

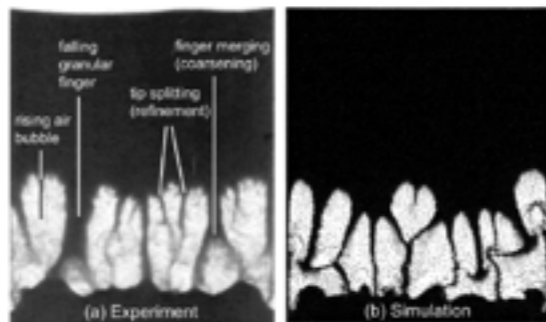
粉体層における応力伝播則

桂木洋光 (九大総理工)

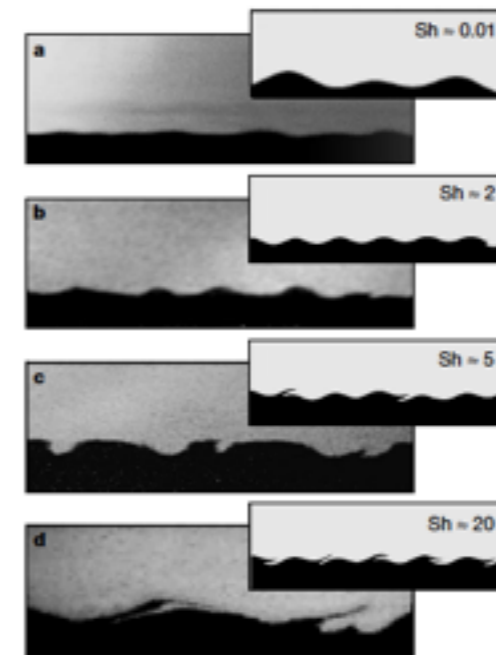
粉体と流体

- 流体を特徴付ける不安定性
 - レイリー・テイラー不安定性
 - ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
 - レイリー・プラトー不安定性
 - テイラー（渦）不安定性
 - （ヴィスカス）フィンガリング不安定性

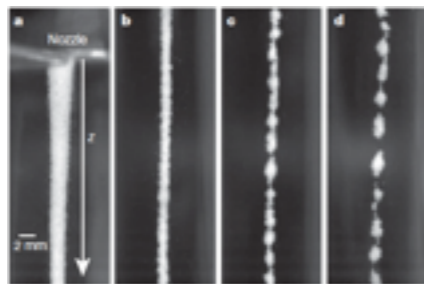
粉体における不安定性



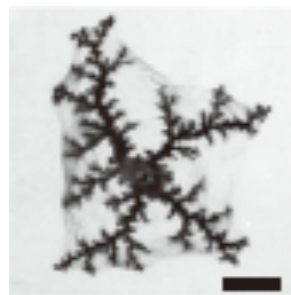
J. L. Vinningland et al., Phys. Rev. Lett. 99, 048001 (2007)
 数十粒子分くらいの波長での不安定フィンガリング



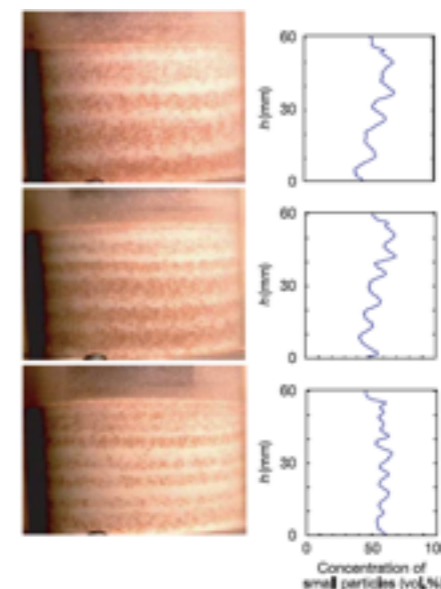
S. L. Conway et al., Nature 431, 433 (2004)
 斜面流における粒子混合



J. R. Royer et al., Nature 459, 1110 (2009)
 粒子間付着力が有効表面張力



X. Cheng et al., Nature Phys. 4, 234 (2008)
 表面張力0の粘性指



D. J. Goldfarb et al., Nature 415, 302 (2002)
 分離

似て非なる？

- 現象的には似ている不安定性的現象
- 表面張力がない？ある？
- 応力に対する応答？

衝突に対する応答

- 衝突への応答として流体的に振る舞う部分と固体的に振る舞う部分がある
- 特に固体的振る舞い（クーロン摩擦）の挙動が理解に苦しむ

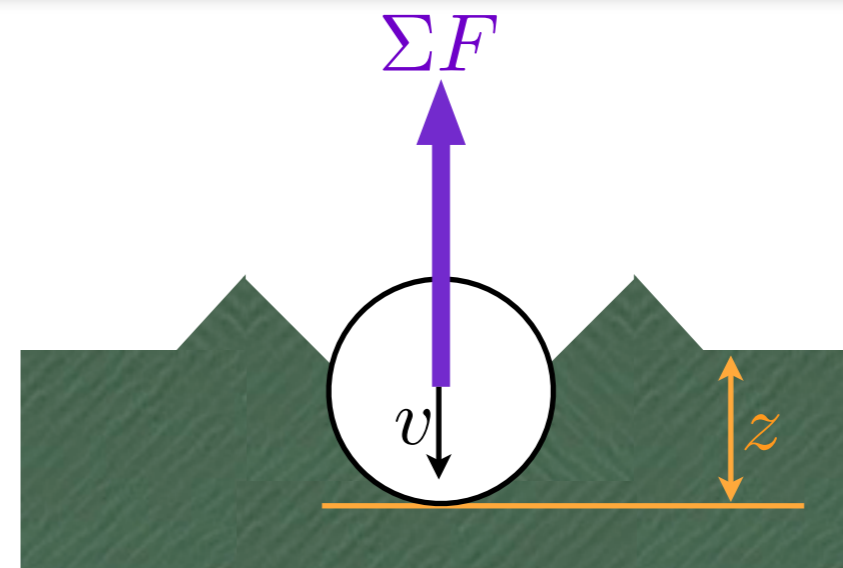
衝突粉体抵抗

$$\Sigma F = -mg + k|z| + m\frac{v^2}{d_1}$$

gravitational force

velocity dependent inertial drag
(depth independent)

depth proportional frictional drag
(velocity independent)



