

応用力学論文賞講演

高速圧縮破砕を受ける砂層に対する ユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈

筑波大学

松島亘志

立命館大学

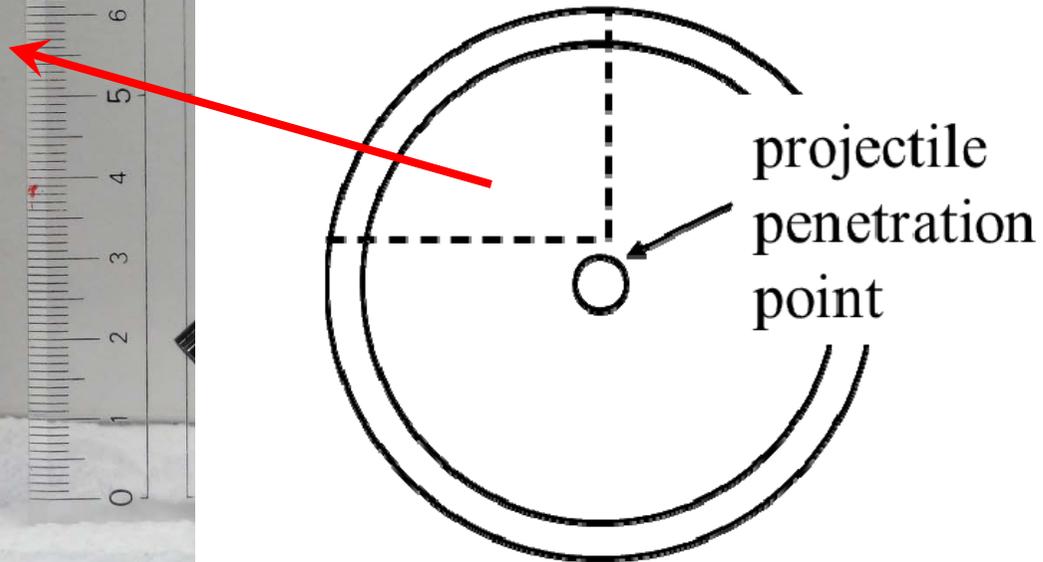
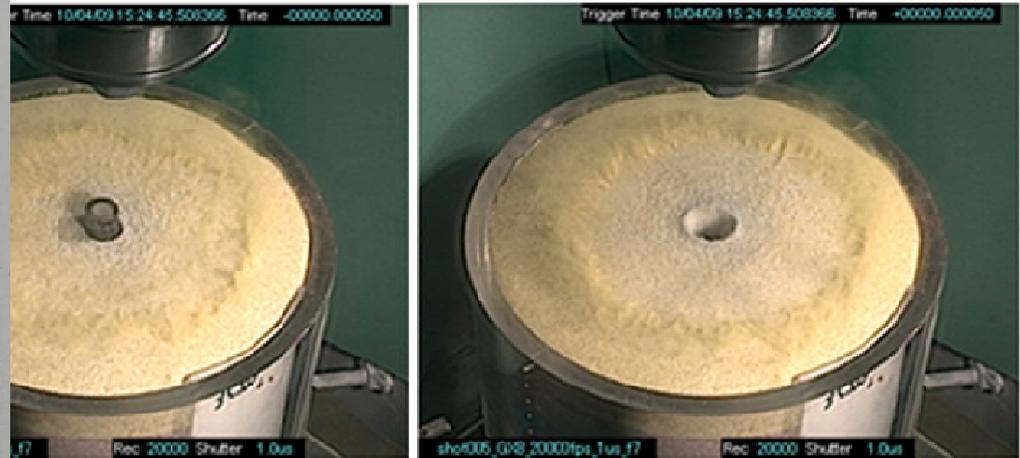
渡辺圭子

PMEE (Particulate Mechanics for extreme environment)



米国ローレンスリバモア研究所

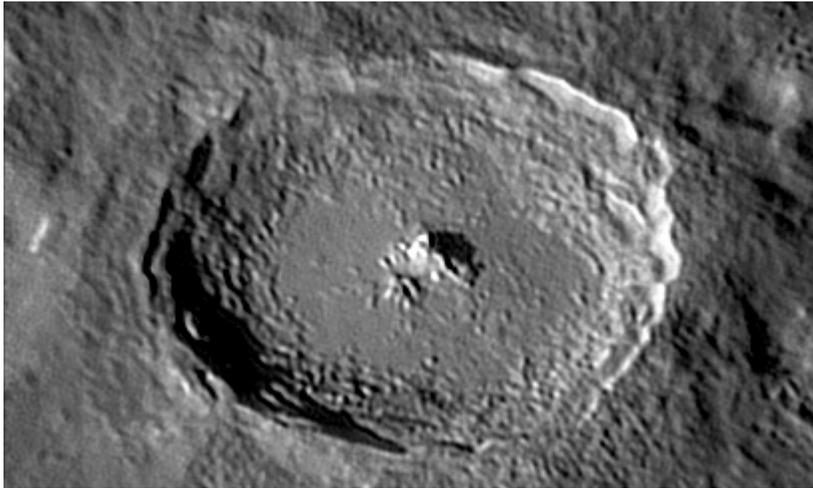
室内実験 (渡辺・福間, 2011)



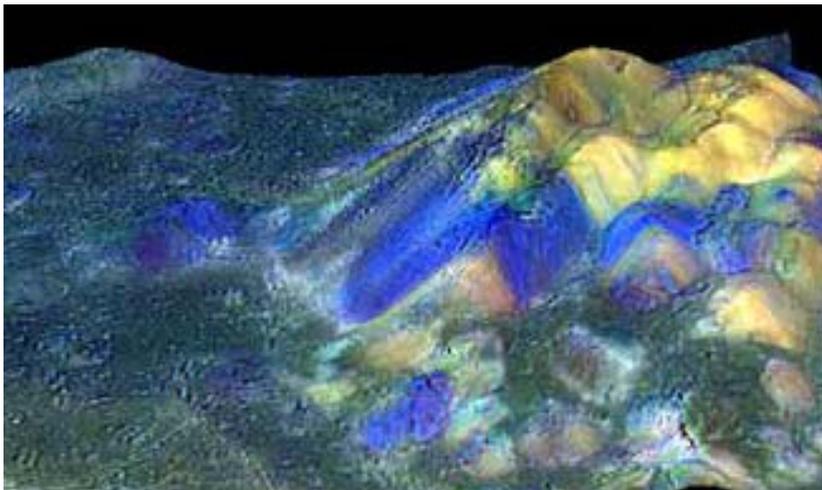
はじめに: 高速衝突問題 (High speed impact problems)



