

平成30年度 地球シミュレータ利用報告会

所内課題: 先端的固体地球シミュレーションコードの開発

大規模粒子法計算による 付加体内部応力の解明



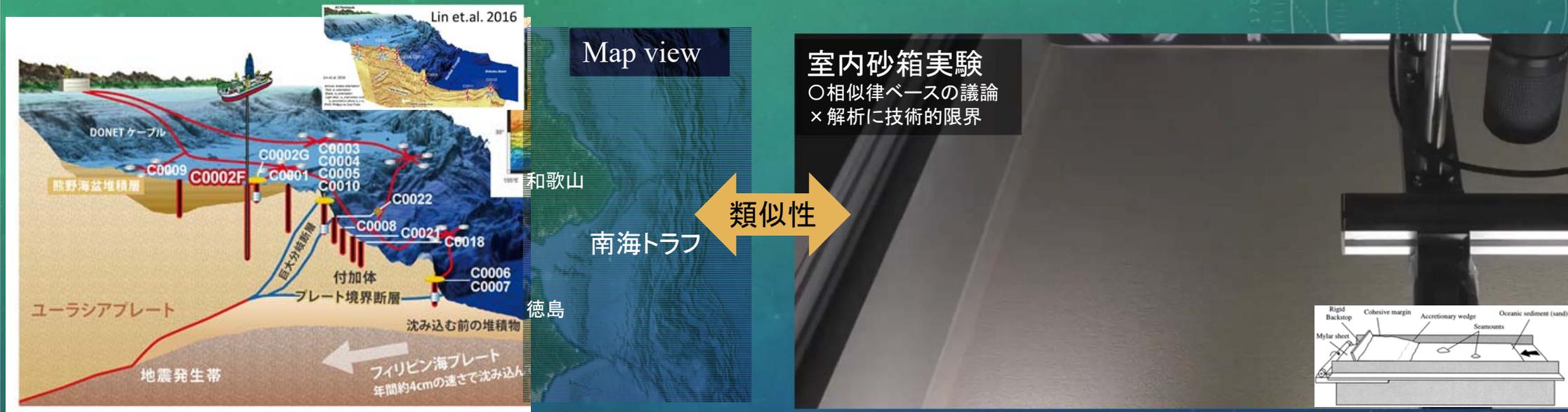
古市 幹人, ARTHUR BAUVILLE, 西浦 泰介(数理科学・先端技術研究開発分野)

AUTHORS:

MEMBERS:

宮腰 剛広 (地球深部ダイナミクス研究分野), 陰山 聡 (神戸大学), 亀山 真典 (愛媛大学),
大野 暢亮 (兵庫県立大学), 横井 研介 (カーディフ大学), 他

砂箱実験で紐解く付加体・断層形成過程



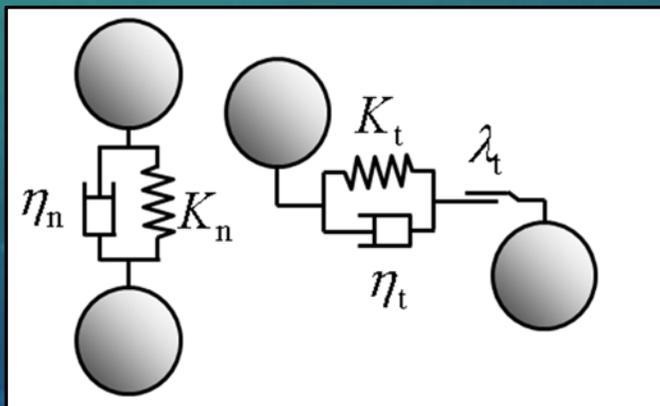
- 付加体形成、特に応力場の解明は、巨大地震や津波の発生や日本列島の形成にかかわる大問題。
- 短縮変形された砂層と付加体には幾何学的な類似性。
- 砂の静的な集団運動と上部地殻の非線形レオロジー(モール・クーロンの破壊基準等)も類似。
- 室内実験では詳細な3次元解析は困難(X線、音響、レーザースキャン等)

DEM数値実験によるアプローチ

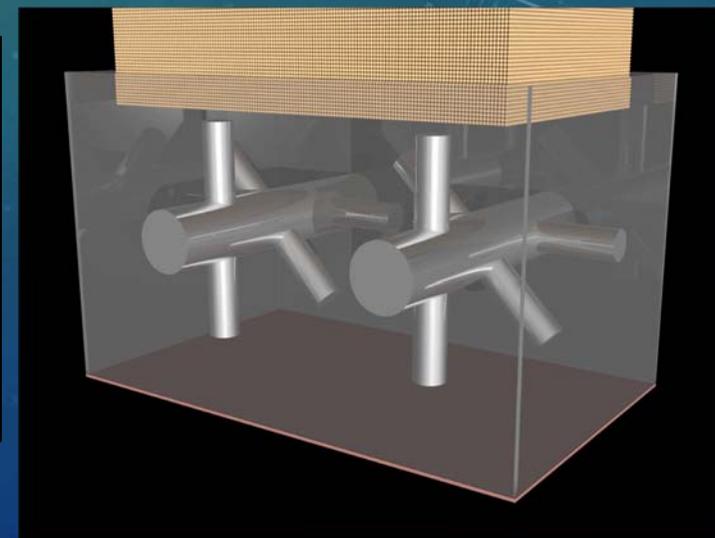
- 個別要素法: Discrete element method (DEM)は粒子法的一种。個々の粒子の運動を摩擦接触を考慮した運動方程式を解くことでLangrange的に追跡し全体の運動を表す方法
- 数値シミュレーションなら実験では困難な付加体内部の3次元応力場の考察が可能

$$\frac{\partial \vec{v}_{\text{dem}}}{\partial t} = \vec{g} + \sum \vec{F}_{\text{col}} / m_{\text{dem}}$$
$$I_{\text{dem}} \frac{\partial \vec{\omega}_{\text{dem}}}{\partial t} = \sum \vec{r} \times \vec{F}_{\text{col}}^t$$

