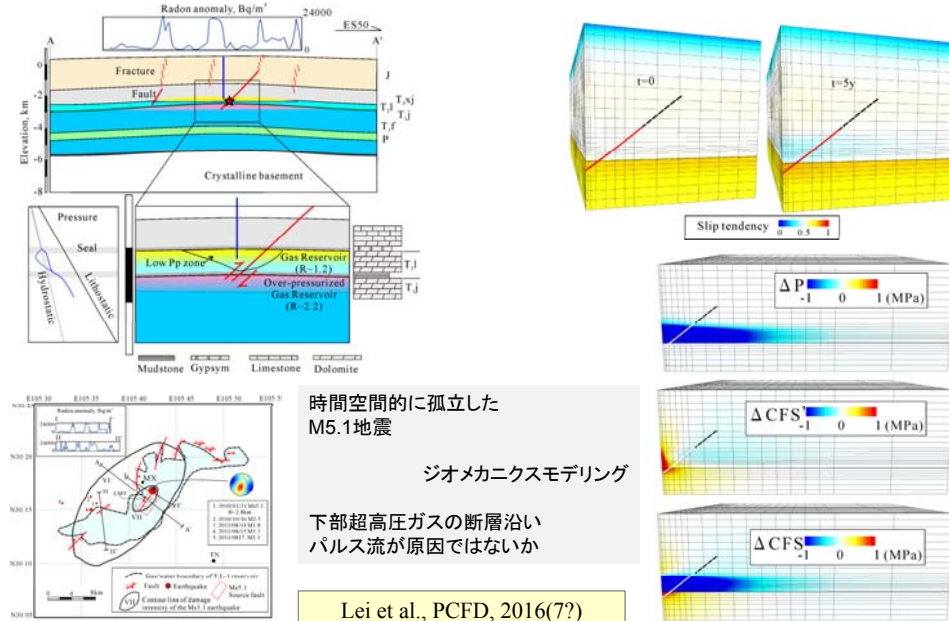
- 定義 $\Sigma = \log[N_{\geq M}(t)/V(t)] + bM$ Dinske et al., 2013
- 範囲: -10 ~ 1 Dinske et al., 2013
 - 地熱: -4 ~ 0.5
 - シェルガス(カナダ): -3 ~ -1.5 Bao & Eaton., 2016
 - 四川盆地: -2 ~ -0.6

$$M_{max} = \{\Sigma + \log V(t)\} / b$$

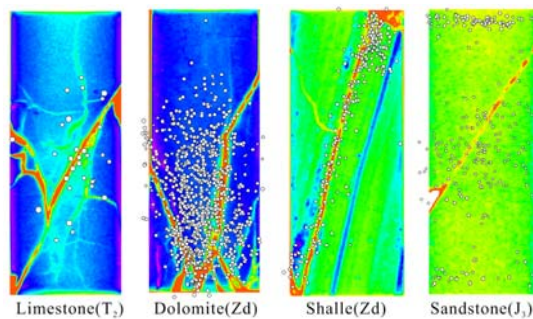
最大地震

四川盆地
200000 m³ → M3~4

天然ガス田高圧ガスパルス流と断層バルブ挙動



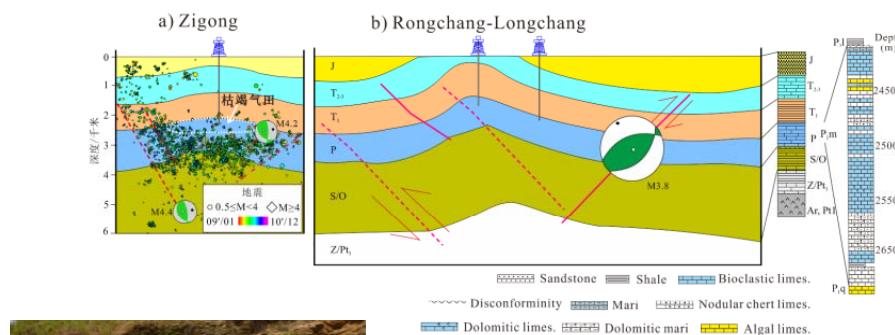
中強注水誘発地震発生条件



- 主要岩石が脆性的強い
- 地殻全体が固く応力が高い
- 小規模断層存在

Lei et al., ARMS8, 2014

未知断層の重要性→微弱変動・微小地震モニタリングの重要性



ナチュラル・アナログ研究による検証

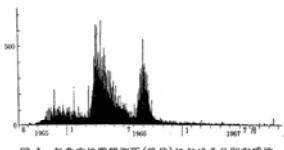


図1 気象庁地震観測所(松代)における日別有感地震回数。(気象庁H22より)

