OSAKA UNIVERSITY

定常せん断下での濡れた高密度粉体系のレオロジー特性

吉井 究, 大槻 道夫
（阪大基礎工）

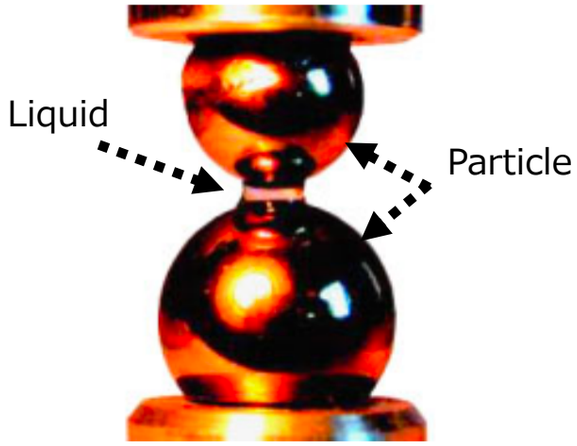
2022/03/15 日本物理学会年次大会 15pB19-9

乾いた粉体と濡れた粉体

- 粉体は少量の水を加えるだけで，レオロジー特性が大きく変化することが知られている.

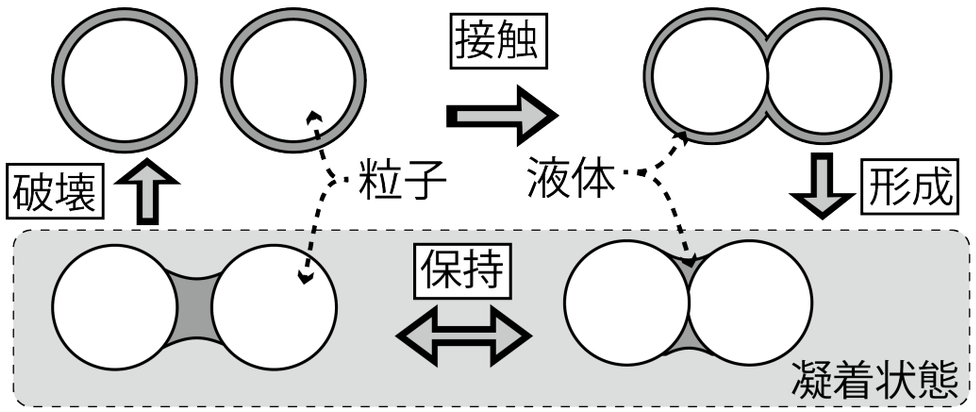
N. Mitarai, F. Nori, Adv. Phys. (2005)

- 液体による引力は，表面張力によって形成される架橋に起因する.