H. Katsuragi & D. J. Durian, Nature Phys., 3, 420 (2007)

単純な摩擦則？

$$f(z)/m = a + g - (1/d_1)v^2$$

$$\frac{f(z)}{m} = \frac{k}{m}|z|$$

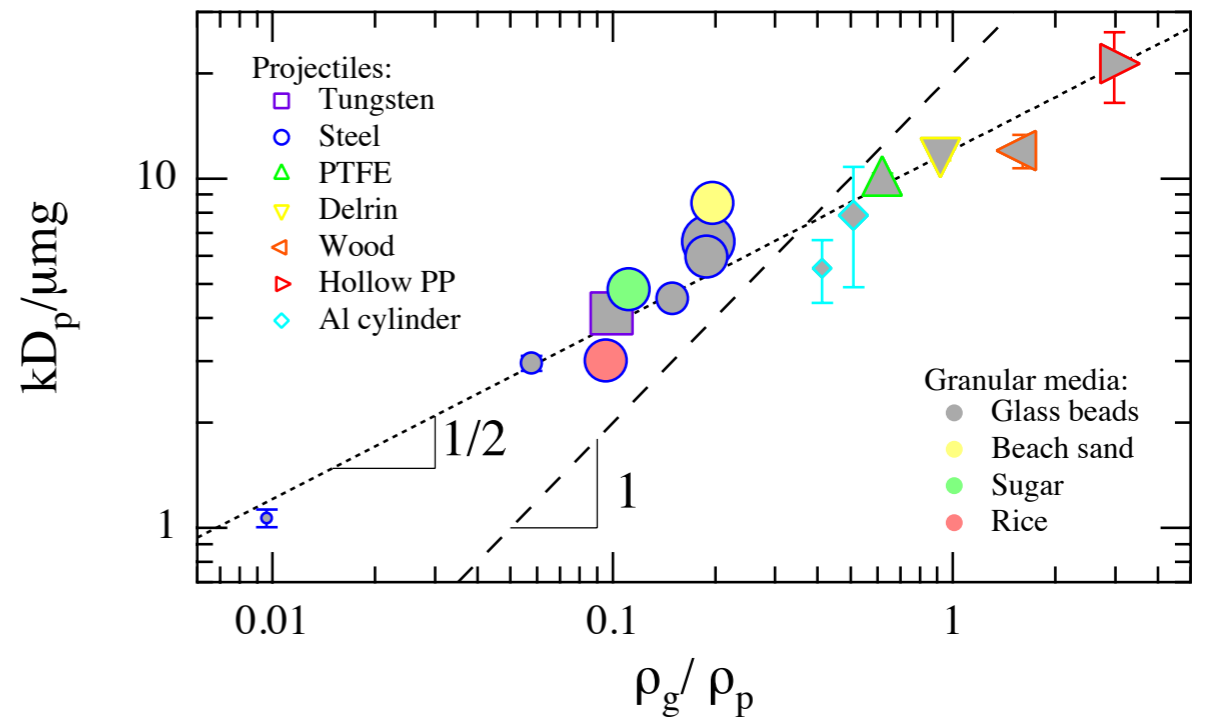
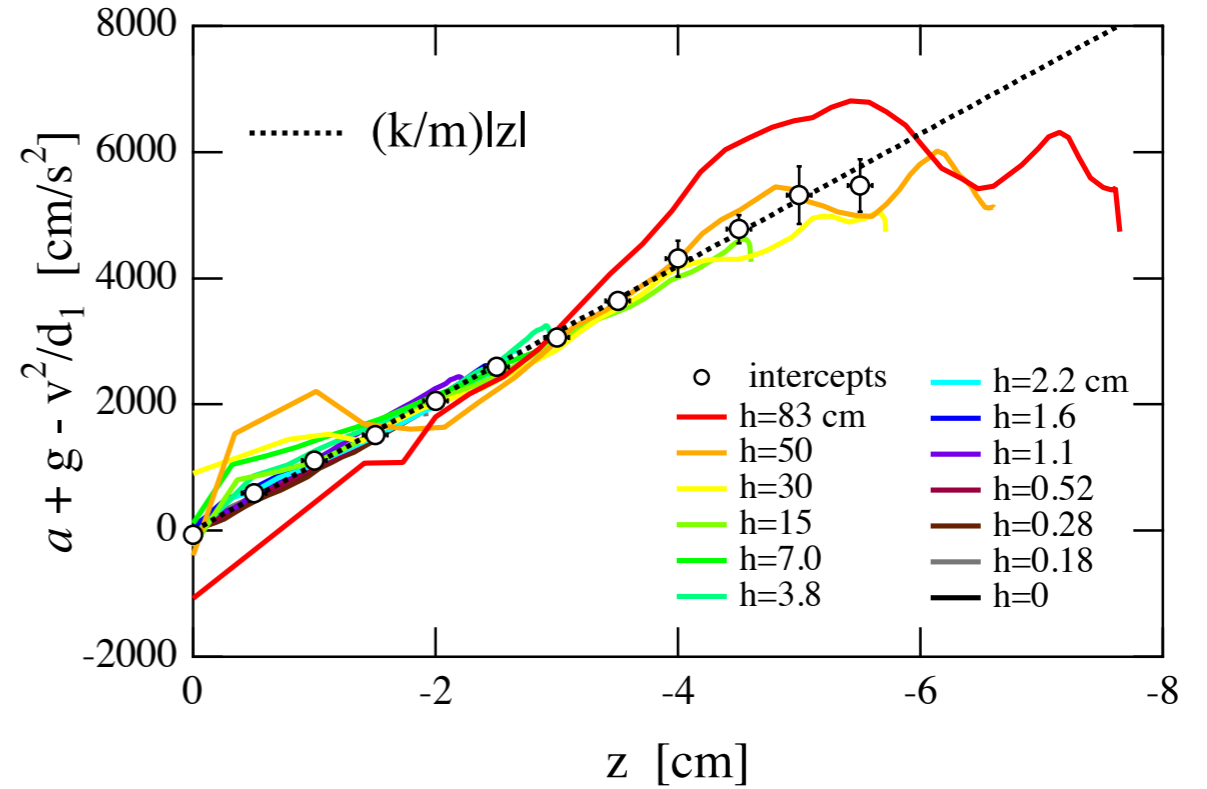
hydrostatic pressure + Coulomb friction?