運動方程式



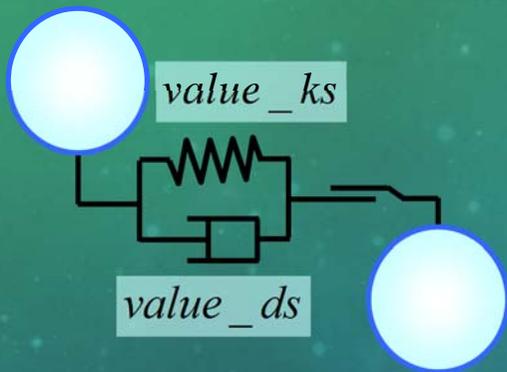
粒子間の接触相互作用



DEMの概略

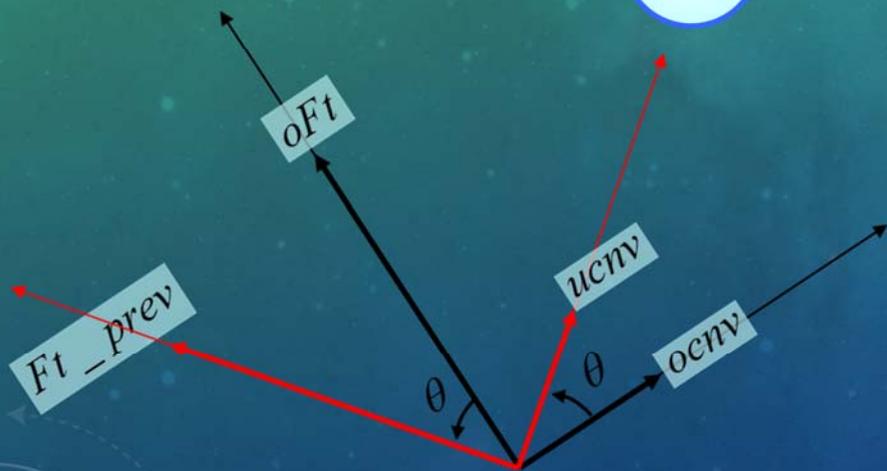
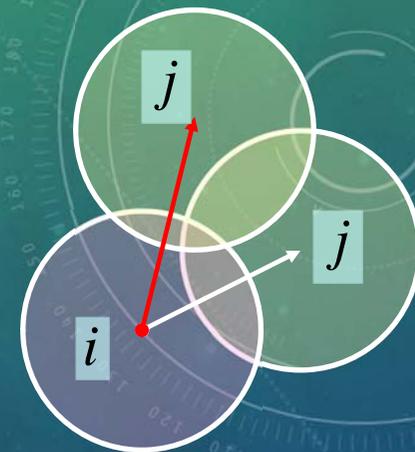
❖ Tangent force

$$F_t = F_t_prev + delF_t + Dt$$



$$F_t_prev = oF_t + ocnv \times ucnv \times oF_t$$

接触粒子ペア毎にデータを保持する必要あり



$$delF_t = -value_ks * delxc_t \quad \text{Spring}$$

$$Dt = -value_ds * vc_t \quad \text{Viscous relaxation}$$

$delxc_t$ Increment of tangential displacement during Dt

vc_t Tangential velocity

-> Memory & computation intensive

室内砂箱実験



既往技術

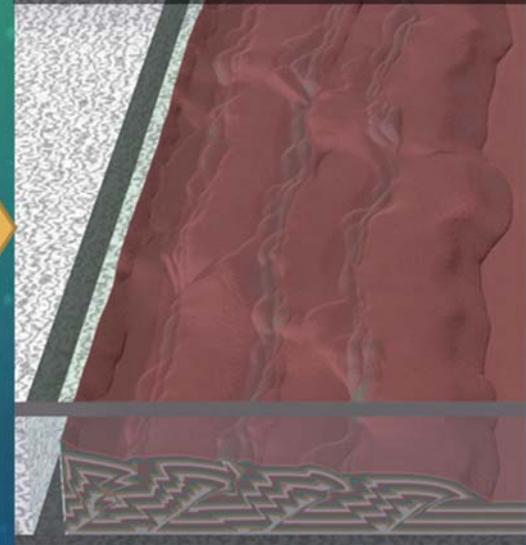


これまでのDEM研究は数100～数10万粒子

並列化
技術開
発

数値砂箱実験

- 3次元応力場の解析
- スケール比 10^4 ～の直接解析



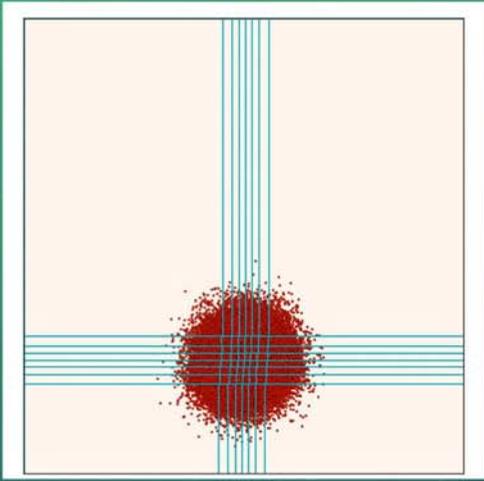
微視的：
粒子1粒毎の動き

粒状体の直接計算

巨視的：
粒状体の複雑な
変形

DEMコードの大規模並列計算が重要

粒子法の大規模化の問題点と解決に向けての研究開発



[Tsuzuki and Aoki, 2014]

- 近接粒子相互作用による粒子法において分散メモリ環境でのノード間並列は最高ランクの技術的難易度 → 動的負荷分散技術開発

粒子法コード並列化の概要

プロセッサレベル

- Cache aware ordering with space filling curve [Furuichi et.al., SC17]

共有メモリ並列・最適化

- Pair list & Sorting [Nishiura and Sakaguchi, *Compt. Phys.*, 2011]
- Action-reaction law [Nishiura, Furuichi and Sakaguchi, *Phys. Comm.*, 2015]

分散メモリ並列・最適化

- Iterative load-balancing method [Furuichi and Nishiura, *Phys. Comm.*, 2017]
- Overlapping communication [Furuichi et.al., SC17]



K Computer

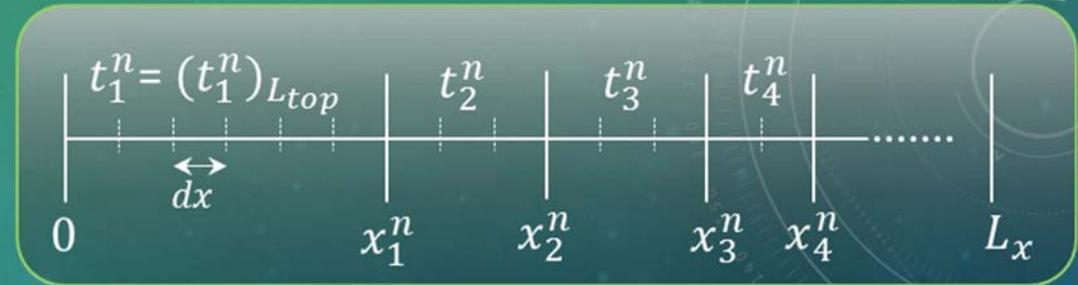


Earth Simulator

Newton-like iterative load-balancing

- The deviation of the workload f is defined at the cell boundary x_I^n

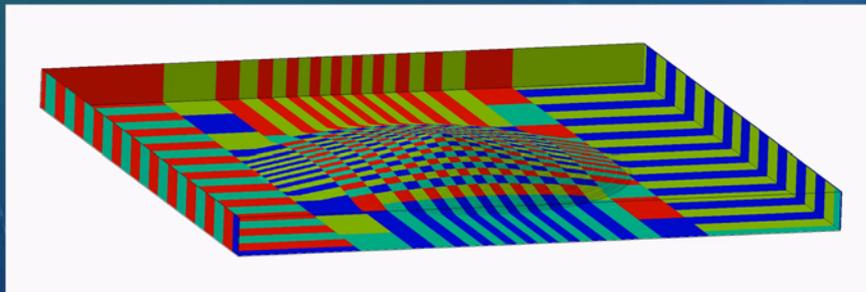
$$f^n(x_I^n) = t_I^n - t_{I-1}^n$$



- We regard f as the residual of non-linear problem to minimize $\|f^n(x_I^n)\|$.
- Sub-domain boundaries are controlled within the framework of an **iterative nonlinear solver** [e.g. Furuichi and May, *Phys. Comm.* 2015]