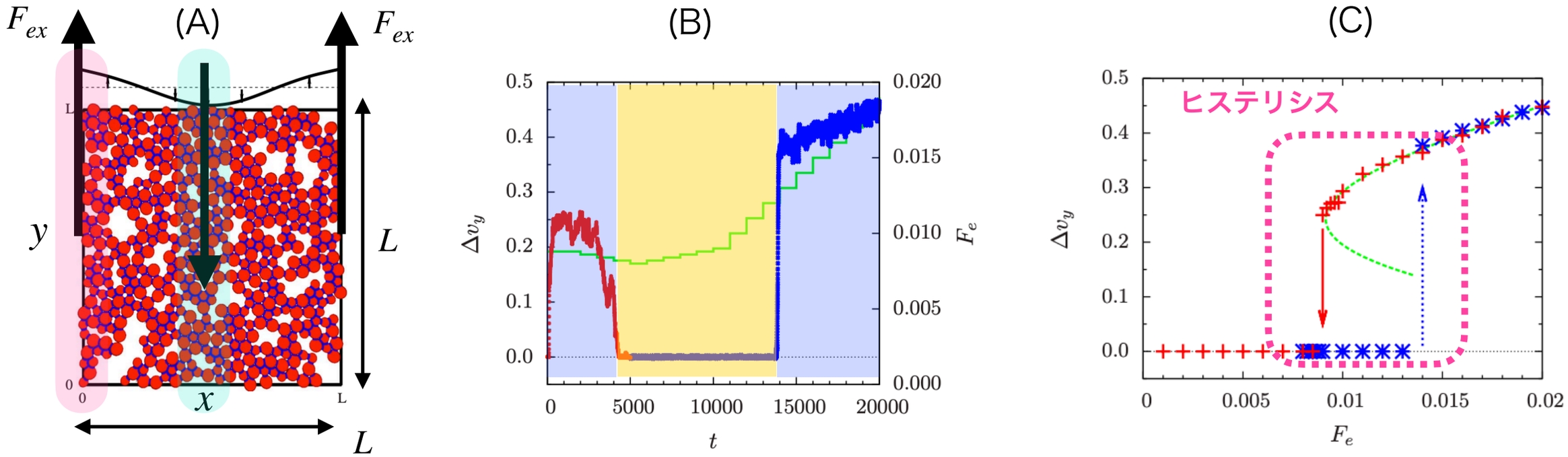


F. Soulie, et. Al, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., (2006)

- 濡れによる引力には履歴が存在する.



濡れた粉体の履歴に依存した特性



S. H. Ebrahimnazhad Rahbari, et al., Phys. Rev. E (2010)

(A) 系に$\boldsymbol{F}_{ex} = \boldsymbol{e}_y F_e \cos(2\pi x/\lambda)$の外力を印加 ($\lambda$：波長)

$$\begin{cases} \Delta v_y = \dfrac{1}{2}(v_y(x=0) - v_y(x=L/2)) \\ \Delta v_y = 0\text{なら固相、}\ \Delta v_y > 0\text{なら流動相} \end{cases}$$