hydrostatic expectation

~~$$\frac{k}{m} \frac{D_p}{g} \sim \frac{\rho_g}{\rho_p}$$~~

empirical scaling

$$\frac{k}{m} \frac{D_p}{g} = 12\mu \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1/2}$$



流体？粉体？？

- 静水圧
- Janssen 則
- Pascalの法則

STATIC

-
- 慣性, 粘性, ...
 - シアーバンディング

DYNAMIC

疑問

粉体摩擦を決めるのは何か？

もしくは

粉体層内で応力はどのように伝播するのか？



静水圧的, Janssen的, . . .

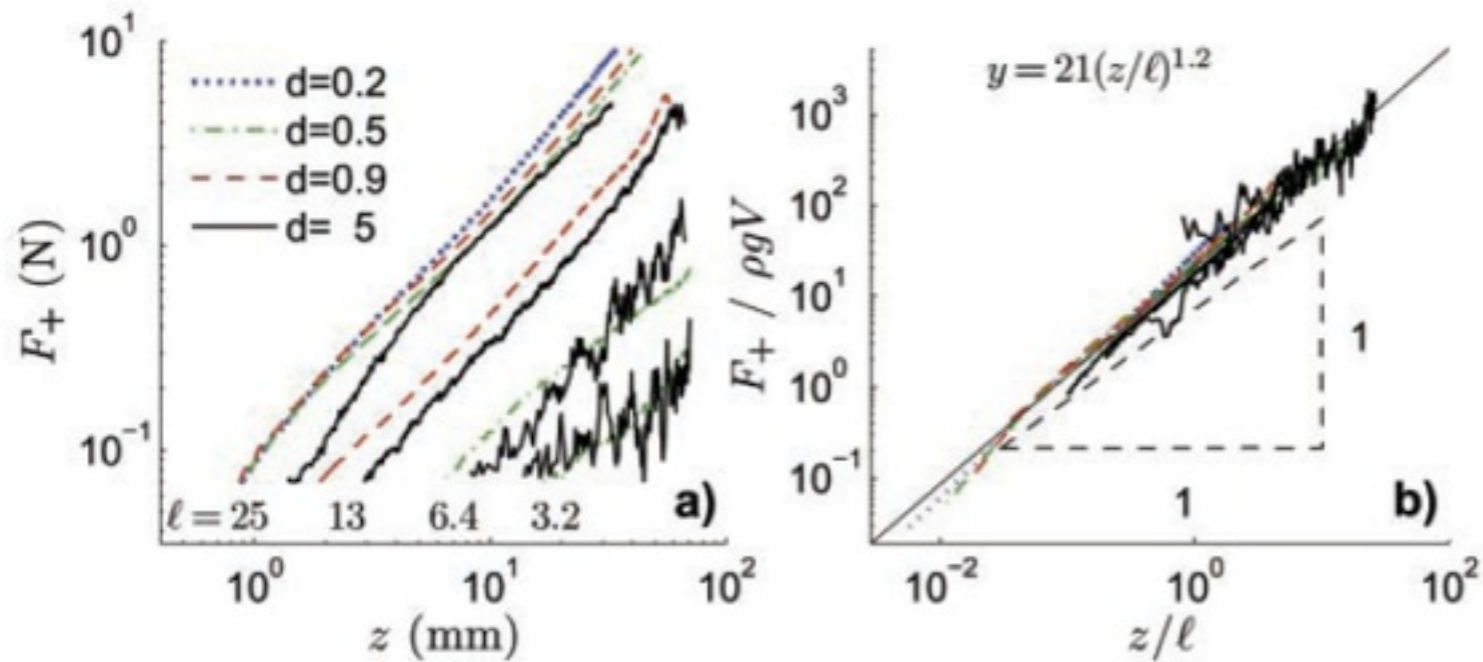
まずは(準)静的から

研究動機 I

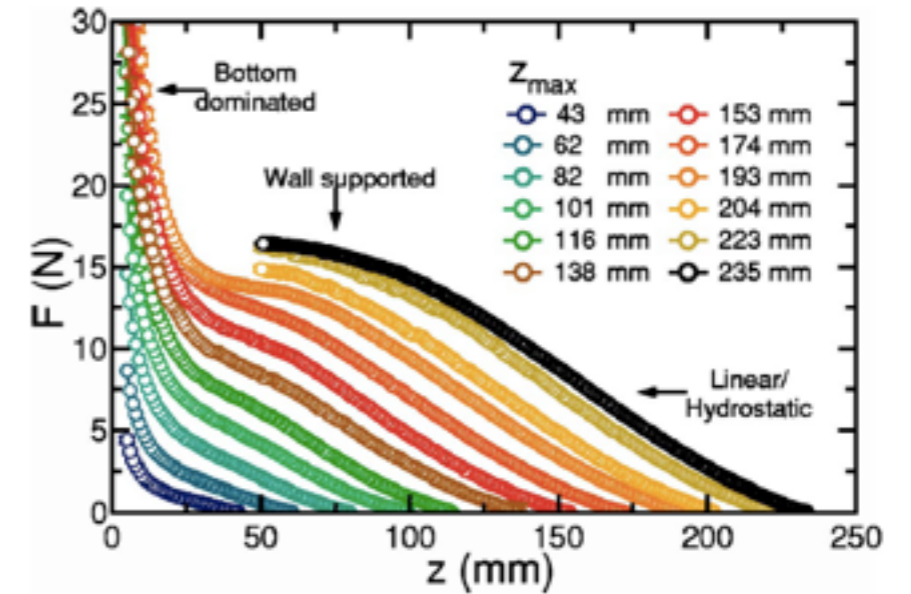
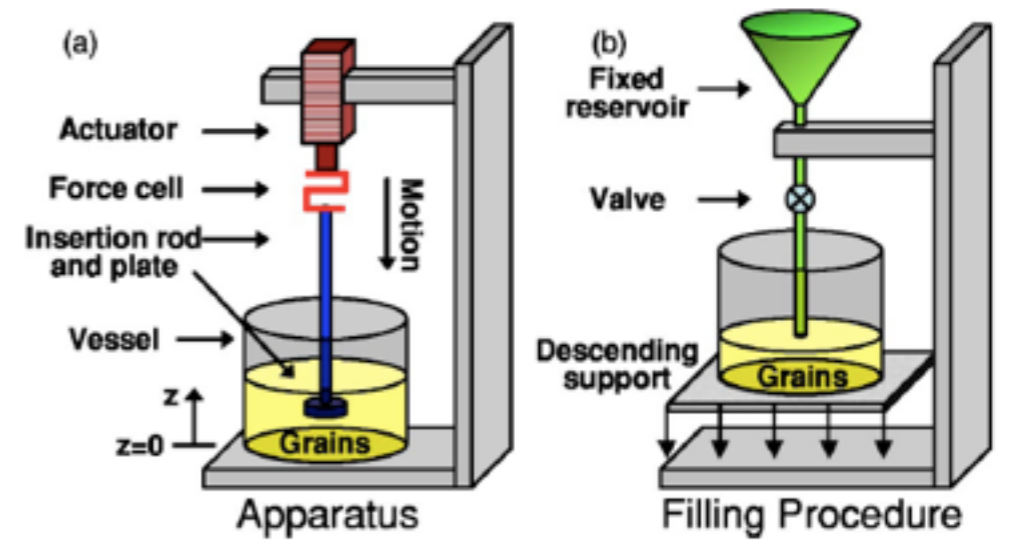
- 連続体としての粉体の応力への応答？
- 流体のアルキメデスの原理, パスカルの原理のようなものはあるのか？
- ガラスビーズ層に固体塊をうずめて, 応力とひずみの関係を実験的に導く！

先行研究

$$\sigma_{nn} \approx \begin{cases} O(10)\rho g z^{1.3} \ell^{-0.3} & \text{plunging,} \\ O(1)\rho g z & \text{horizontal motion} \\ O(1)\rho g z^{1.8} \ell^{-0.8} & \text{withdrawing.} \end{cases}$$



Hill et al., EPL 2005



Stone et al., PRE 2004

研究動機 II

- 先行研究は固体塊の低速での陥入に対する抵抗力のみの測定
- 本研究では抵抗力と同時に容器壁での圧力を測定し、粉体メディア内の圧力の伝播の定量化を目指す！

実験系

試験機（島津製AGX）と圧力センサー（共和電業, TEAC）
によるシンプルな反力と壁圧力の測定系

Force: F

Stroke: z

Pressure: p_0 (bottom) p_1 (side wall)