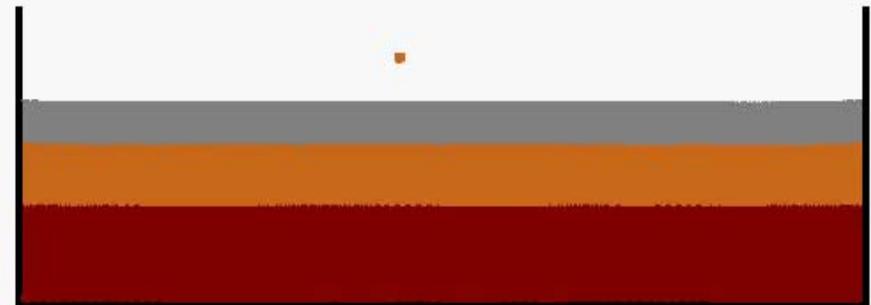
はじめに: 高速衝突問題



ティコクレーター(直径85km)



Ohtake et al.: Nature, 461,10,2009



月面クレーター中央丘の物質は、
どのくらいの深さから来た？

高速～低速までの
地盤流動モデルが必要

本研究の成果

- [1] 破碎する粒状体の圧縮に関する**状態方程式(EOS)**を導いた。
- [2] そのEOSは土質力学の古典的な **$e\text{-log}(p)$** 関係(準静的1次元載荷実験によって得られる)との**類似性**を示した。
- [3] 提案する状態方程式を用いた**1次元衝撃波伝播解析**と**高速衝突実験(渡辺ら)**を比較してみた。

Rankine-Hugoniot 方程式: 衝撃波の支配方程式

質量保存則

$$\rho_0 U = \rho(U - u)$$

運動量保存則

$$P - P_0 = \rho(U - u)u = \rho_0 U u$$

エネルギー保存則

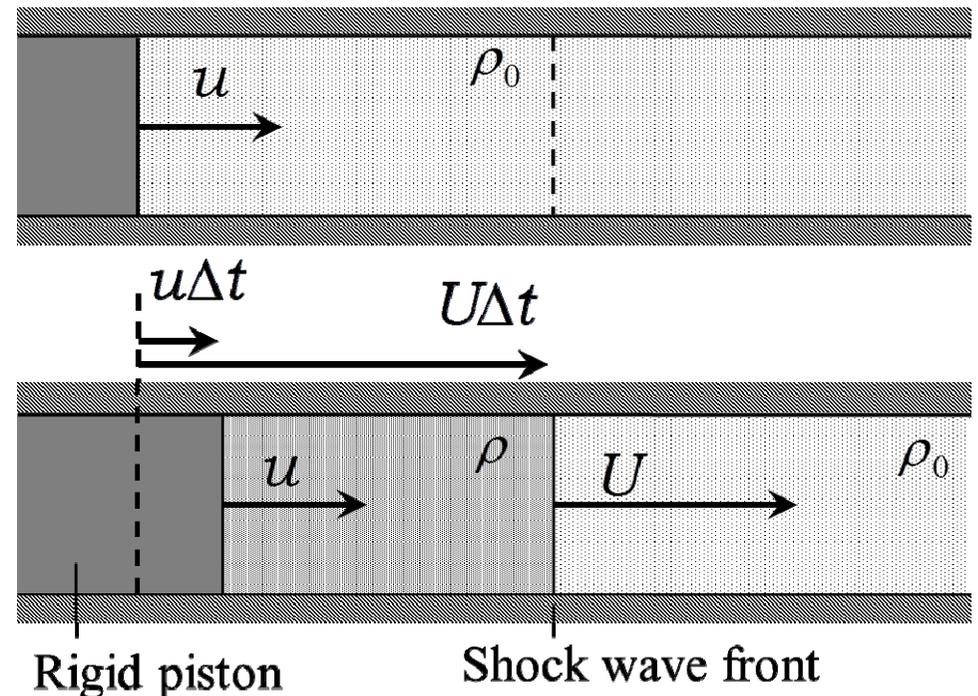
$$E - E_0 = \frac{1}{2}(P + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)$$

U : 衝撃波速度

u : 剛なピストンの速度

ρ, P, E : 圧縮された媒質の密度、圧力、比内部エネルギー
下付き0は初期状態の諸量

衝撃破面を境に物理量が不連続



固体の状態方程式 (Hugoniot EOS)

$$U = c_0 + su$$

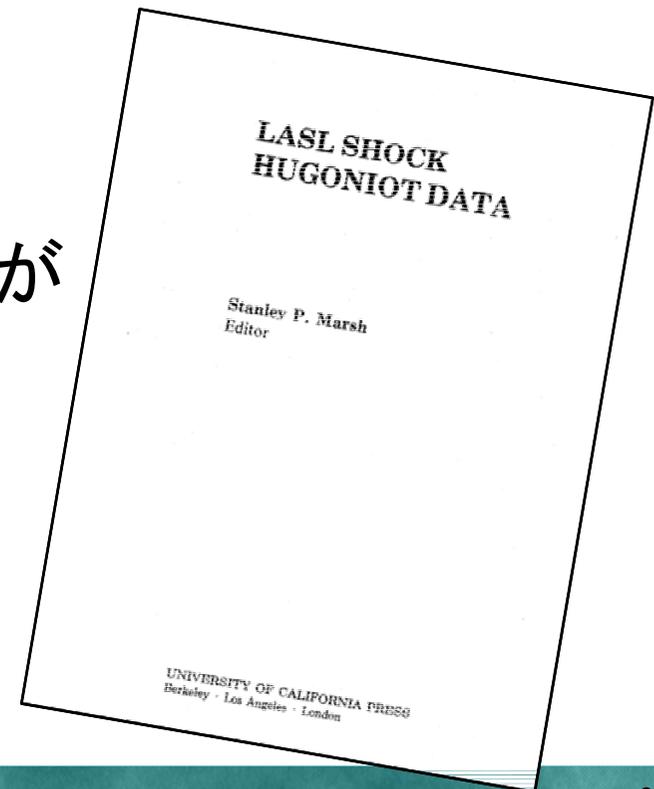
衝撃波速度増加率を表す無次元材料パラメータ

媒質のバルク音速(縦波速度)

様々な材料(固体、粉体)の材料定数が
衝撃実験から同定されている

(eg., LASL shock Hugoniot data, 1980.)