(B) 流動相→固相→流動相

(C) 固相⇄流動相には，ヒステリシスが存在

履歴効果がレオロジー特性にどのような影響を与えるか？

セットアップ（DEM）

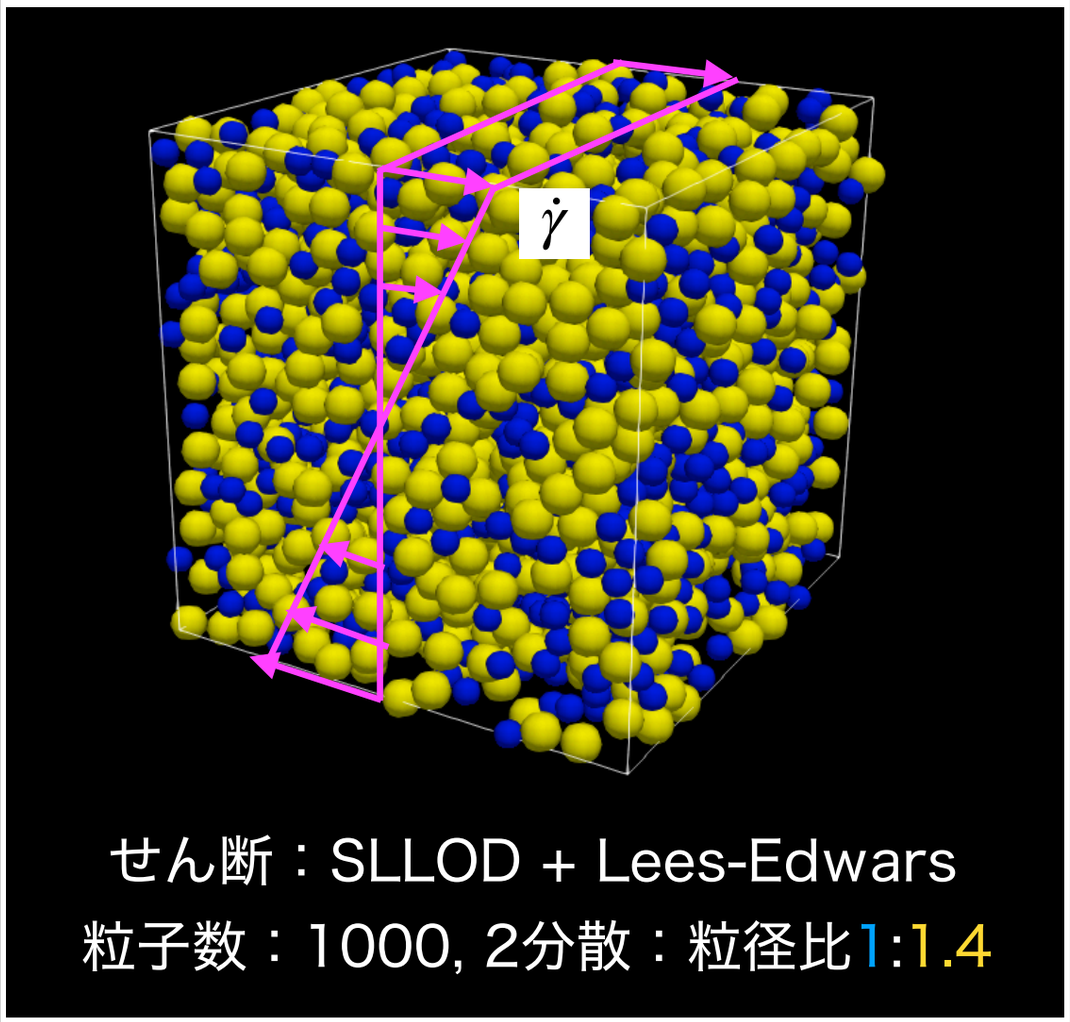
運動方程式

$$m_i \frac{d^2 \boldsymbol{r}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} (F_{ij}^{\mathrm{n,tot}} \boldsymbol{n}_{ij} + F_{ij}^{\mathrm{t}} \boldsymbol{t}_{ij})$$

m_i：質量

$\boldsymbol{n}_{ij}$：法線ベクトル, $\boldsymbol{t}_{ij}$：接線ベクトル

シミュレーションセットアップ(一定体積)



接触力

F_{ij}^{n}：法線反発力

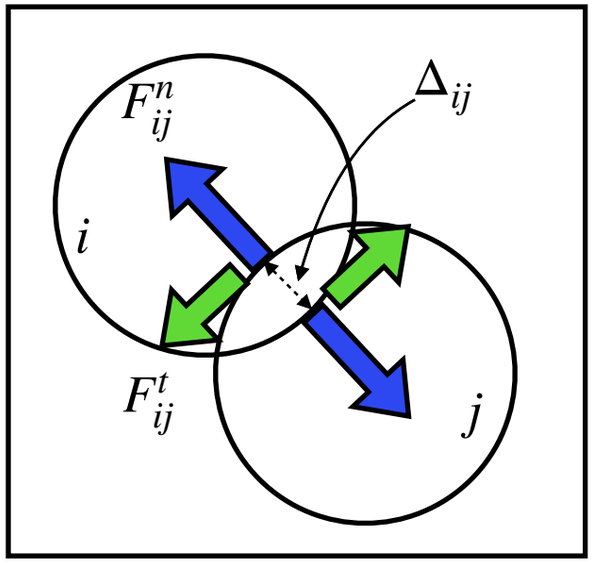
$$\boldsymbol{F}_{ij}^{\mathrm{n}} = k_n \Delta_{ij} \boldsymbol{n}_{ij} - \eta_n v_{ij} \boldsymbol{n}$$

F_{ij}^{t}：接線摩擦力

クーロン則：$F_{ij}^{t} \leq \mu |\boldsymbol{F}_{ij}^{\mathrm{n}}|$

Δ_{ij}：接触長, v_{ij}：相対速度

k_n：ばね定数, η_n：粘性係数, μ：摩擦係数



S, Luding, Granular matter (2008)