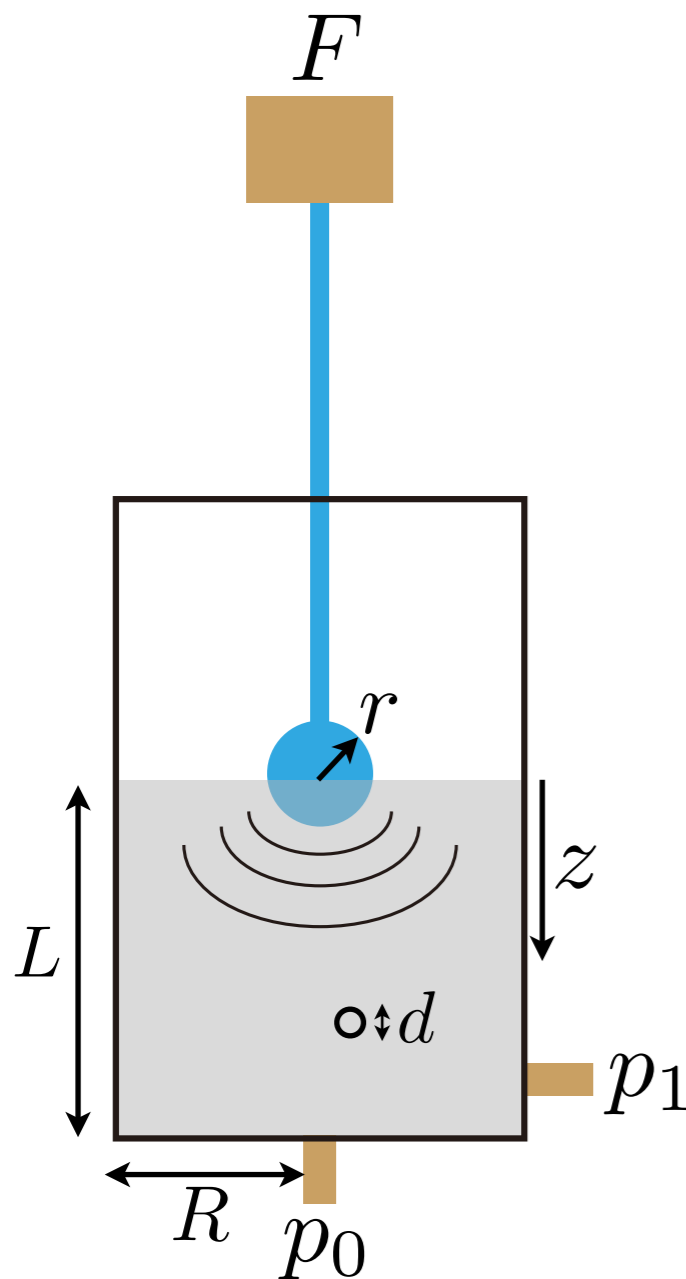
陥入速度: 1 mm/s

ガラスビーズ: 粒径 $d = 0.4, 0.8, 2$ mm

固体塊: 球: 半径 $r = 5, 10, 20$ mm

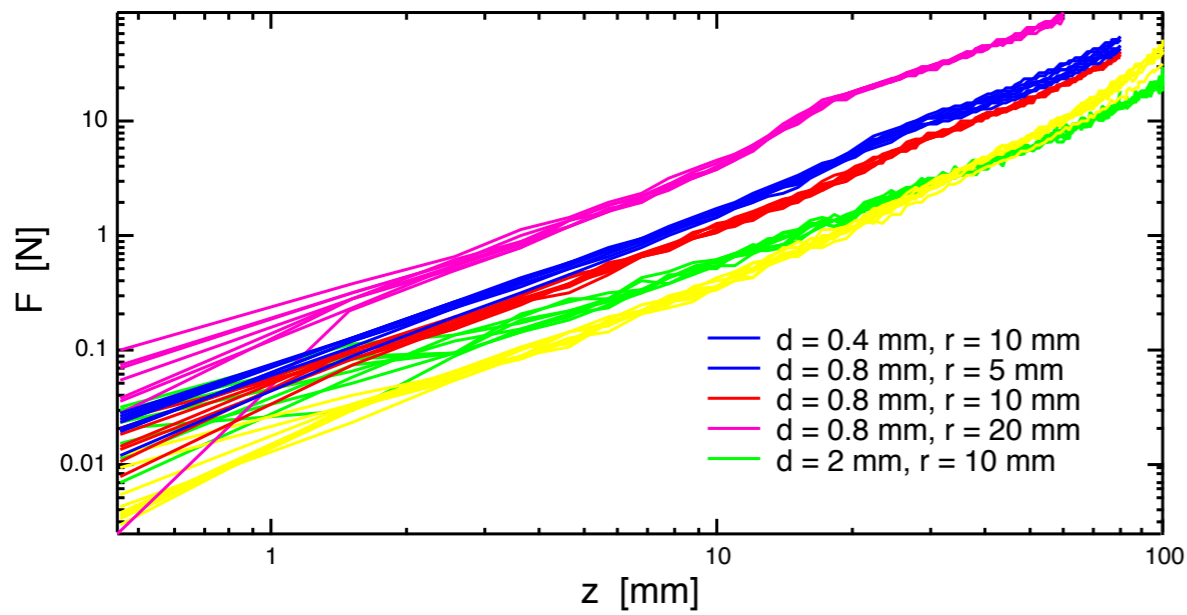