Los Alamos



式変形→衝撃波の状態方程式(圧力-体積ひずみ関係)

$$\rho_0 U = \rho(U - u)$$

$$P - P_0 = \rho(U - u)u = \rho_0 U u$$

$$U = c_0 + s u$$

を $\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$ 体積ひずみ

を用いて変形すると

$$P - P_0 = \rho_0 \frac{c_0^2 \varepsilon_v}{(1 - s\varepsilon_v)^2} = \frac{K_0 \varepsilon_v}{(1 - s\varepsilon_v)^2}$$

衝撃波の状態方程式

ここまでは基本

破碎を伴う粒状体の状態方程式[1/4]

- [1] 粒状体の衝撃波実験でもHugoniot状態方程式が成立
(実験事実)
- [2] 粒状体**全体**の圧縮ひずみ
= 粒子**母材**の圧縮ひずみ + 粒状体の**間隙比変化**
- [3] 粒状体の間隙比変化は粒子破碎による(**塑性圧縮**)
- [4] 間隙比 $\rightarrow 0$ で、母材の状態方程式に漸近
 \rightarrow 粒状体としての K_0 と s に関する関係式

破碎を伴う粒状体の状態方程式[2/4]

紛体層の圧縮ひずみ： $\varepsilon_v \Rightarrow$ 固相の圧縮ひずみ： ε_{vs}

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0}, \quad \varepsilon_{vs} = \frac{V_{s0} - V_s}{V_{s0}}$$

$$e_0 = \frac{V_0}{V_{s0}} - 1, \quad e = \frac{V}{V_s} - 1$$

$$\therefore 1 - \varepsilon_v = \frac{1 + e}{1 + e_0} (1 - \varepsilon_{vs})$$

[2]粒状体**全体**の圧縮ひずみ
= 粒子**母材**の圧縮ひずみ
+ 粒状体の**間隙比変化**

幾何学的関係

これを衝撃波の状態方程式に代入すると

$$P - P_0 = \frac{K_0 \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{vs}) \frac{1 + e}{1 + e_0} \right\}}{\left[1 - s \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{vs}) \frac{1 + e}{1 + e_0} \right\} \right]^2}$$

破砕を伴う粒状体の状態方程式[3/4]

$$P - P_0 = \frac{K_0 \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{vs}) \frac{1+e}{1+e_0} \right\}}{\left[1 - s \left\{ 1 - (1 - \varepsilon_{vs}) \frac{1+e}{1+e_0} \right\} \right]^2}$$

[4] 間隙比 $\rightarrow 0$ で、母材の状態方程式に漸近

この式で、 $e = 0$ (固相のみの状態)とした場合に

$$P - P_0 = \frac{K_{s0} \varepsilon_{vs}}{(1 - s_s \varepsilon_{vs})^2}$$

に漸近するとして、 (K_0, s) と (K_{s0}, s_s) の関係を求めると

$$s = \frac{s_s(1+e_0)}{1+e_0s_s}$$

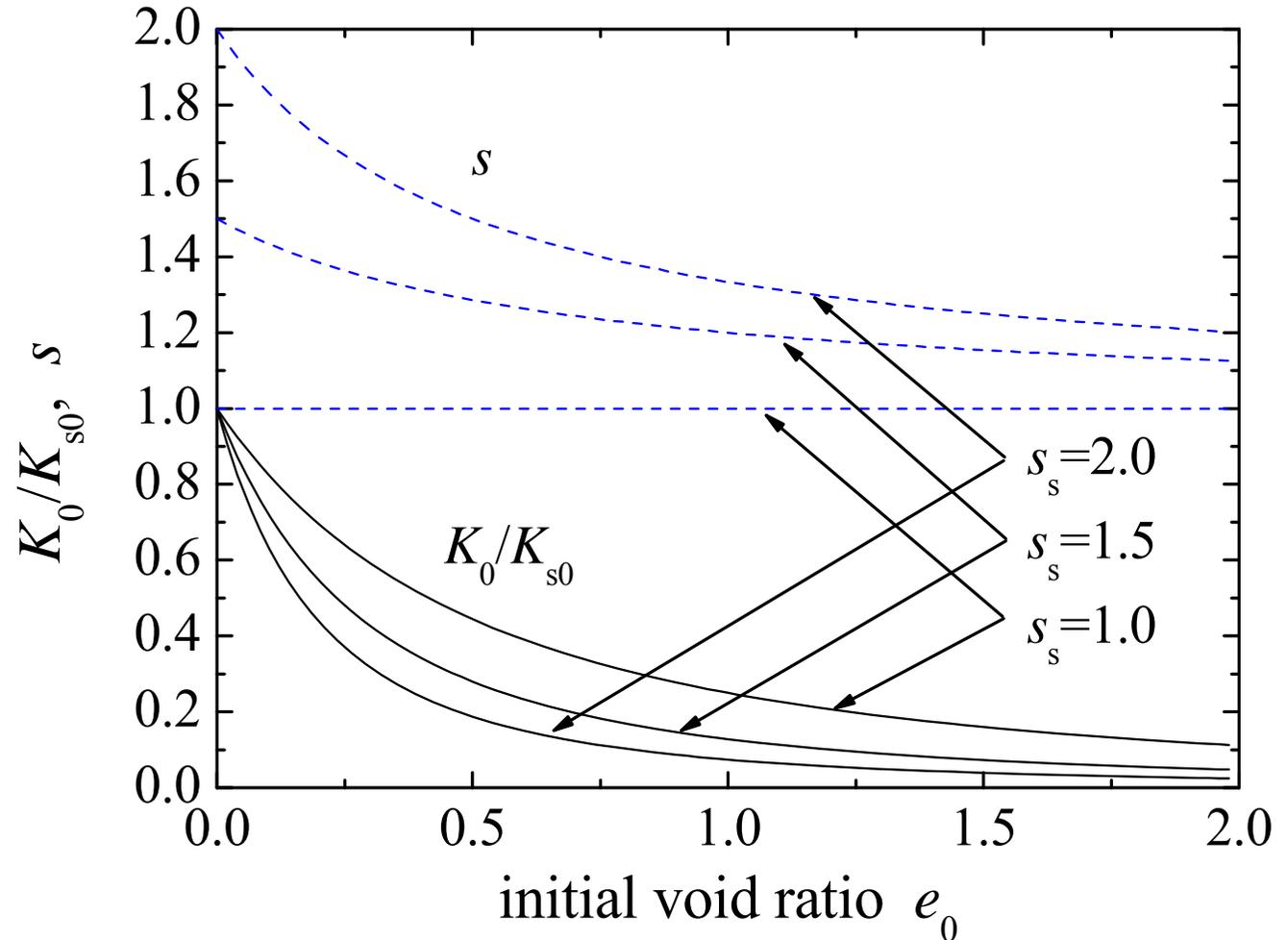
$$K_0 = \frac{(1+e_0)}{(1+e_0s_s)^3} K_{s0}$$