濡れによる引力：F_{ij}^{cap}

$$F_{ij}^{\mathrm{cap}} = \begin{cases} -2\pi\gamma_s D_{ij} \cos\theta & (\Delta_{ij} \geq 0), \\ \dfrac{-2\pi\gamma_s D_{ij} \cos\theta}{1 + 1.05\hat{s}_{ij} + 2.5\hat{s}_{ij}^2} & (-d_c \leq \Delta_{ij} < 0), \\ 0 & (\Delta_{ij} < -d_c) \end{cases}$$

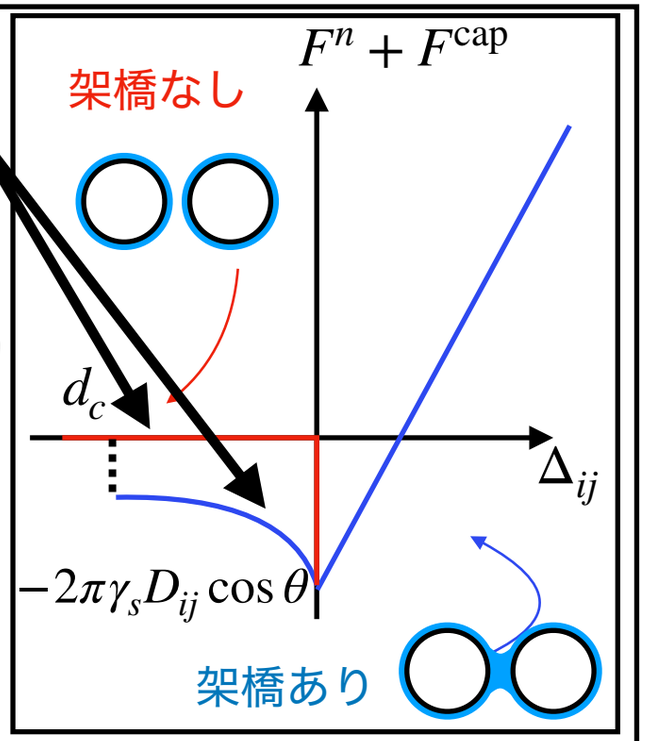
履歴のある引力

$s_{ij} = -\Delta_{ij}$, $D_{ij} = 2d_i d_j/(d_i + d_j)$

$\hat{s}_{ij} = s_{ij}\sqrt{D_{ij}/V_b}$, $d_c = 5.0 \times 10^{-6} d_0$

θ：接触角, γ_s :界面張力係数

液体架橋の切れる距離 d_c は、接触角 θ と架橋に含まれる水分量V_bに依存する。



S, Hao, et al. Granular matter (2020)

