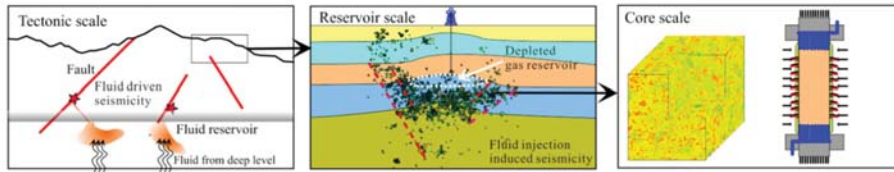


マルチスケールにおけるジオメカニックモデリング

An multiscale approach for geomechanic modelling

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



独立行政法人 産業技術総合研究所

背景

近未来産業
 CO2地下貯留
 地熱開発
 石油・天然ガスER
 シェルガス開発
 大深度地下空間利用
 ...



貯留ポテンシャル

社会受容性
 安全性

誘発地震、漏洩



人災



天災

シェルガス開発による誘発地震の例
 (Lei et al., 投稿中)

独立行政法人 産業技術総合研究所

ジオメカニックモデリングの役割

近未来産業
 CO2地下貯留
 地熱開発
 石油・天然ガスER
 シェルガス開発
 大深度地下空間利用
 ...

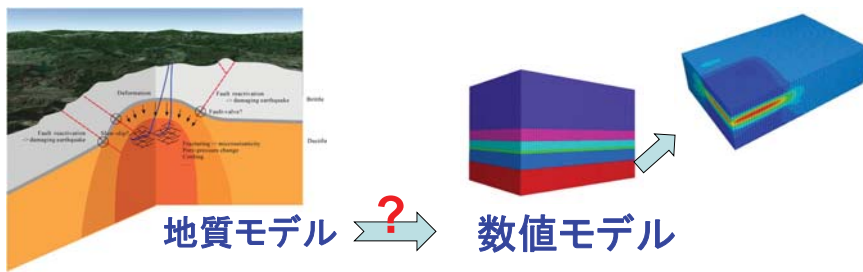
ポテンシャル

社会受容性
 安全性

誘発地震、漏洩

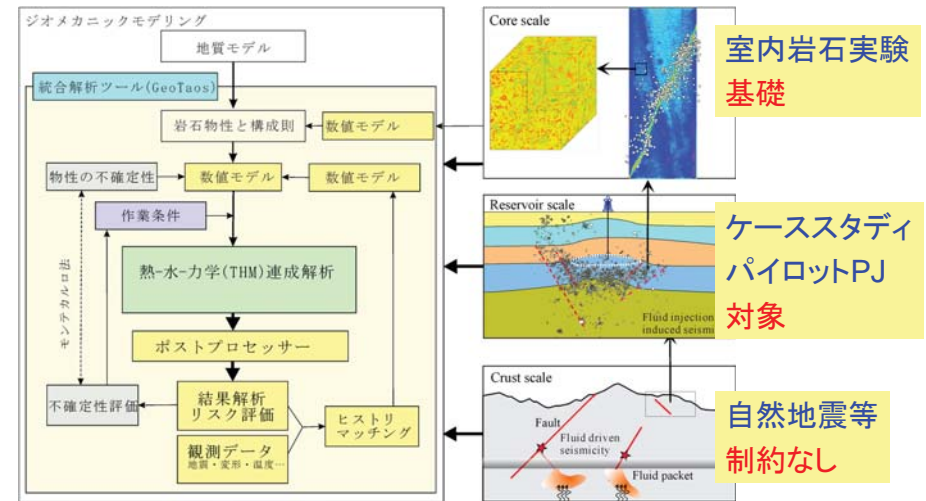
リスク予測
 モニターリング
 マネージメント

ジオメカニックモデリング: 熱 - 水理 - 力学 (THM) 連成解析



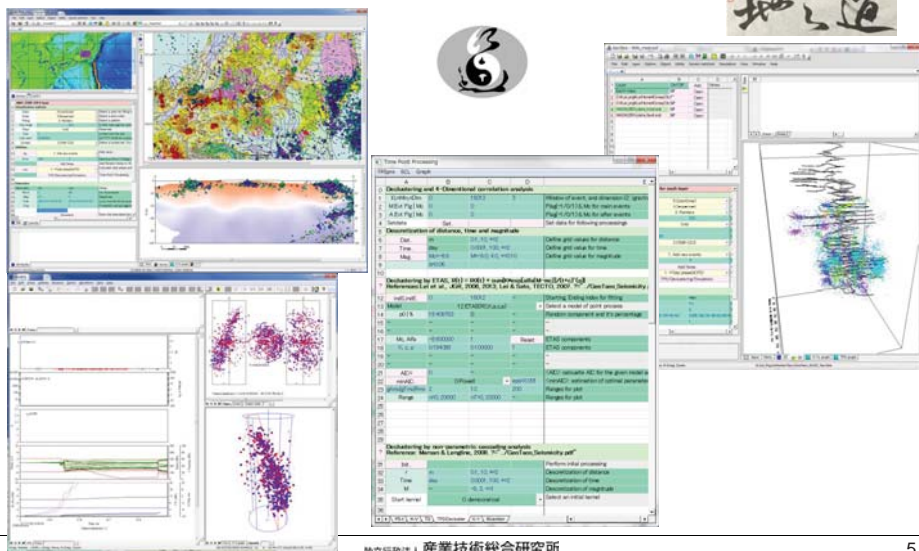
独立行政法人 産業技術総合研究所

マルチスケール・マルチアプローチを統合した ジオメカニックモデリングフレームワーク



独立行政法人 産業技術総合研究所

マルチスケール・マルチアプローチを融合したデータ解析ツール(GeoTaos)の開発