粒状体のパラメータ (K_0, s) が母材のパラメータ (K_{s0}, s_s) と初期間隙比 e_0 で表された。

破碎を伴う粒状体の状態方程式[4/4]

$$s = \frac{s_s(1 + e_0)}{1 + e_0 s_s}$$

$$K_0 = \frac{(1 + e_0)}{(1 + e_0 s_s)^3} K_{s0}$$



粉体の s は、母材と同様に $s=1.0\sim 2.0$

→実験結果に整合

LASL data: TUFF(凝灰岩)粉体データによる検証

$$s = \frac{s_s(1 + e_0)}{1 + e_0 s_s}$$

$$K_0 = \frac{(1 + e_0)}{(1 + e_0 s_s)^3} K_{s0}$$

TUFF rock type A

$$\rho_s = 1.695(\text{g} / \text{cm}^3),$$

$$c_{s0} = 1.32(\text{km} / \text{s}), s_s = 1.41$$

TUFF rock type B

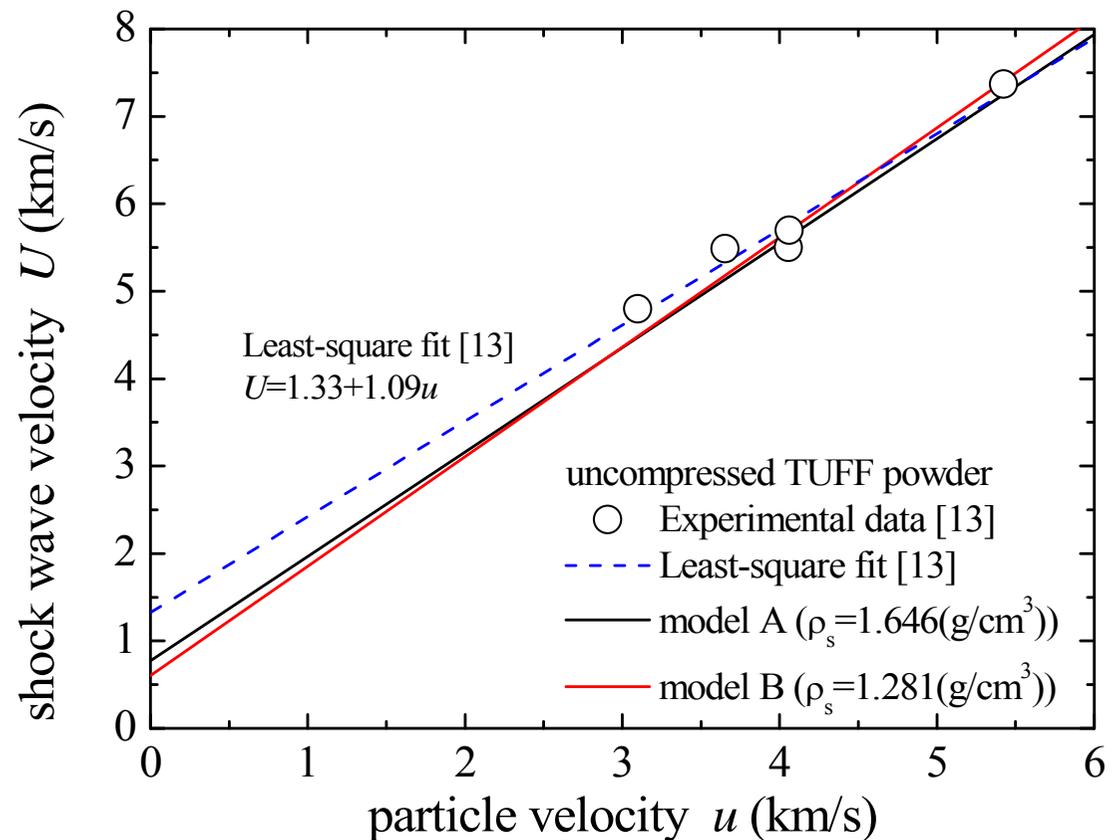
$$\rho_s = 1.281(\text{g} / \text{cm}^3),$$