固相から流動相への振る舞いの転移

せん断応力制御

目標の応力 σ_t に達するように，せん断速度$\dot{\gamma}$を次のように更新

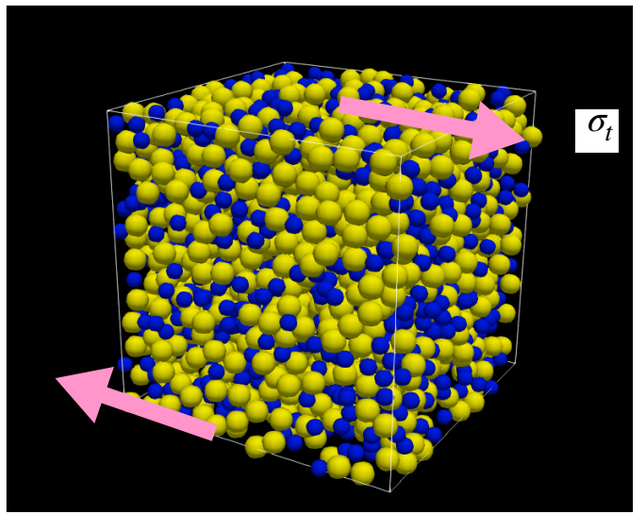
目標のせん断応力

$$\frac{d\dot{\gamma}}{dt} = \frac{\sigma_t - \sigma_{xy}}{Q}$$

系のせん断応力

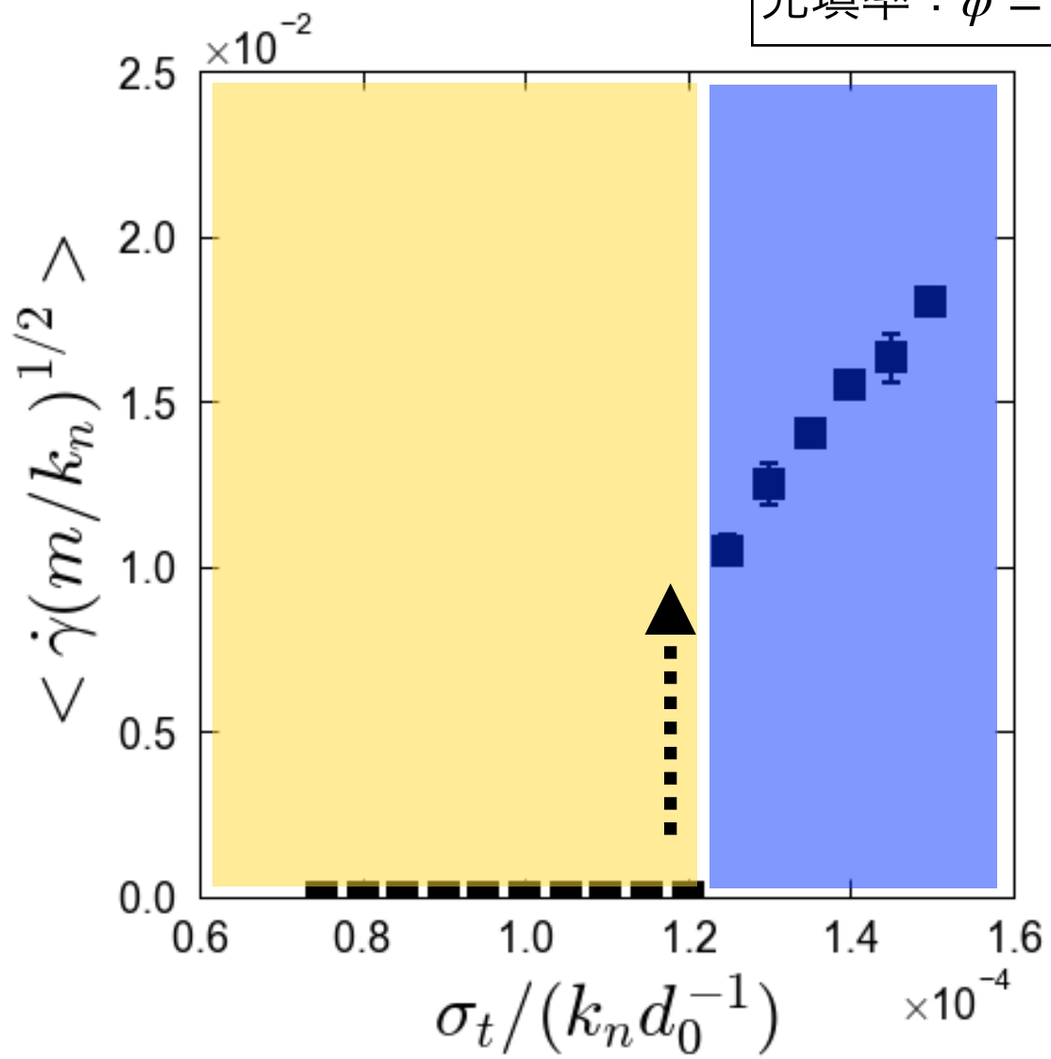
緩和パラメタ

$$\begin{cases} \sigma_{xy}(t) = -\frac{1}{L^3}\left(\frac{1}{2}\sum_i^N \sum_{i<j} (r_{ij,x}F_{ij,y} + r_{ij,y}F_{ij,x}) + \sum_i^N \frac{p_{i,x}p_{i,y}}{m}\right) \\ (\boldsymbol{F}_{ij} = F_{ij}^{\mathrm{n,tot}}\boldsymbol{n}_{ij} + F_{ij}^{\mathrm{t}}\boldsymbol{t}_{ij}) \end{cases}$$