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
- ◆他のスケールの研究との融合により
スケーリング則の解明

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

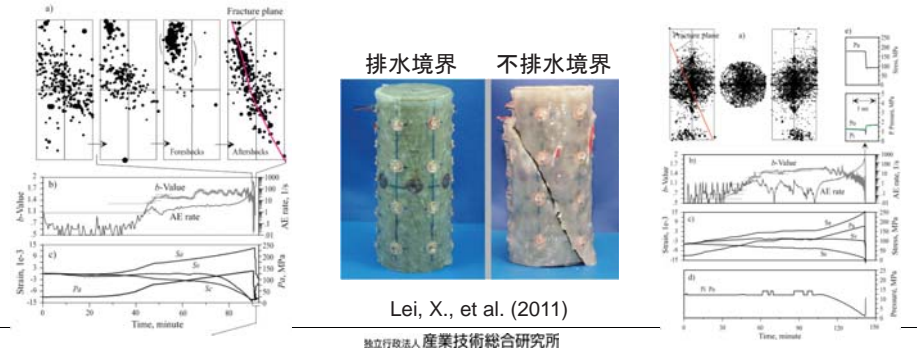
コアスケール研究例: 岩石の破壊を支配する要素

Rock type	Intact rocks	Porous rocks	Foliated/ Sedimentary rocks	Jointed/Faulted rocks
Key factors	Pre-existing microcrack density	Pore size & Porosity	Orientation of foliation/bedding planes	Geometric irregularity Surface roughness
Critical point behaviors: higher AE productivity, more foreshocks				
Pre-failure damaging	High-density 	High-porosity Greater pores 	Unfavorably-oriented 	Rough surface Irregular geometry
	Low-density 	Undrained Drained Low-porosity 	Favorably-oriented 	Smooth surface Strait geometry Unfavorably oriented
Unpredictable failure behaviors: lower AE productivity, fewer foreshocks				