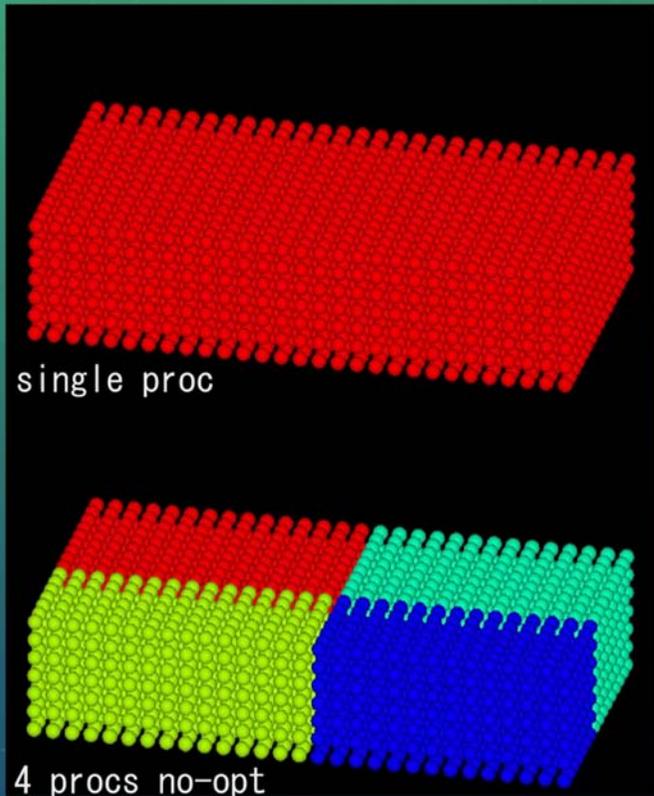
$$x_I^{n+1} = x_I^n + \delta x_I,$$

where $\delta x = -\alpha \hat{J}^{-1} f^n$, $\hat{J} = \frac{f^n(x_I^n) - f^{n-1}(x_I^{n-1})}{(x_I^n - x_I^{n-1})}$.

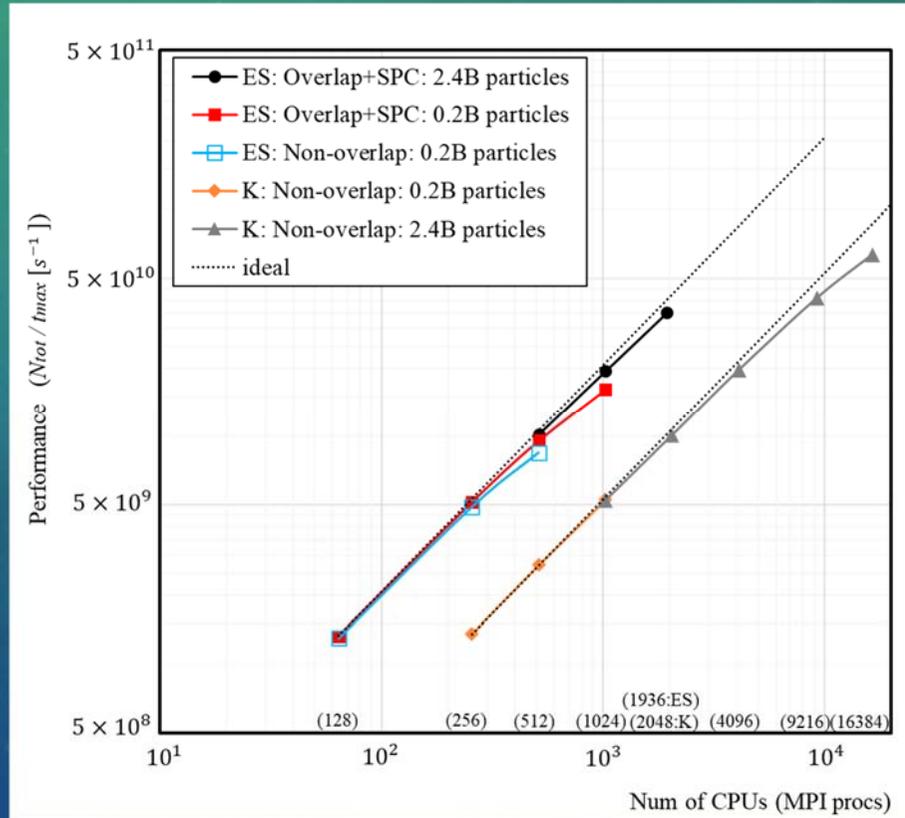


[Furuichi and Nishiura, *Phys. Comm.*, 2017]

Parallel implementation of DEM



Different colors identify different MPI processes.



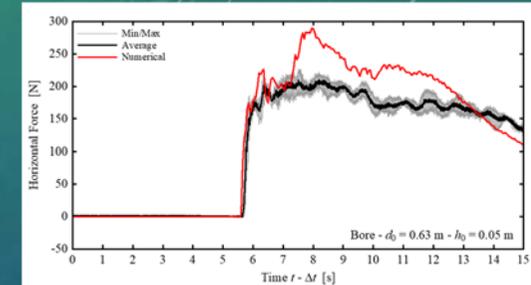
Strong/weak scalability of DEM on ES and K-computer



付加体
実験へ

動的負荷分散技術開発の波及効果

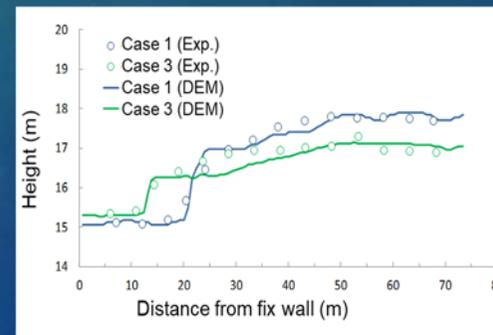
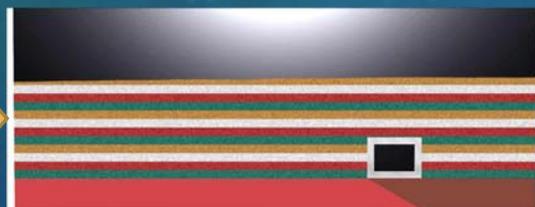
- 九州大学、EPFLとの共同研究でSPH法を用いた3次元大規模津波遡上解析研究