$$c_{s0} = 0.83(\text{km} / \text{s}), s_s = 1.39$$

TUFF uncompressed powder

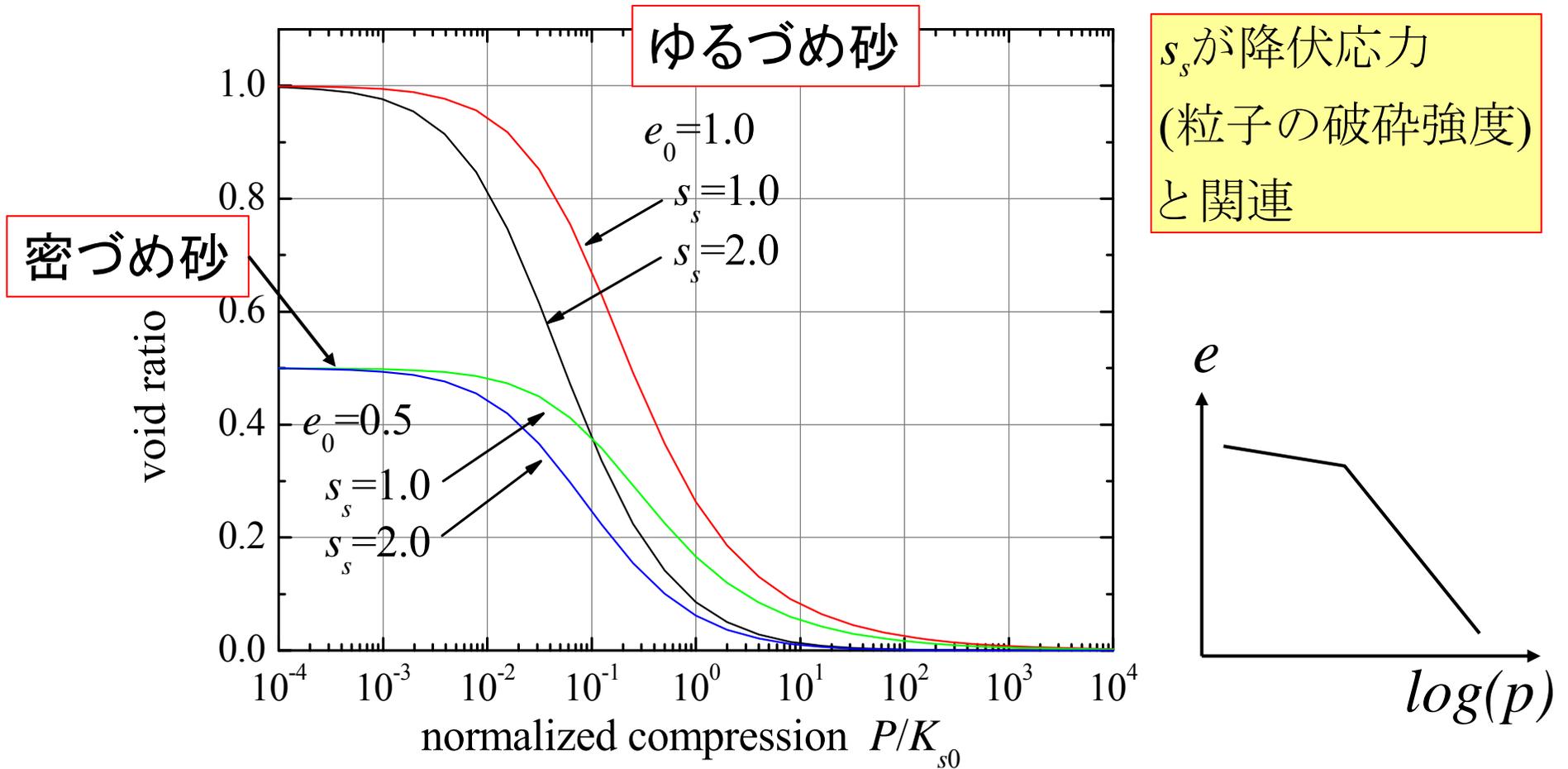
$$\rho_0 = 0.922(\text{g} / \text{cm}^3)$$