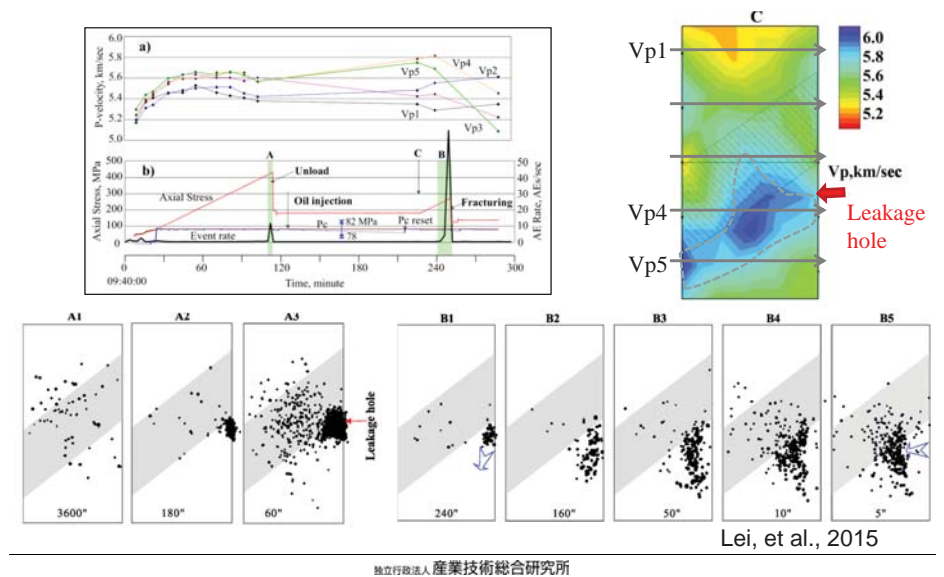
Lei, 投稿中

コアスケール研究例：流体・間隙圧・微小破壊

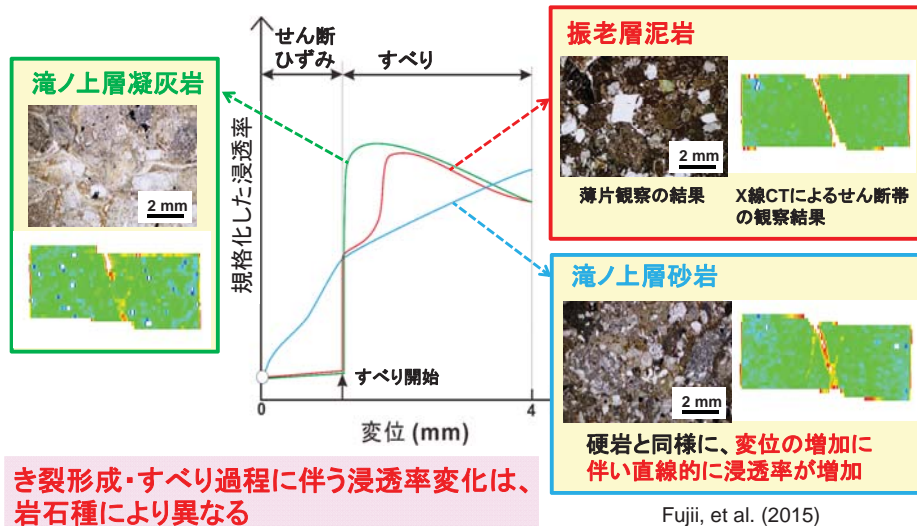
- 水理条件が重要
- AE・微小破壊が低い応力下でも発生する
- 非破壊検査
- 応力のモニターリング