高知市街地での計算例

大規模水槽実験との比較計算

- 大林組や竹中工務店等との地盤開発に係わる共同研究

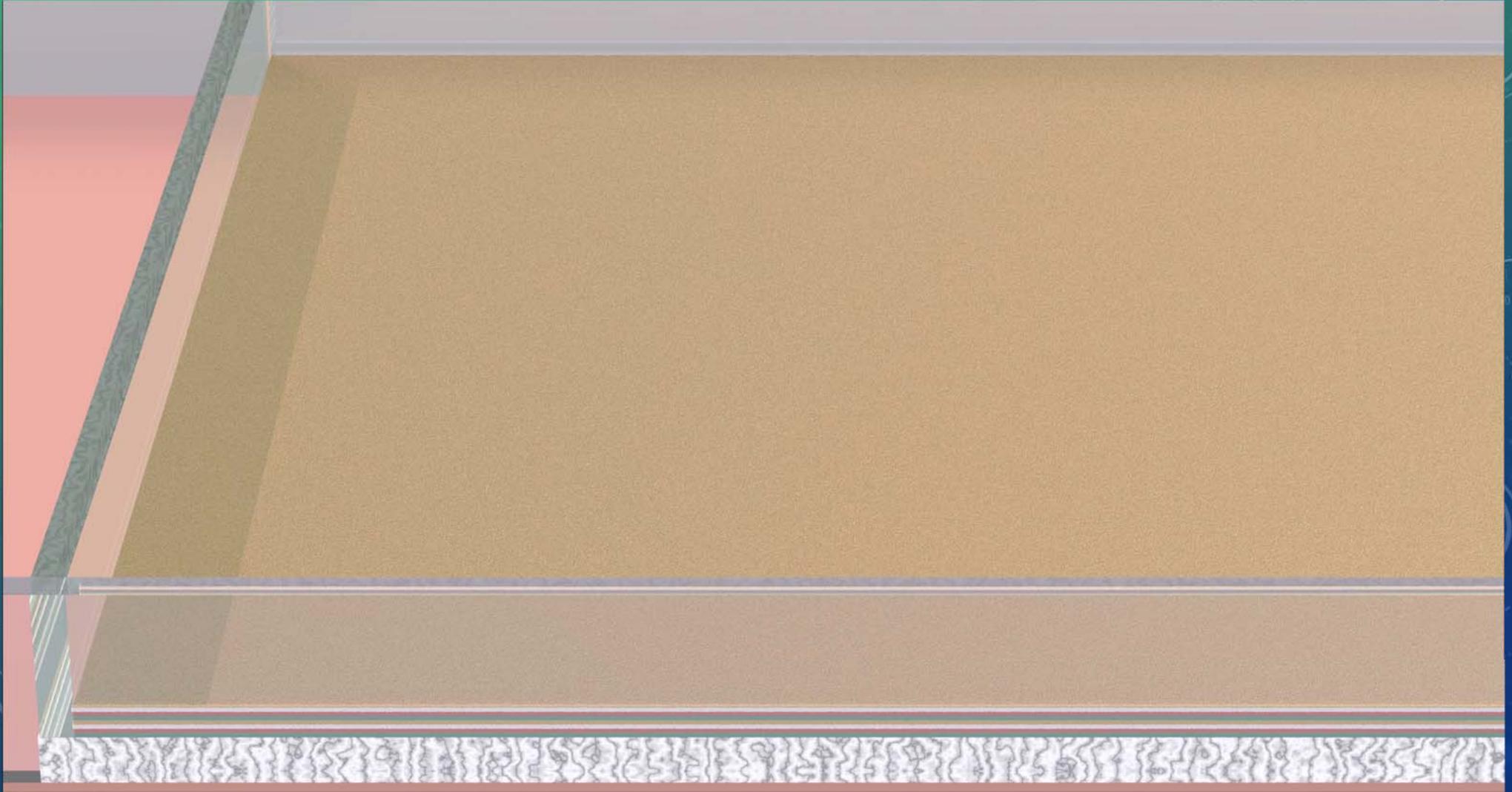


大規模遠心地盤模擬実験の再現研究

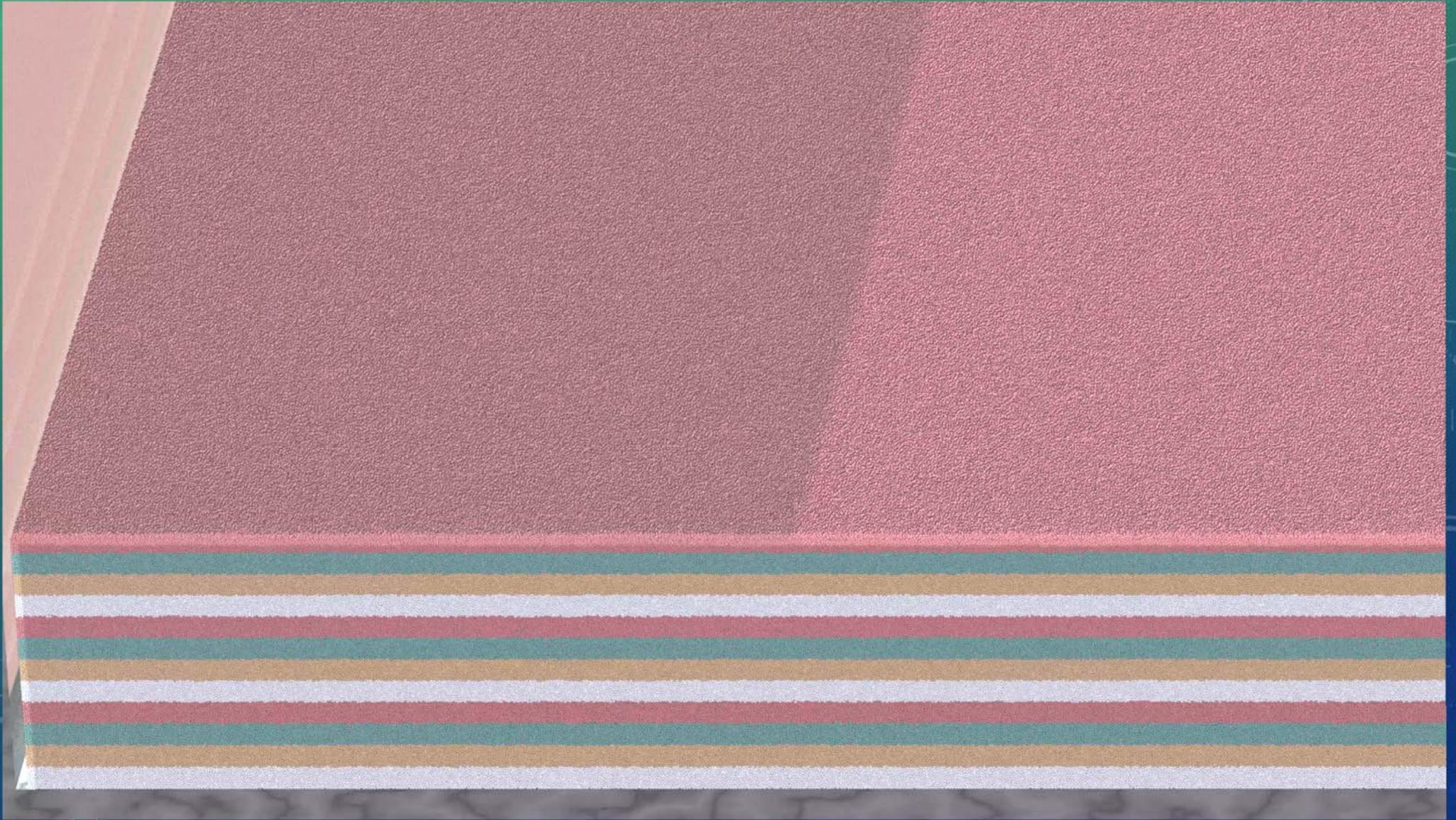
- その他、SIP2、NEDO、等々での研究

STATE OF THE ART DEM SIMULATION.