$$\rightarrow e = \frac{\rho_s}{\rho_0} - 1 = 0.838 \text{ or } 0.389$$



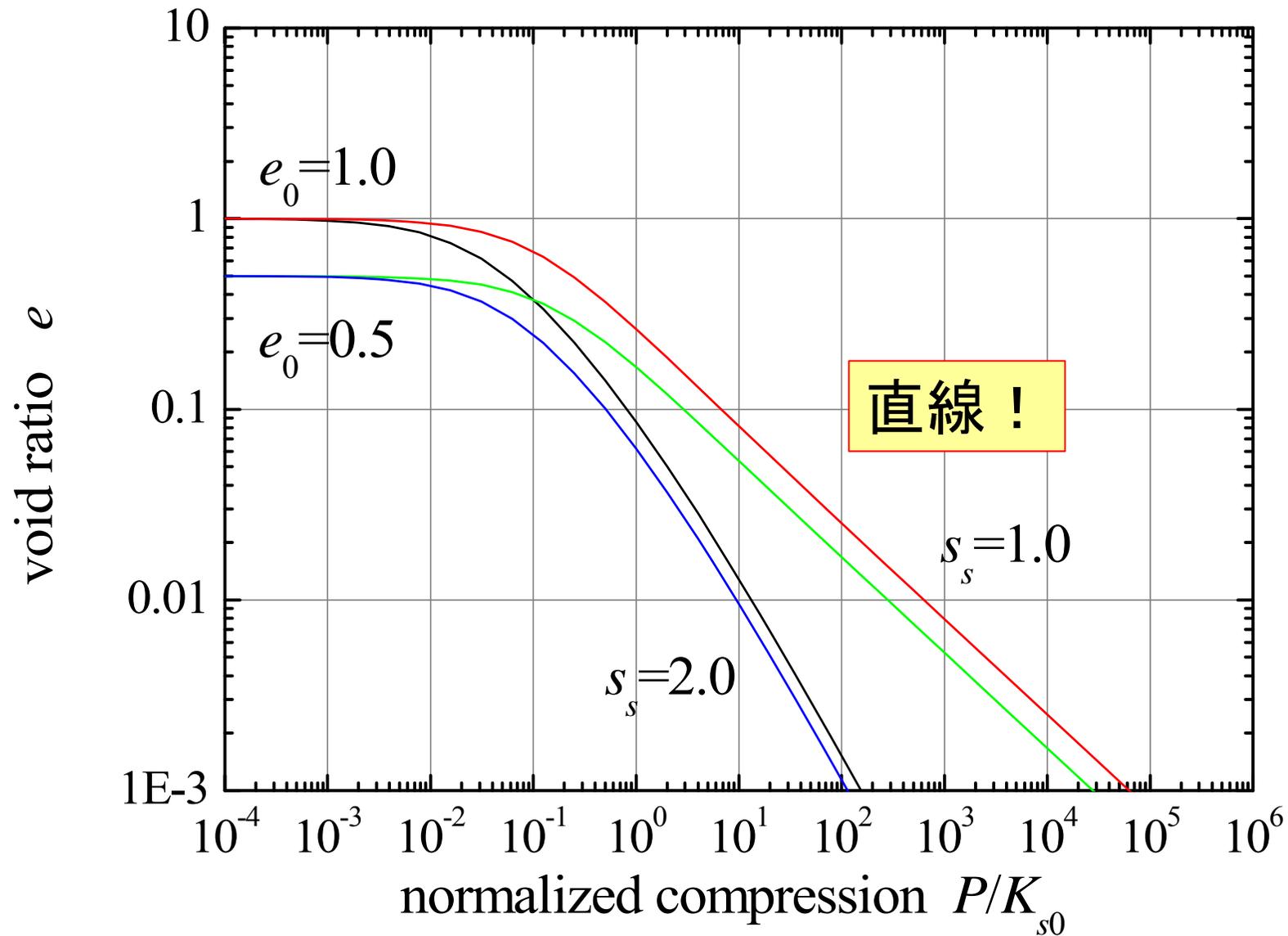
母材のデータと初期間隙比
より得られる結果と整合

e-log(p)関係としての表現



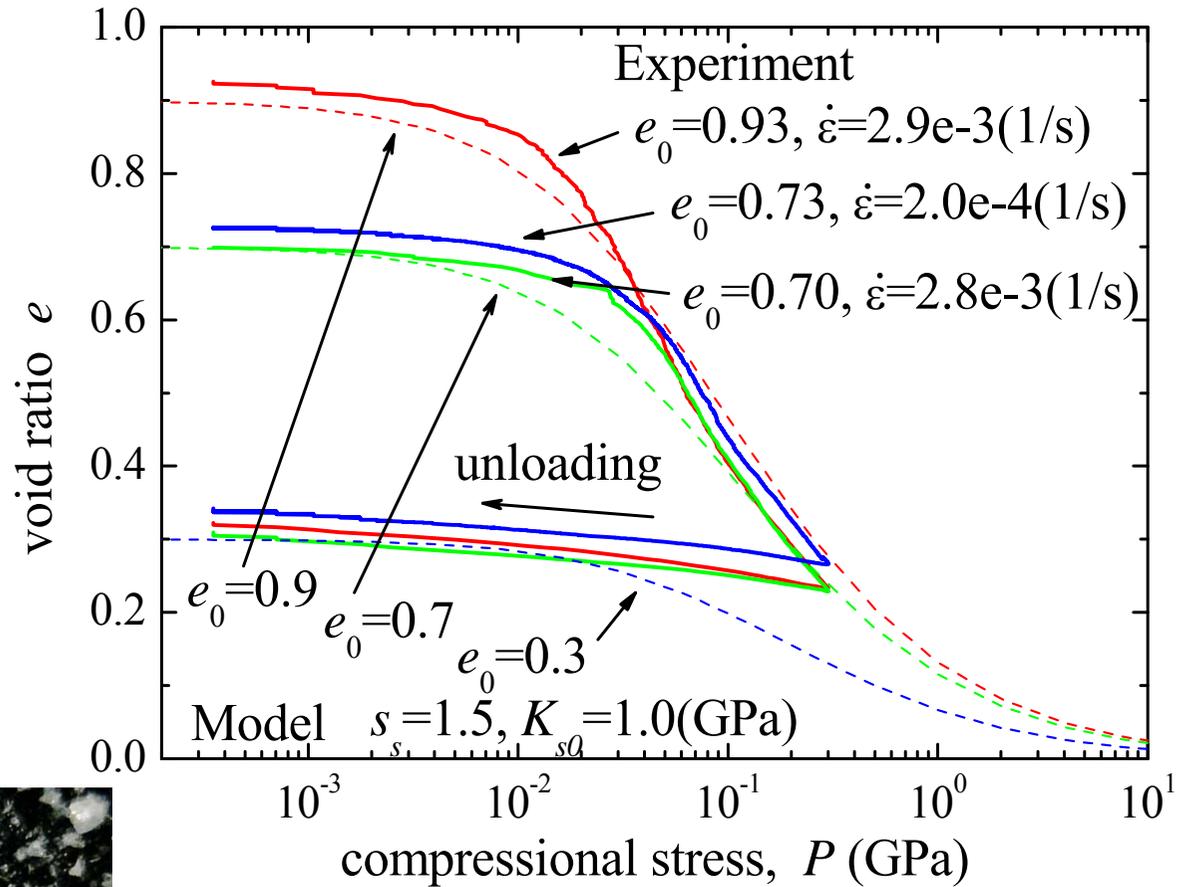
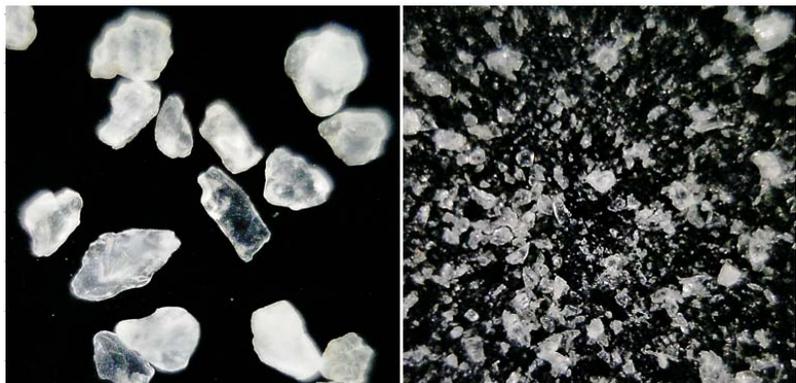
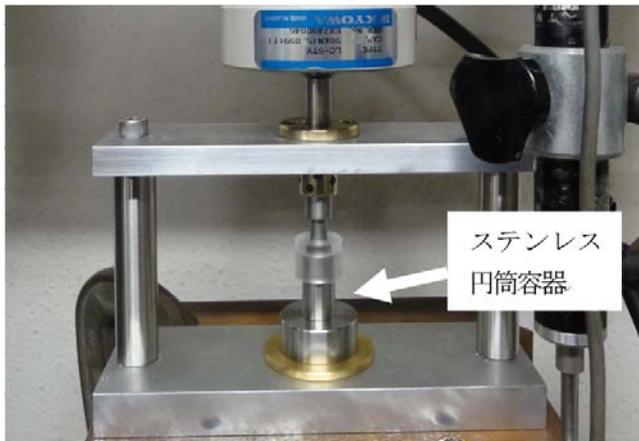
土質力学のe-log(p)に似ている！