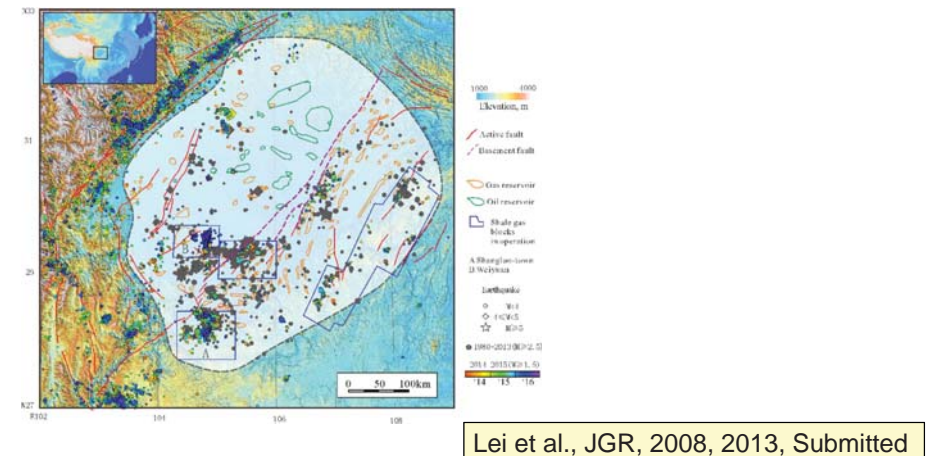
コアスケール研究例：水圧破壊



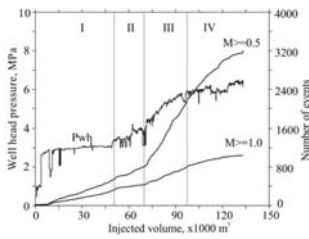
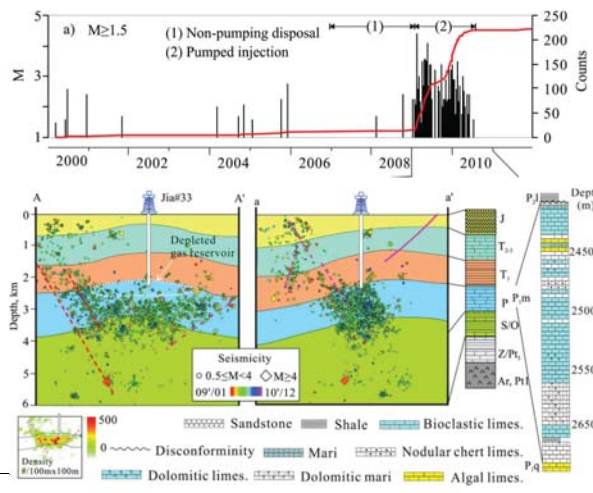
コアスケール研究例：き裂形成・滑りに伴う浸透率の変化



貯留層スケール研究例：一四川盆注水誘発地震



四川盆地ガス田廃水処分誘発地震



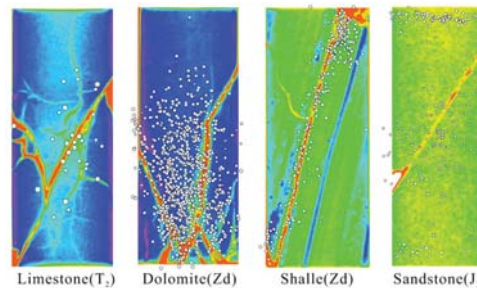
誘発地震の特徴

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

四川盆地注水誘発地震多発！ その理由は？



- 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
高角度逆断層

訂正

ナチュラル・アナログ研究: 松代群発地震

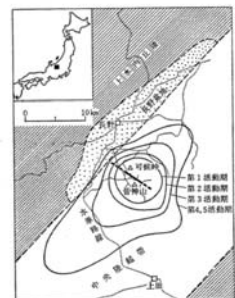
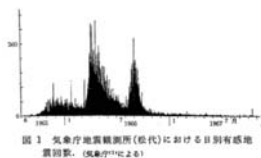


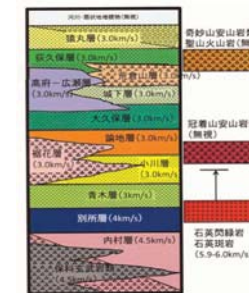
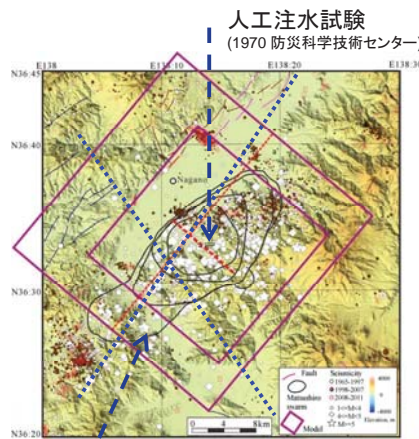
図2 震源域の拡大構造と地質図。中央部の北東は近代地質図に基づきその構造図系(新野・高野1994, 藤本ら1997, 中村・藤本1999)にもとづく。

大竹, 1976

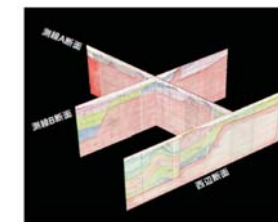
- 群発地震発生(70万個) → 間隙圧拡散
- 大量の湧水(CO₂含む) → 流体通路確認
- 地表隆起 → 岩石力学応答
- Cl⁻濃度変化 → 深部流体の拡散
- 深部流体の注入が原因 → 注水アナログ

- 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



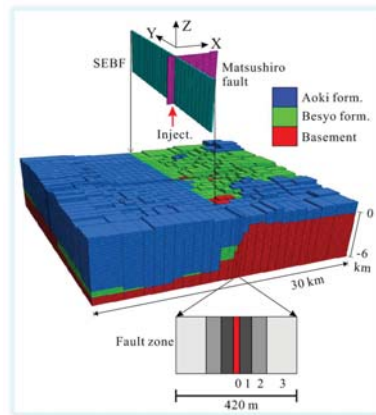
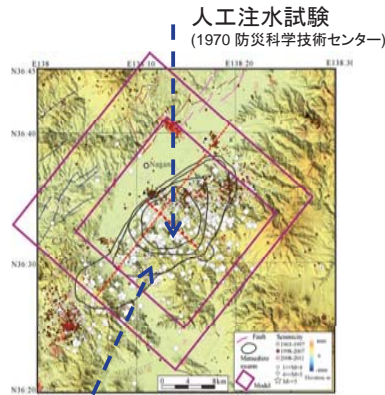
地質統一層序



反射断面

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。

松代群発地震の地質モデルの数値化



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。

ジオメカニクモデルのジオメトリ

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.