粉体層厚: L mm (100-250),

容器内径: $R = 35$ mm

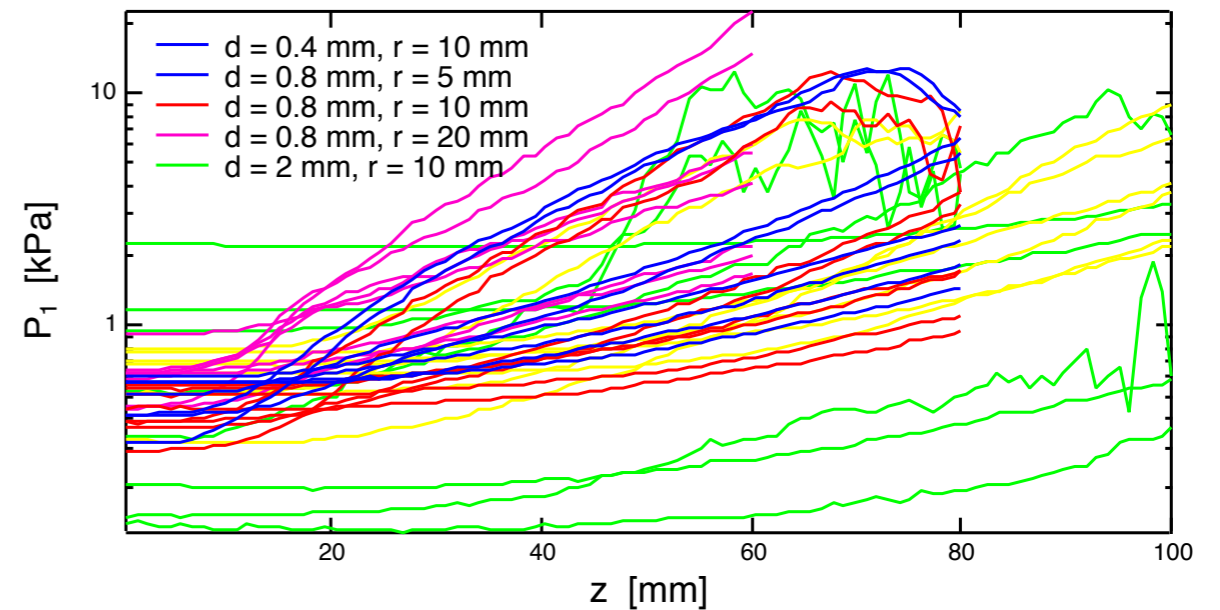
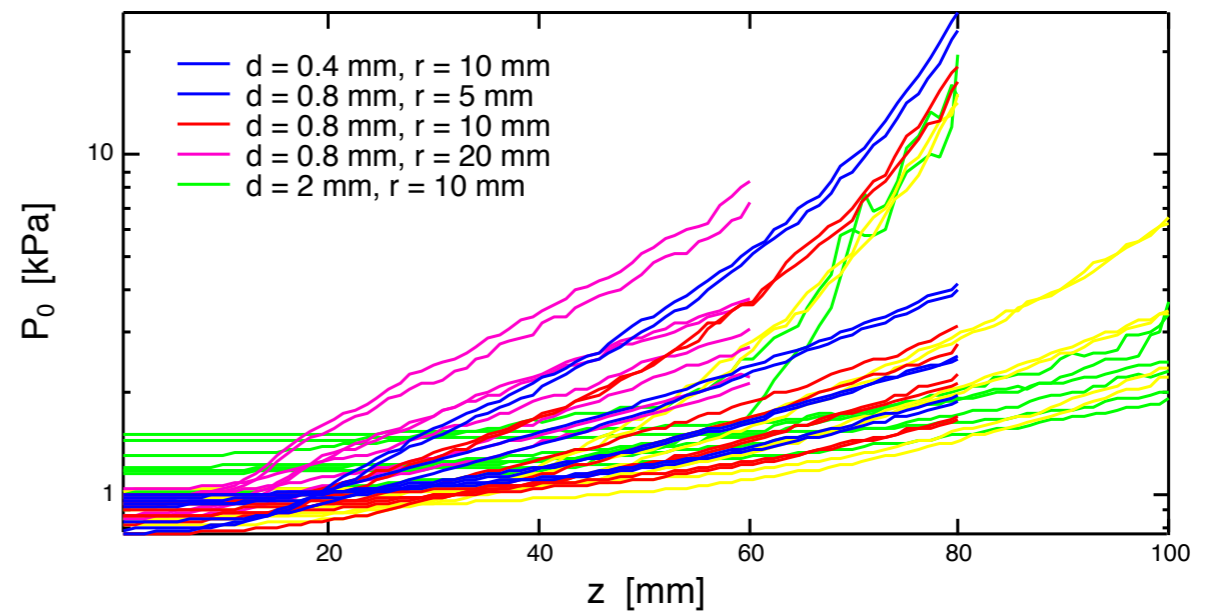