Box size = $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.8\text{cm}$: $\langle \text{grain size} \rangle \doteq 113\mu\text{m}$, #of particle = 1.9 B



Box size: $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ cm}$ Average particle size $100\mu\text{m}$ Number of particles 2.4 billion



明らかにしたい問い

①3次元的な付加体内部応力

既往研究は主に2次元

②複雑な付加体の形状の成因？

初期状態で巨視的な不均質性が無くても、断層は波打つ

③実際の付加体とのアナロジー

掘削データから付加体の応力状態を知る



データをそのまま可視化できても複雑すぎる

= 自然は本来そういうもの

∴ 本質的なメカニズムを抽出するデータ可視化が重要



室内実験

SCIENTIFIC REPORTS

Article | OPEN | Published: 08 June 2018

Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments

Mikito Furuichi, Daisuke Nishiura, Osamu Kuwano, Arthur Bauville, Takane Hori & Hide Sakaguchi

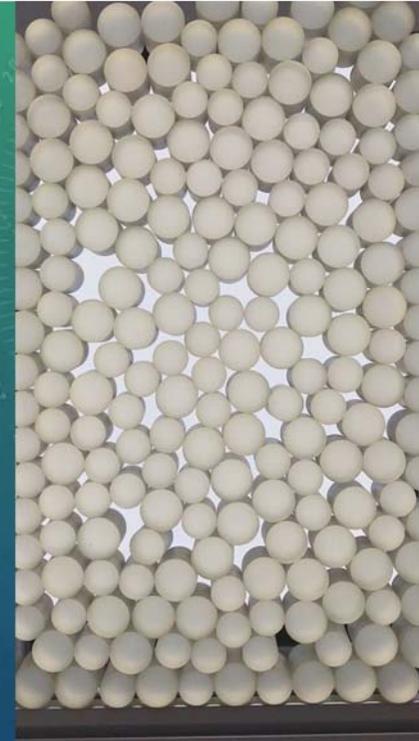
Scientific Reports 8, Article number: 8685 (2018) | Download Citation ↓

M. Furuichi, D. Nishiura, O. Kuwano, A. Bauville, T. Hori, H. Sakaguchi, Scientific Reports (2018), 8, 8685

応力鎖解析

- 粒子間力が強い粒子が鎖状につながる様が応力鎖。
- 強い応力鎖が材料挙動をほぼ支配。
- 室内実験では応力鎖解析はほぼ2次元、3次元は難しい。
- 数値計算では直接3次元解析が可能。

Peter et.al. *Phy rev E* 2005 の概要



1st step: 最大主応力ベクトルを各粒子毎に計算

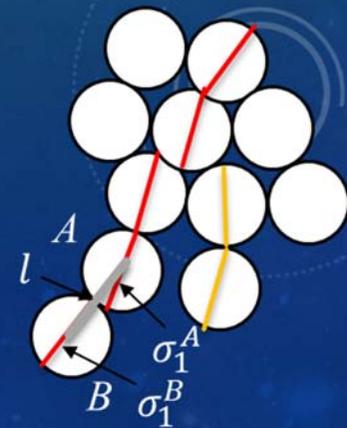
$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{n_c} f_i^c r_j^c.$$

2nd step: 以下の基準を満たすものを応力鎖の候補とする

$$|\sigma_1| \geq \text{average} \quad \text{and} \quad \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) < \frac{|l\sigma_1^A|}{|l||\sigma_1^A|} \leq 1 \quad \text{and} \quad \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) < \frac{|l\sigma_1^B|}{|l||\sigma_1^B|} \leq 1$$

where $l = X_A - X_B$.

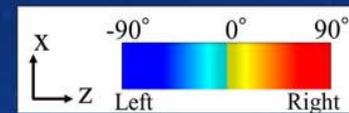
3rd step: 鎖の長さを数え上げ一定数以上のものを応力鎖とする。(我々の場合4粒子)
→ 並列化可能なアルゴリズムで書き換え → [Furuichi et.al., SC18]