ちなみに、 $\log(e)$ - $\log(p)$ では？



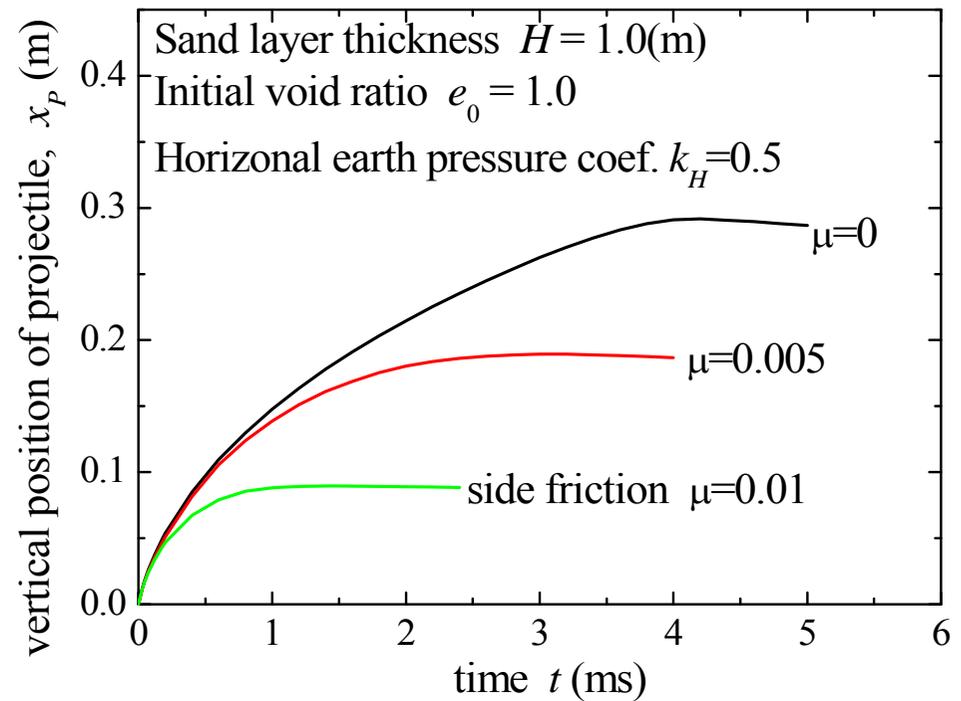
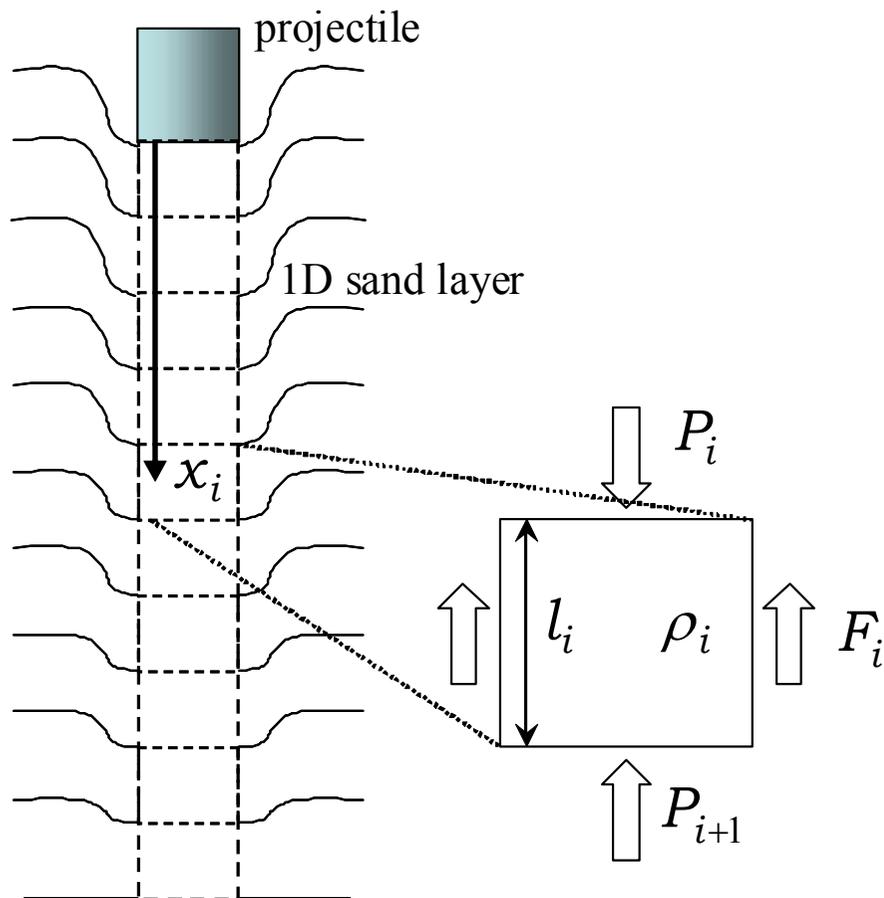
準静的1次元圧縮試験との関係

高圧一次元圧縮試験



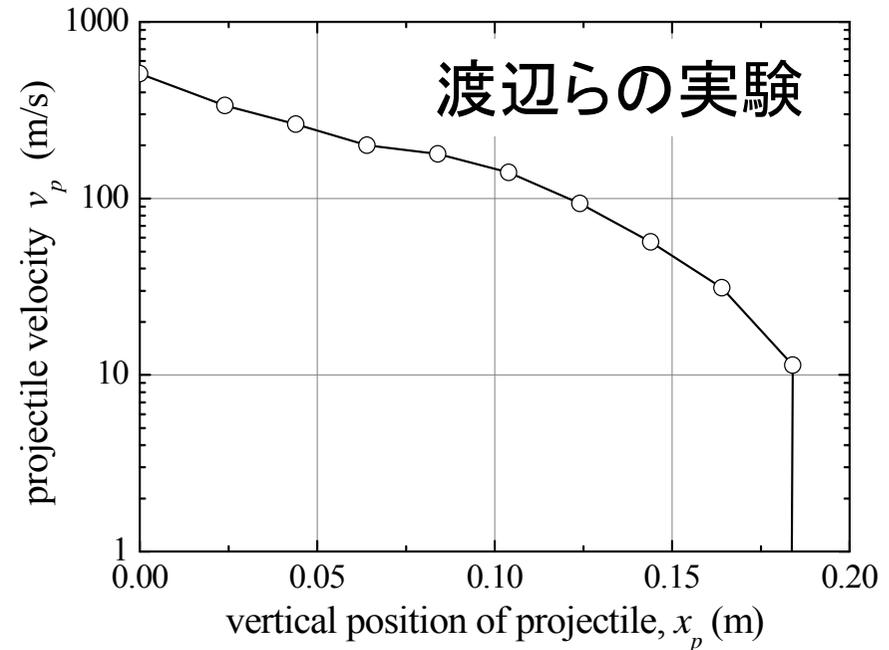
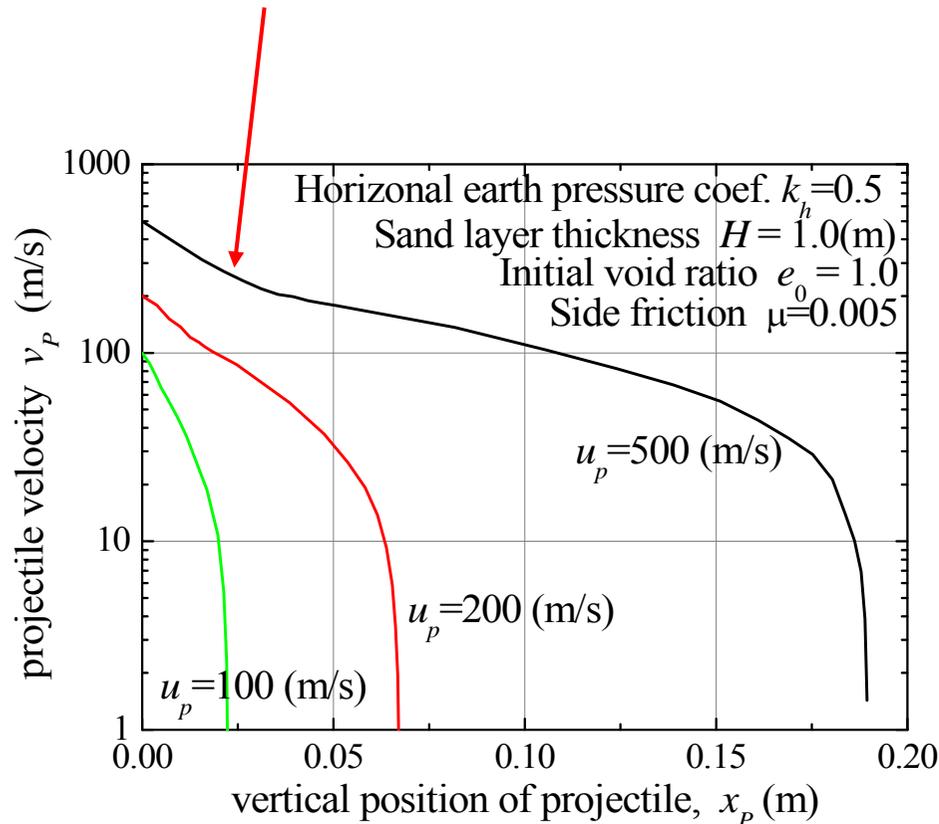
e-log(p)の新しい解釈