D. J Evans and G. P Morriss (Cambridge University Press, 2008).

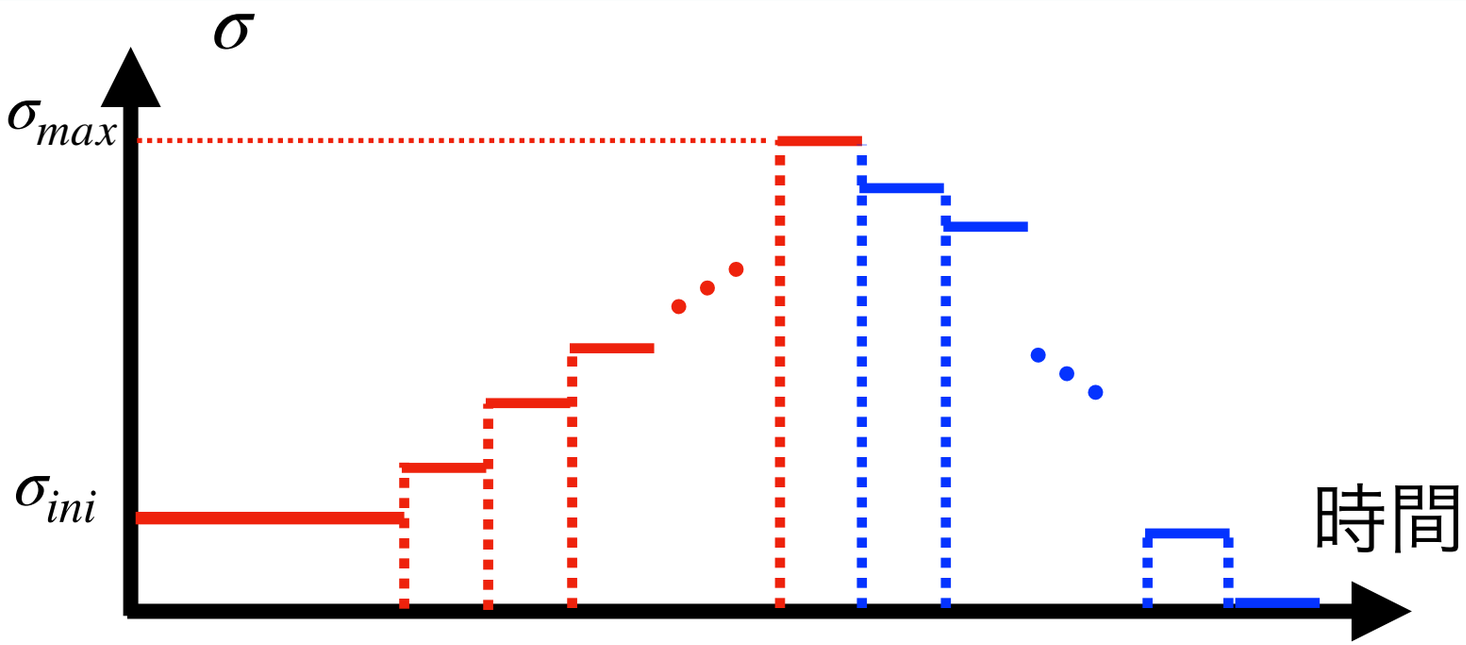
充填率：$\phi = 0.500$



固相： $\dot{\gamma} = 0$ / 流動相：$\dot{\gamma} > 0$

固化と流動の転移は一次転移的