見えなかったものが見えるように

世界初の大規模3次元応力鎖データの可視化

①付加体内部の応力は本質的に3次元

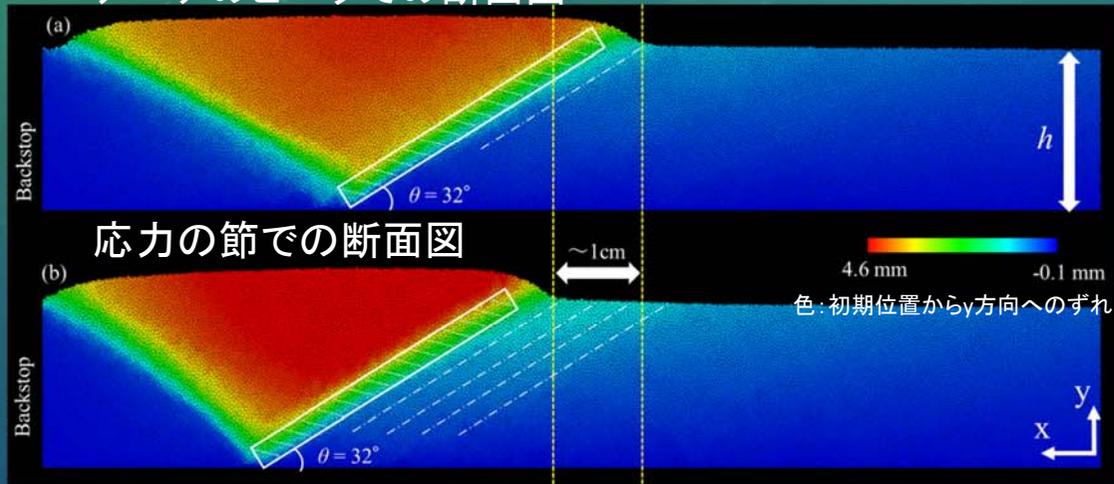


応力鎖可視化で発見したこと

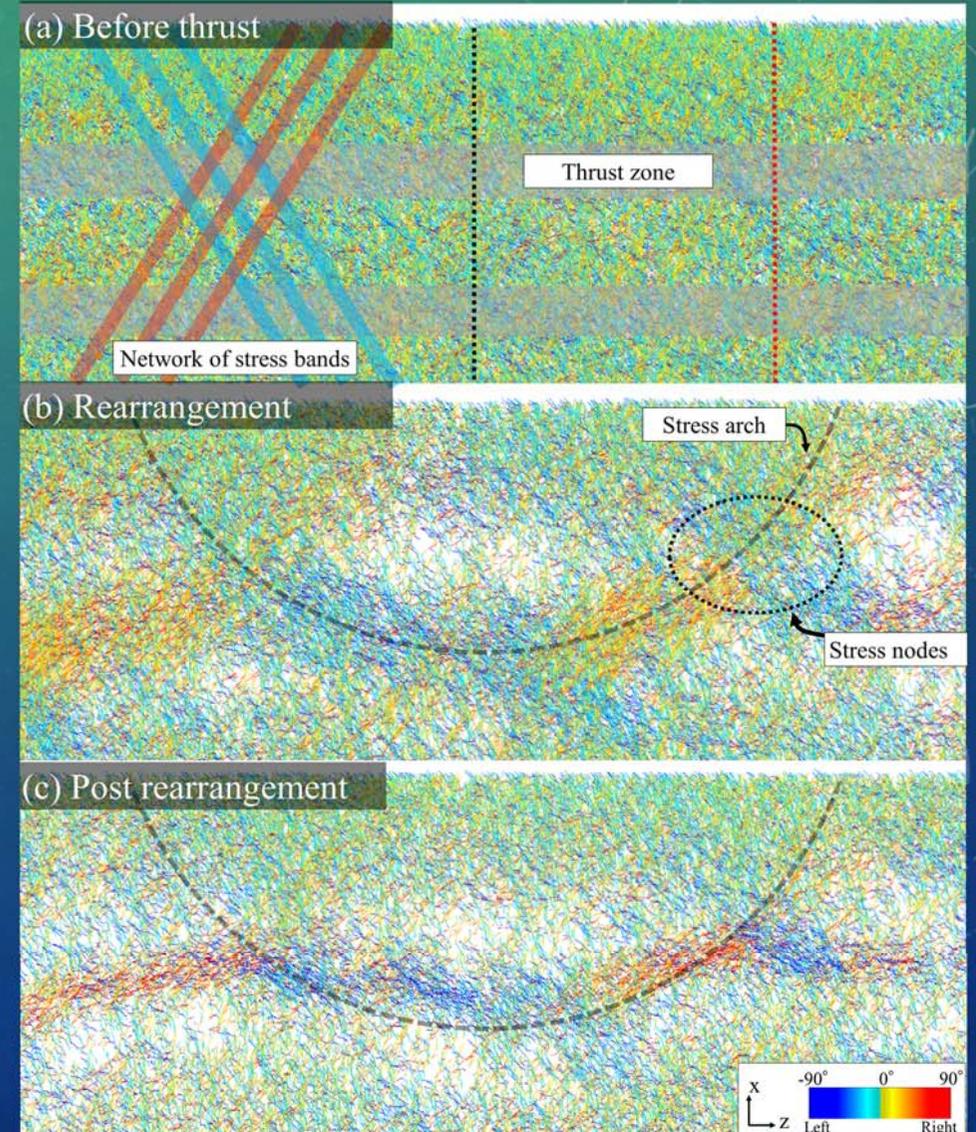
- ・水平方向に応力鎖のアーチが自発的に形成。

応力バンドの形成→破壊領域が発生→伝搬→太くなった応力鎖が交差して固定化→応力アーチの形成→アーチ構造の維持

アーチのピークでの断面図

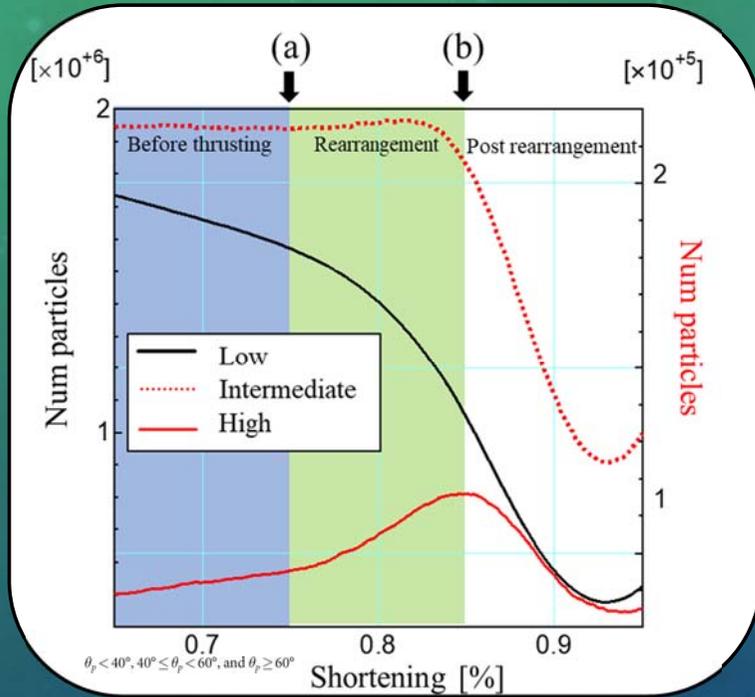


②応力アーチが断層の波形状を決める。



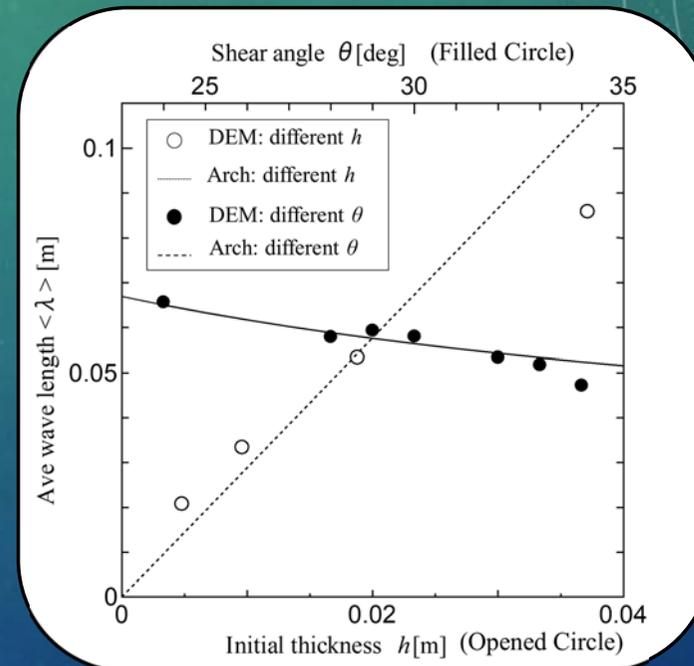
アーチ形成における粉体挙動と長さを決めるもの

● 最大主応力ベクトルの角度変化

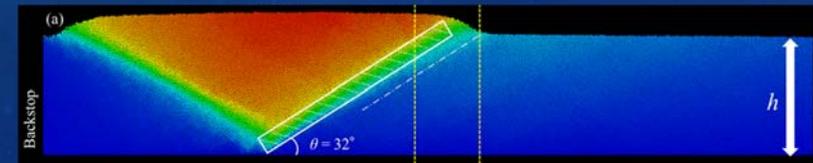


- 断層が入ると同時に、接触粒子の組み合わせが断層面上で著しく変化
- 接触粒子が再構成される際に、最大主応力ベクトルの角度が小さなものから大きなものへ非連続変化
- レオロジーの非線形性を示す