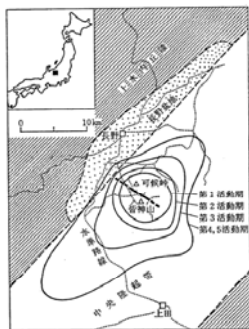


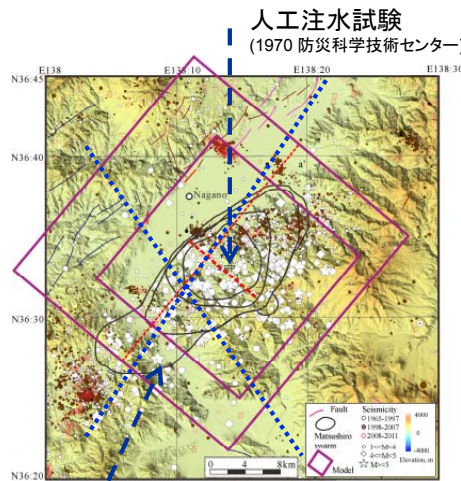
図2 震源域の拡大経過と地質区。中央部の太線は松代地震群発およびその誘発経路。(震源・震動M_L、最大M_L、中時・短時M_Lにとづく)

大竹, 1976

- 群発地震発生(70万個) → 間隙圧拡散
- 大量の湧水(CO₂含む) → 流体通路確認
- 地表隆起 → 岩石力学応答
- Cl⁻濃度変化 → 深部流体の拡散
- 深部流体の注入が原因 → 注水アナログ

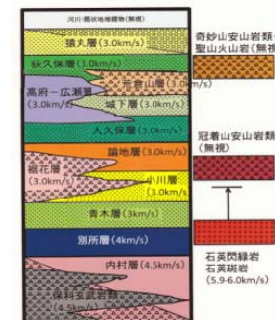
- 松代群発地震
大竹, 1976
.....
- 松代注水実験
M.Ohtake: Seismic activity induced by water injection at matsushiro, Japan. JPE, 22, 163-176, 1974.
- ナチュラル・アナログ研究
小出仁ほか, 月刊地球, Vol.28, No.11, 2006
當舎他, 地学雑誌, 2008
Cappa et al., JGR, 2009

松代の地質モデル

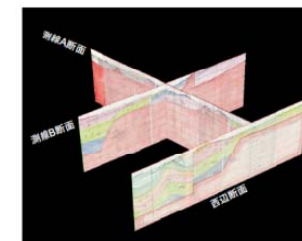


人工注水試験 (1970 防災科学技術センター)

松代群発地震の震源分布とモデル化領域
松代群発地震は1965年から約5年半続いた群発地震で、隆起・高濃度CO₂を含んだ湧水等を伴った。

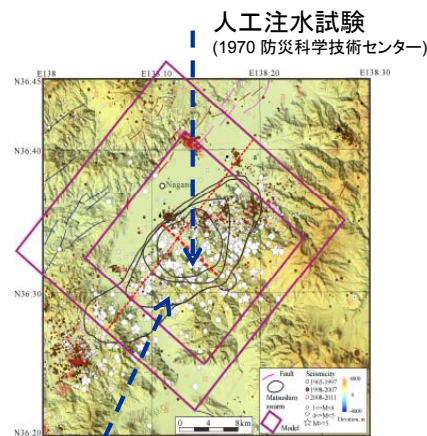


地質統一層序



反射断面

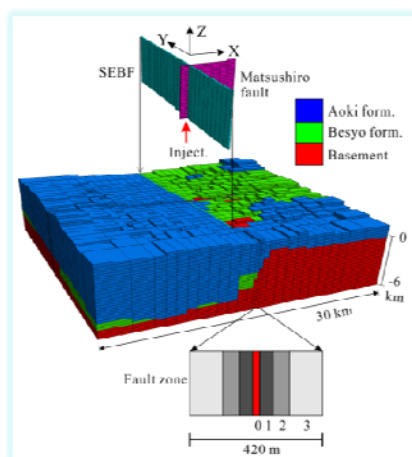
松代群発地震の地質モデルの数値化



人工注水試験 (1970 防災科学技術センター)

松代群発地震の震源分布とモデル化領域
松代群発地震は1965年から約5年半続いた群発地震で、隆起・高濃度CO₂を含んだ湧水等を伴った。

出典: 産業技術総合研究所. (2014) 平成25年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業- 弾性波探査を補完するCO₂挙動評価技術の開発. 264.



ジオメカニックモデルのジオメトリー

モデル概要と物性値一覧表

物性	青木層	別所層	基盤	断層
体積弾性率, GPa	1.96	4.42	7.85	3.16
剛性率, GPa	1.55	3.49	6.20	2.42
粘着力, MPa	-	-	-	1.5
引張強度, MPa	-	-	-	0.0
内部摩擦角, deg	-	-	-	28.8
ダイレーション角, deg	-	-	-	20
Biot's 係数	0.9	0.8	0.8	0.6
初期浸透率 (K ₀), m ²	1E-17	1E-18	1E-18	
浸透率 (K), m ²	K = K ₀ (1+30000*ε _v)			
間隙率	0.05	0.01	0.01	0.05

微小な亀裂系や断層の影響を考慮するため
実測値を基に
アップスケーリング

断層の破壊則
(モールクーロン則)