生データ

$$F \sim z^{1.5}$$



$$P_x \sim ?$$



普遍的スケーリングは
可能か！？

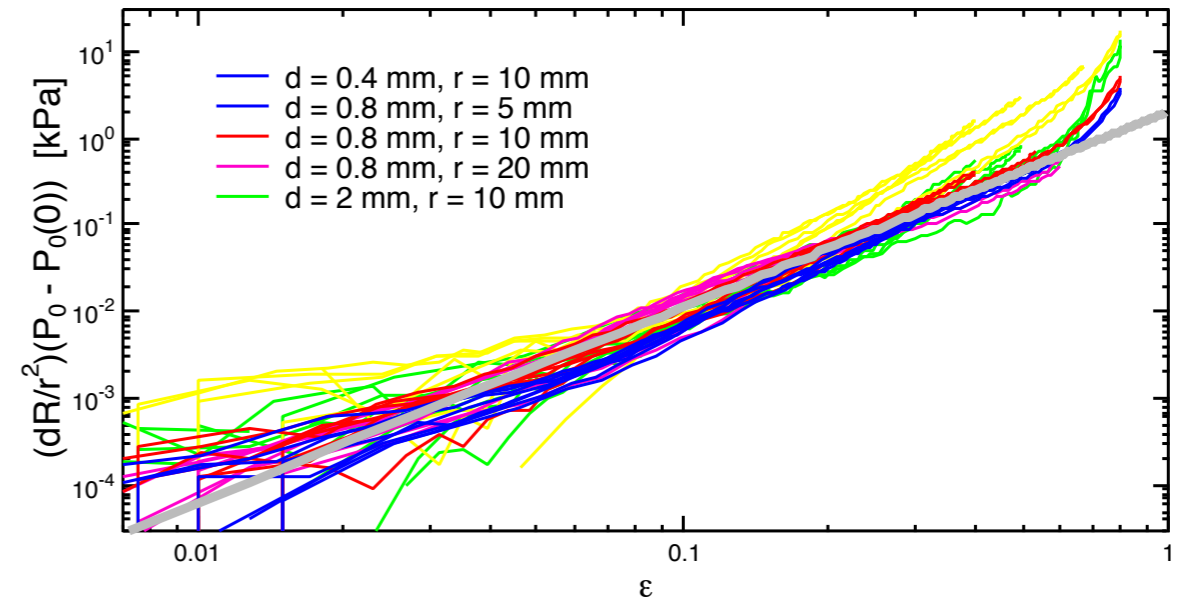
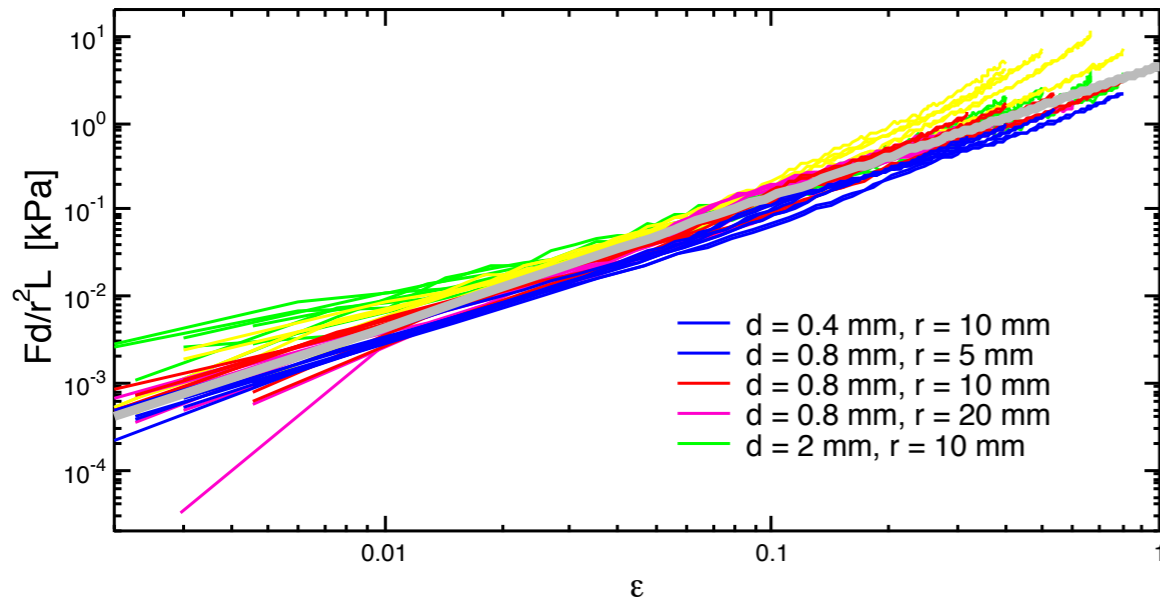
解析指針