● 理論モデルと数値計算結果の比較

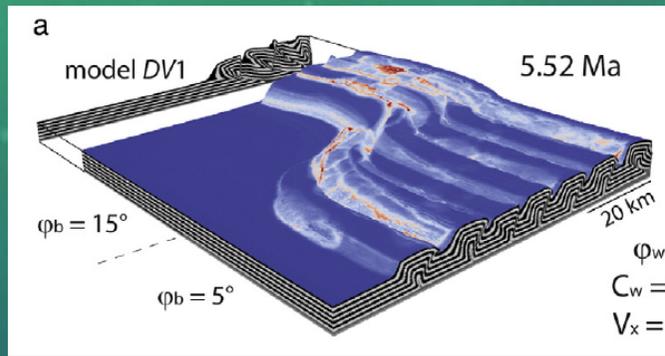


- Parabolicアーチ模型が数値計算結果と良い相関。
- アーチ長は第一近似的に層厚とシア角の関数

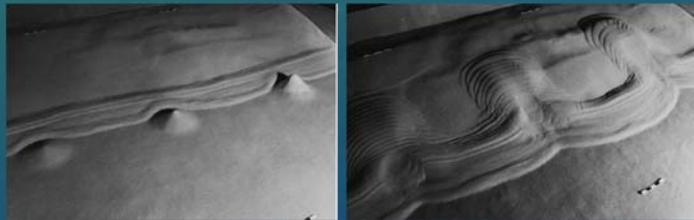


付加体の海溝軸方向の波模様の成因に新見解

● 既往研究



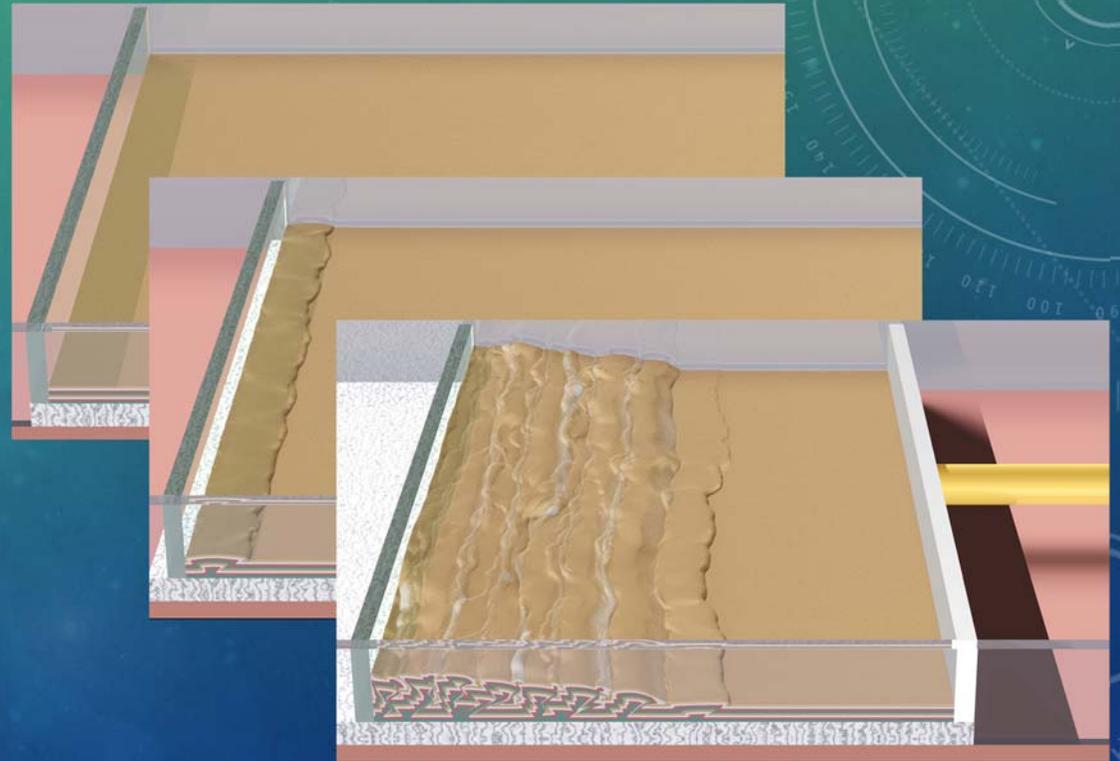
摩擦の空間分布 J. B. Ruh (2014)



海山 S. Dominguez (1998), P. Zweigel (1998)

✓ 巨視的な不均質が波模様の成因

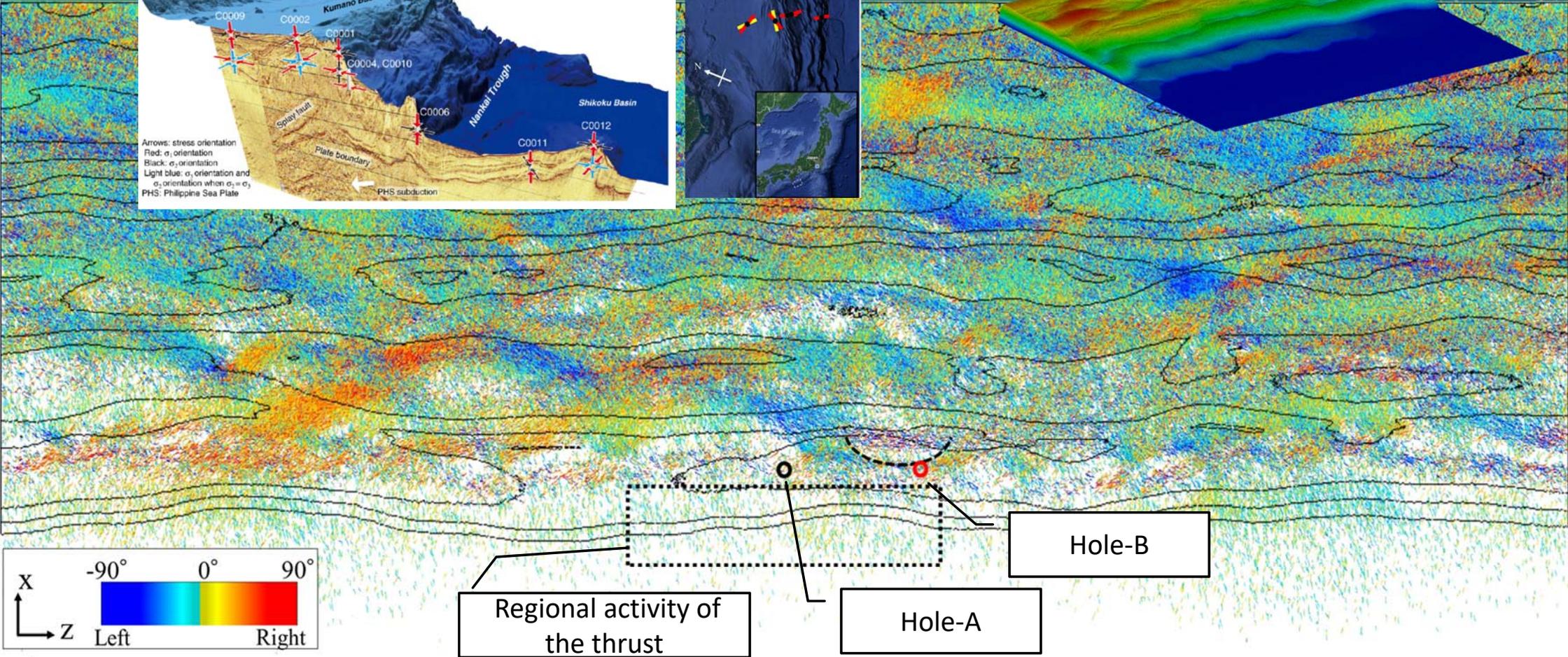
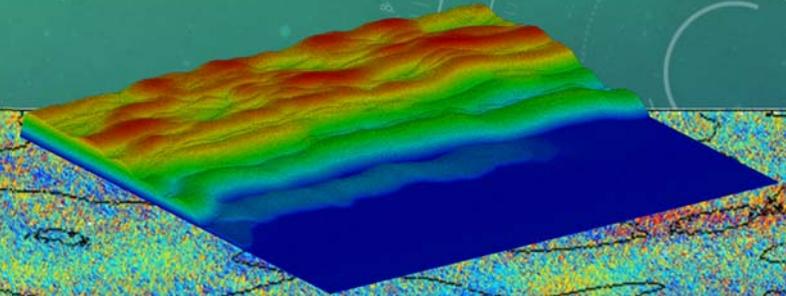
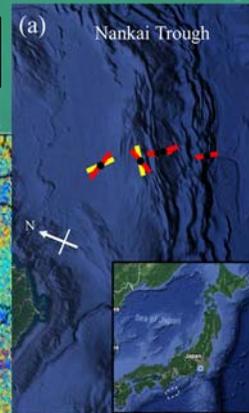
● 本研究