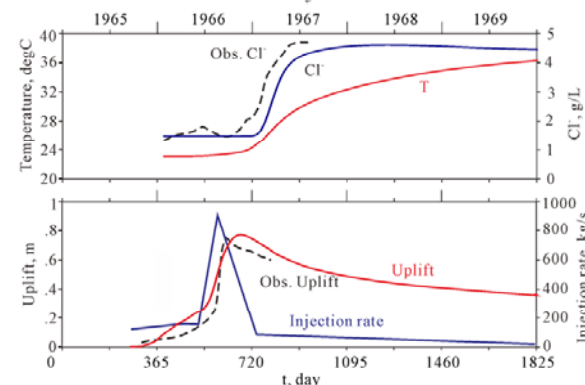
歪に依存する浸透率

断層ゾーン	0	1	2	3
初期浸透率(K ₀), m ²	5E-15	1E-15	8E-16	5E-16
交差部初期浸透率(K ₀), m ²	5E-14 2E-13*	1E-14	8E-15	5E-15

初期条件・境界条件

- 塩濃度
 - 淡水
 - 深度方向線形的に増加
 - 定常流解析結果
 - 繰り返し解析
- 間隙圧: 静水圧
- 温度: 勾配=3°C/100m
- 応力
 - 臨界的: 1MPa程度のCFSで断層破壊
 - 垂直: 岩盤自重
 - 主応力比が深度依存
- 変形
 - 側面: 水平方向を拘束
 - 底面: 垂直方向を拘束
 - 表面: 自由
- 水理
 - 側面・底面流速ゼロ
- 温度:
 - 底面・表面: 初期値に固定
 - 注水: 温度指定

ヒストリマッキング

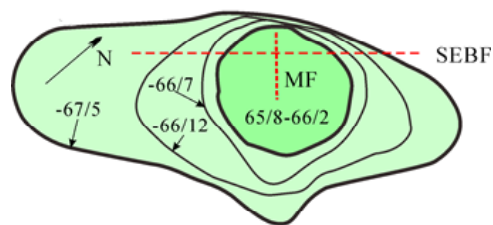


地表変形・Cl濃度を用いてヒストリマッキングを行い、未知のインジェクションレートを推測できた。

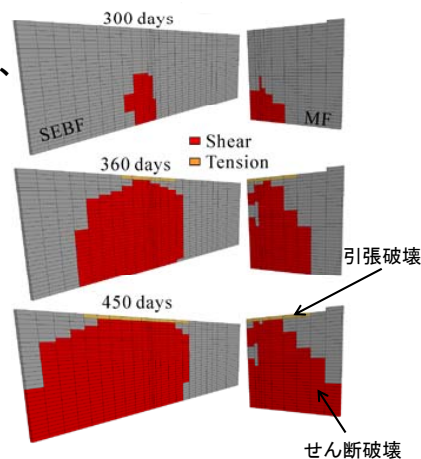
地表隆起等の時間変化
観測結果、計算された結果、
及び 計算に用いた地下からの水の圧入量。

結果: 破壊域の拡大等の再現

計算された破壊領域の時間的変化は、松代群発地震の震央分布変化(観測値: 中心から時間経過と共に拡大)を概ね説明している。

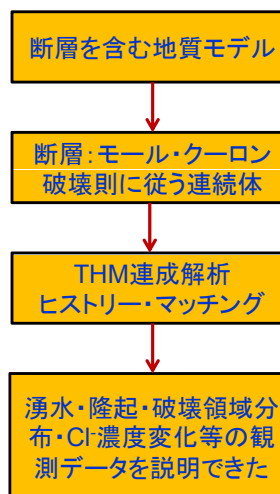


松代群発地震の震央分布域の時間変化
実線は震央分布域: 対応する「西暦下2桁/月」をラベルで付す。
赤色破線は、右の断面SEBFとMFの位置。



計算された断層破壊領域の時間変化
SEBF断面(左)及びMF断面(右)における
計算開始後 300日、360日、450日後の
せん断破壊域(赤色)と引張破壊域(黄色)

松代ナチュラル・アナログ研究のまとめ



- Tough-FlacによるTHM連成解析の有効性が証明された
- 断層はモール・クーロンの破壊に従う連続体として近似できる
- 断層交差部は流体のバイパス、そのスケールは~10m

断層の振る舞い

- 初期応力に敏感
- その不確実性が大きい
- 微小変動のモニタリングが不可欠
 - 高感度・広帯域地震観測
 - 光ファイバーによる歪観測

内 容

1. ジオメカニックモデリングの役割
2. ジオメカニックモデリングのフレームワーク
3. 物性値・構成則
 1. 室内実験
 2. フィールド試験
4. アナログ研究
 1. 類似分野: 廃液処分・シェルガス水圧破碎
 2. ナチュラルアナログ研究
5. 実用化に向け

実用化に向け

- 実用性を考慮した**最適モデル**
 - **簡単**で、それ以上簡単化できない
 - 小スケールの複雑さは**不確定性**とし、確立論的な評価
- 複雑さの階層的な特徴に着目する