- シンプルな力と変位のスケーリングだけで満足して良いか？
- 否，応力とひずみの関係で考えよう
- 有効な長さスケールを用いたスケーリング
- 積層の履歴依存性によるゆらぎ(圧力初期値)の除去

応力ひずみスケーリング

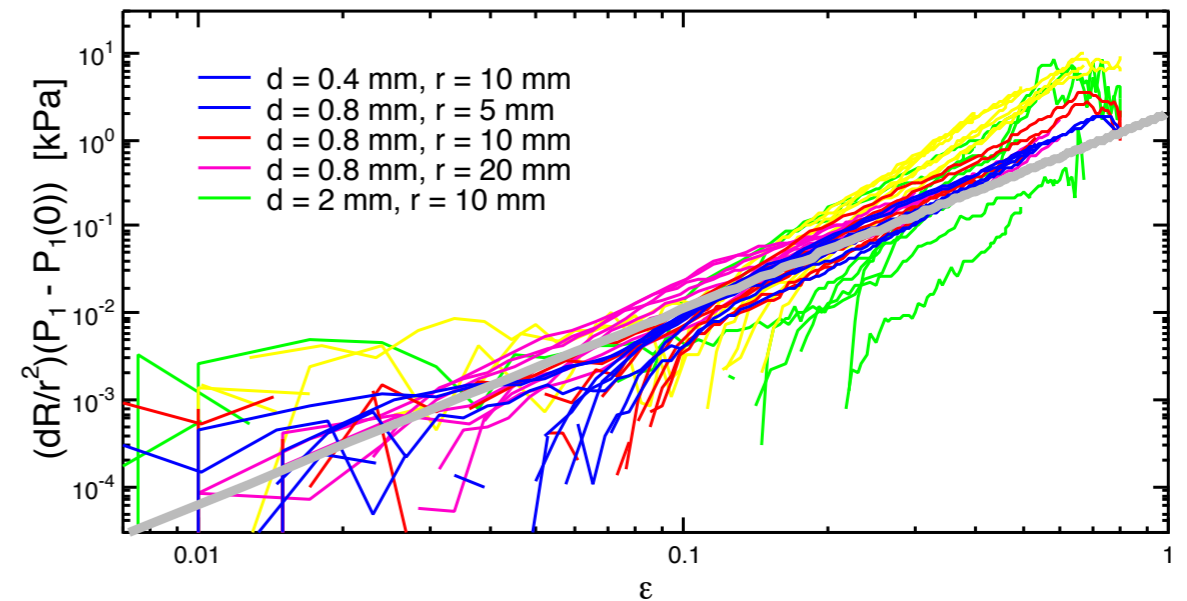
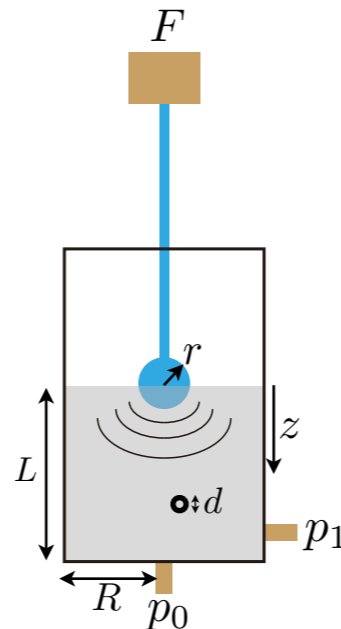
$$\frac{d}{L} \frac{F}{r^2} \sim \epsilon^{3/2}$$