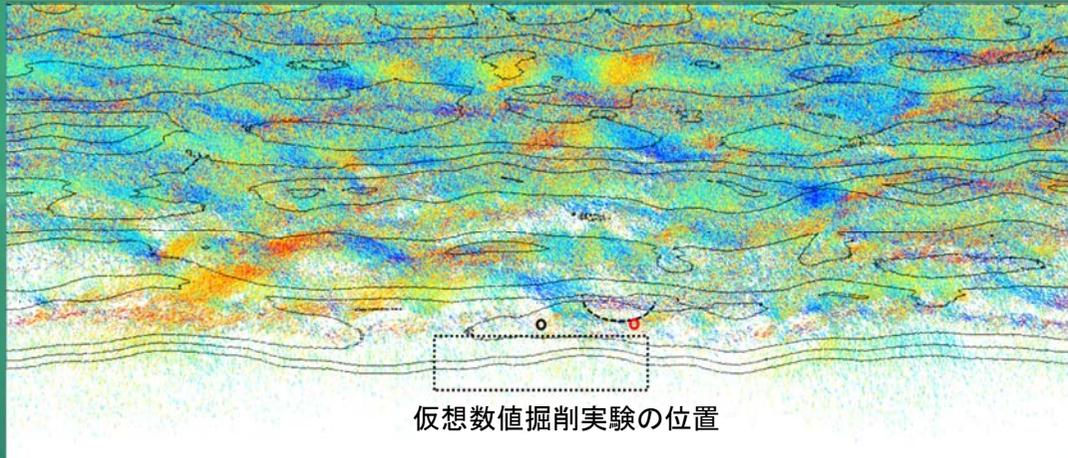


✓ 地殻と粉粒体に共に見られる、微視的な不均質と非線形なレオロジー挙動によって自発的に波模様が形成

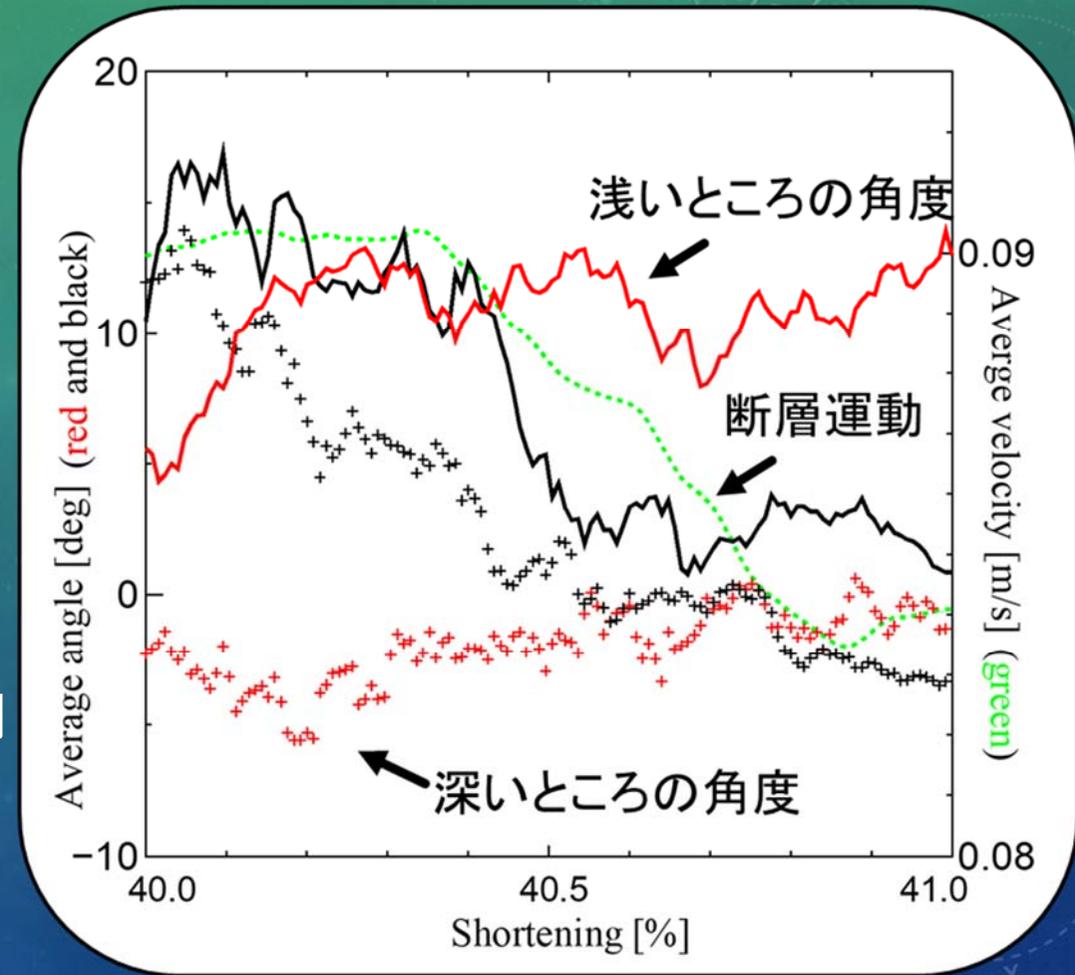
数値ボアホール実験：砂箱実験から紐解く掘削データ

背景





- 数値実験の中で仮想掘削抗測定実験(=Shmax: 最大水平圧縮主応力方向測定)を実施。
- アーチがないところは、断層の運動と角度に相関
→ 大局的運動を反映
- アーチがあるところは、相関が少ない
→ 局所的運動を反映



③応力方向が反映する事象は場所によって異なり時間変化にも特徴があることを示唆。

数値砂箱実験のまとめと今後

- 世界最大19億粒子数 (ES: 1936ノード) の3次元大規模砂箱DEMシミュレーション
 - ①付加体内部の応力不均質性は3次元的
 - ②応力のアーチ構造の自発的な形成と付加体形状への影響
 - ③海底物理探査による応力方向は場所によって反映する現象が異なることを示唆。判別には時間変化のモニタリングがカギ
- 次のステージ : より現実的＝複雑な設定、解析方法(構造と応力の関係整理)の改良、観測・実験との比較



RIKEN
K Computer



JAMSTEC
Earth Simulator