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)

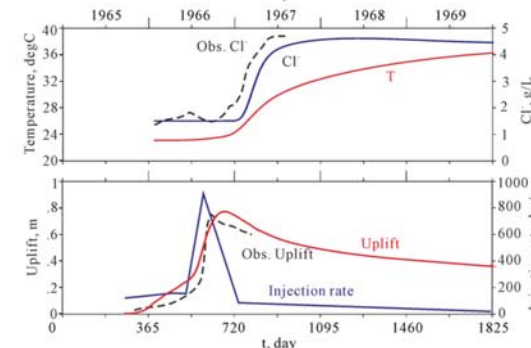
歪に依存する浸透率

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

ヒストリマッチング

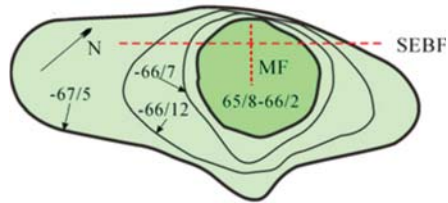


地表変形・Cl濃度を用いてヒストリマッチングを行い、未知のインジェクションレートを推測できた。

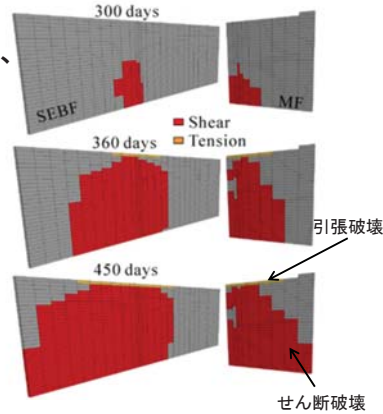
地表隆起等の時間変化
観測結果、計算された結果、及び計算に用いた地下からの水の圧入量。

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。

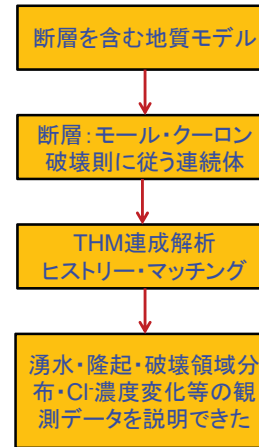


松代群発地震の震央分布の時間変化
実線は震央分布域：対応する「西暦下2桁/月」をラベルで付す。
赤色破線は、右の断面SEBFとMFの位置。



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



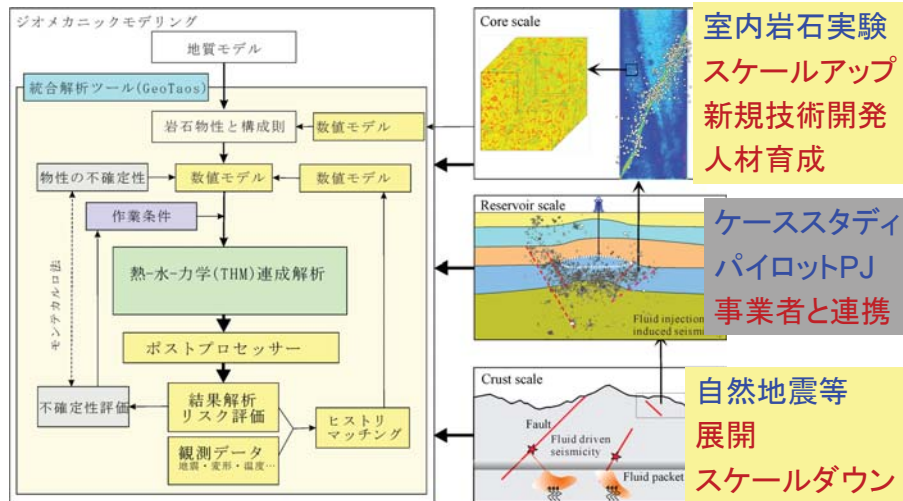
- Tough-FlacによるTHM連成解析の有効性が証明された
- 断層はモール・クーロンの破壊に従う連続体として近似できる
- 断層交差部は流体のバイパス、そのスケールは~10m

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



マルチスケールジオメカニクモデリングの役割を果たすには



ご清聴ありがとうございます



GeoTaos