$$\frac{dR}{r^2} \Delta p_x \sim \epsilon^{9/4}$$



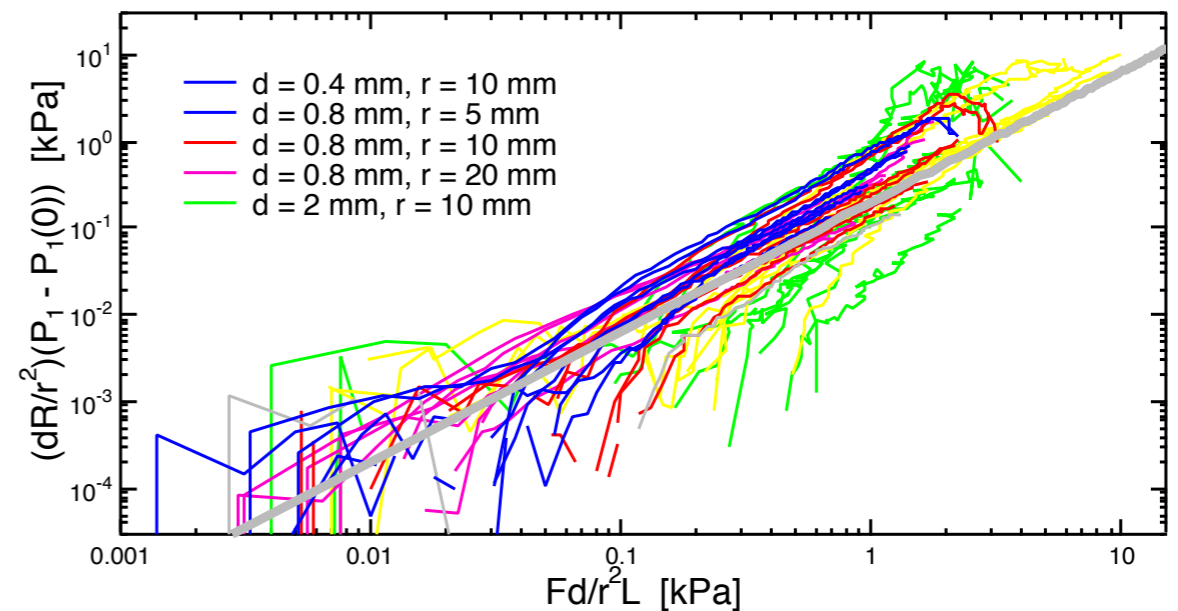
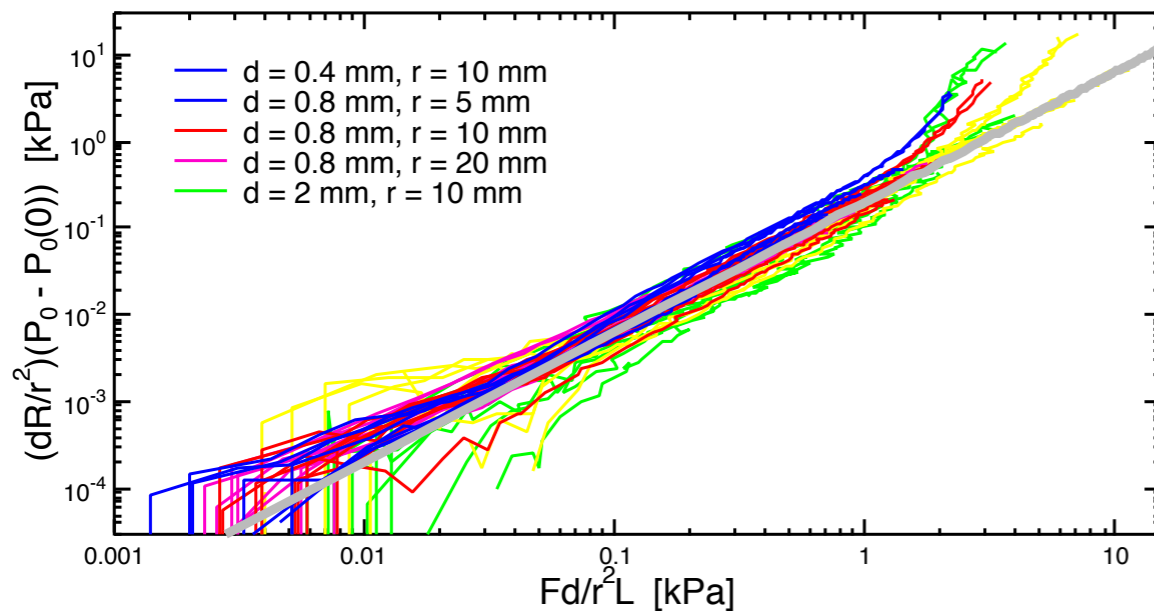
$$\epsilon = \frac{z}{L}$$

$$\Delta p_x = p_x - p_x(0)$$



応力スケーリング

$$\frac{dR}{r^2} \Delta p_x \sim \left(\frac{d}{L} \frac{F}{r^2} \right)^{3/2}$$



底面, 側面とも応力伝播則は同一のスケーリング
(側面の方がバラツキが大きい)

応力伝播則

$$\frac{d}{L} \frac{F}{r^2} \sim \epsilon^{3/2} \quad \Rightarrow \quad \frac{F}{r^2} \sim \left(\frac{d}{L}\right)^{1/2} \left(\frac{z}{d}\right)^{3/2}$$

粉体におけるアルキメデスの原理？

$$\frac{dR}{r^2} \Delta p_x \sim \left(\frac{d}{L} \frac{F}{r^2}\right)^{3/2} \quad \Rightarrow \quad \Delta p \sim \left(\frac{d}{L}\right)^{1/2} \frac{r^2}{LR} \left(\frac{F}{r^2}\right)^{3/2}$$

粉体におけるパスカルの原理？

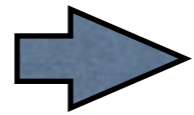
$$\left(\frac{d}{L}\right)^{1/2} : (\text{粒子数})^{-1/2} : \text{散逸度合い?}$$

$$\frac{r^2}{LR} : \text{陥入固体塊サイズ/容器サイズ}$$

より一般的には

押しこみ反力

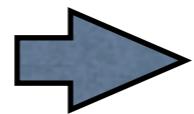
$$\frac{d}{L} \frac{F}{r^2} \sim \epsilon^\alpha$$



$$\frac{F}{r^2} = \left(\frac{d}{L} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{z}{d} \right)^\alpha \sigma_\alpha$$

壁面への応力伝播

$$\frac{dR}{r^2} \Delta p_x \sim \left(\frac{d}{L} \frac{F}{r^2} \right)^\beta$$



$$\Delta p = \left(\frac{d}{L} \right)^{\beta-1} \frac{r^2}{LR} \left(\frac{F}{r^2} \right)^\beta \sigma_\beta^{1-\beta}$$

指数？

$$\alpha = \beta ?$$

$$\alpha = 3/2$$

- ヘルツの接触則と一致
- しかし実際は埋め込みによる大変形
(ひずみ ~ 1)

まとめ

- ガラスビーズ層への固体塊の準静的陥入における抵抗圧と容器壁への応力の伝播を同時計測
- 抵抗圧は陥入深さの1.5乗に，壁応力は抵抗圧の1.5乗にそれぞれ依存して増大する
- 粉体層厚/粒子径(の1/2乗)が散逸パラメータ？
として重要

今後の課題

- 粉体粒子形状の効果
- サイクル試験による履歴効果
- スケーリング指数の由来
- AE計測