砂層への飛翔体貫入の1次元数値解析



砂層への飛翔体貫入の1次元数値解析

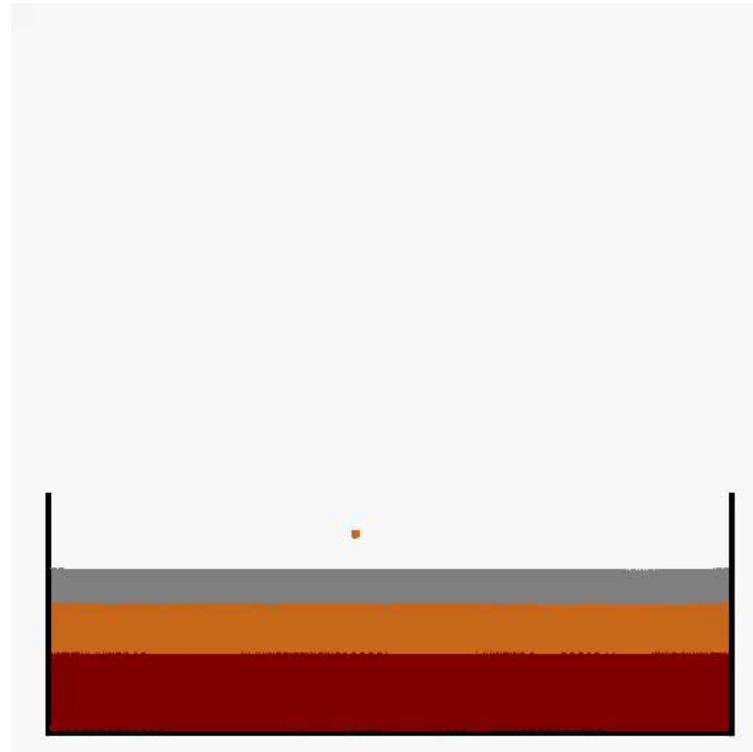
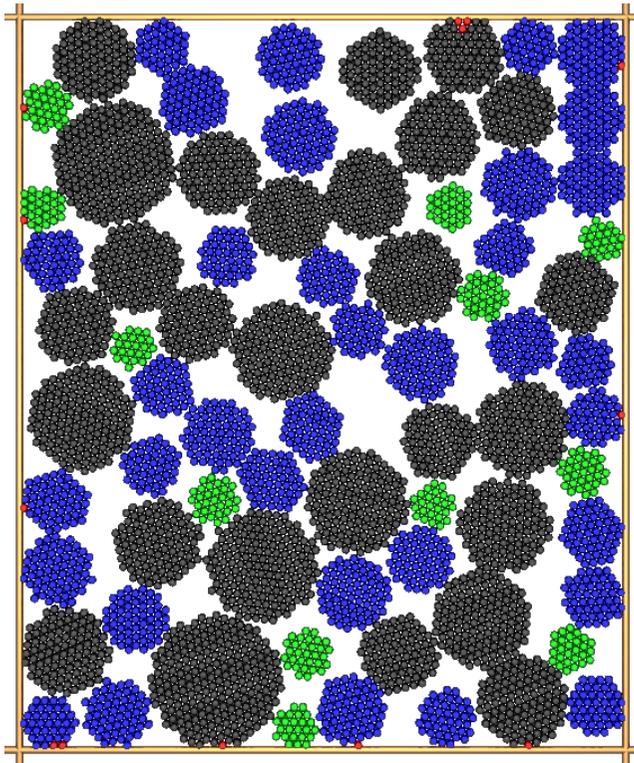
バルク音速(300m/s)より
大きな貫入速度では
初期勾配が途中で変化



実験での観測結果と
整合

おわりに: 今後の課題

- 1) 粒子破砕メカニズムとのかかわり (Compsafe 2014)
- 2) 1次元圧縮挙動+せん断挙動→一般的構成モデル
→室内実験の3次元解析→実規模現象の解析



基盤研究(B) H26-H28

「**高圧下**における地盤材料の**圧縮、せん断と固化**の
マイクロメカニクス」

松島 亘志	(筑波大学)	低速載荷実験
渡辺 圭子	(立命館大学)	衝突載荷実験
別府 万寿博	(防衛大学校)	爆発載荷実験
北島 弘子	(産総研)	高圧せん断実験
波多野 恭弘	(東大 地震研)	粉体物理理論

**地震断層の物理、衝突・爆発現象の物理、
統一的な粒状体理論、の解明**