プロトコル①：せん断応力を制御



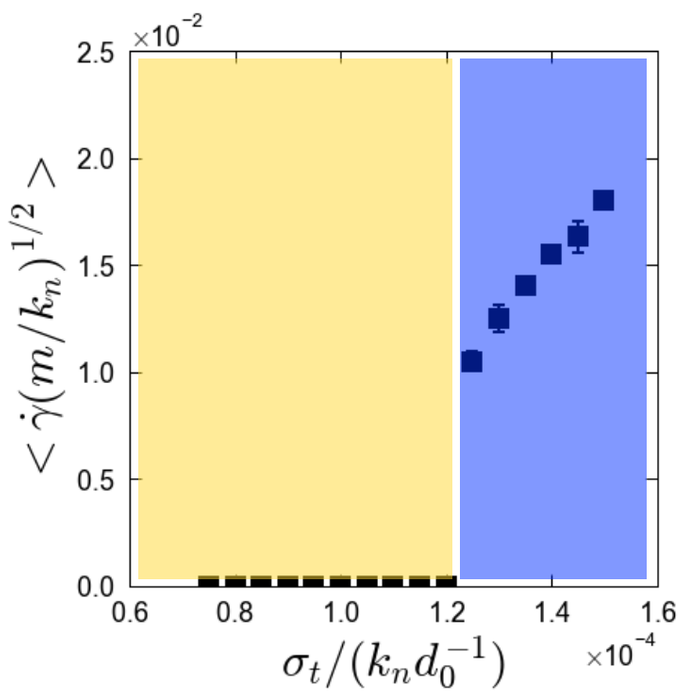
せん断応力制御

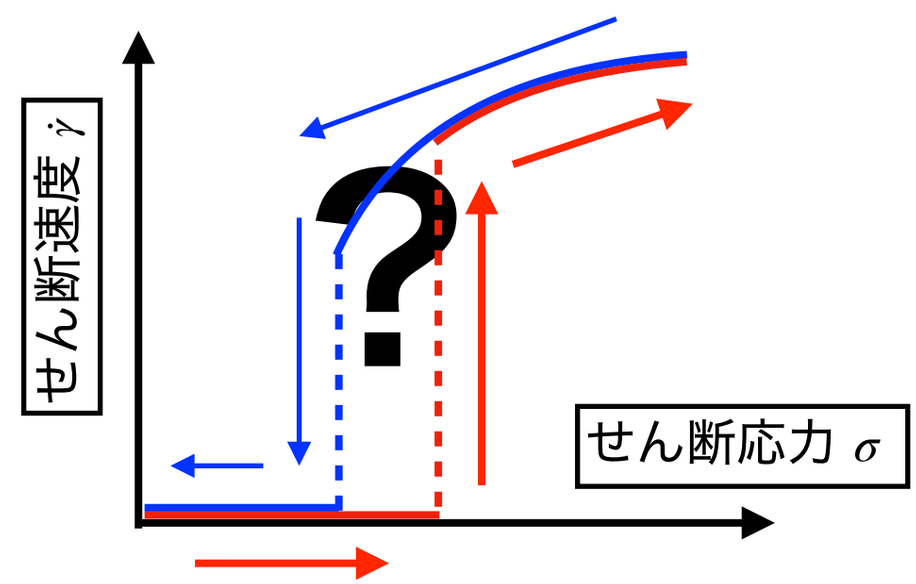
目標のせん断応力

$$\frac{d\dot{\gamma}}{dt} = \frac{\sigma_t - \sigma_{xy}}{Q}$$

系のせん断応力

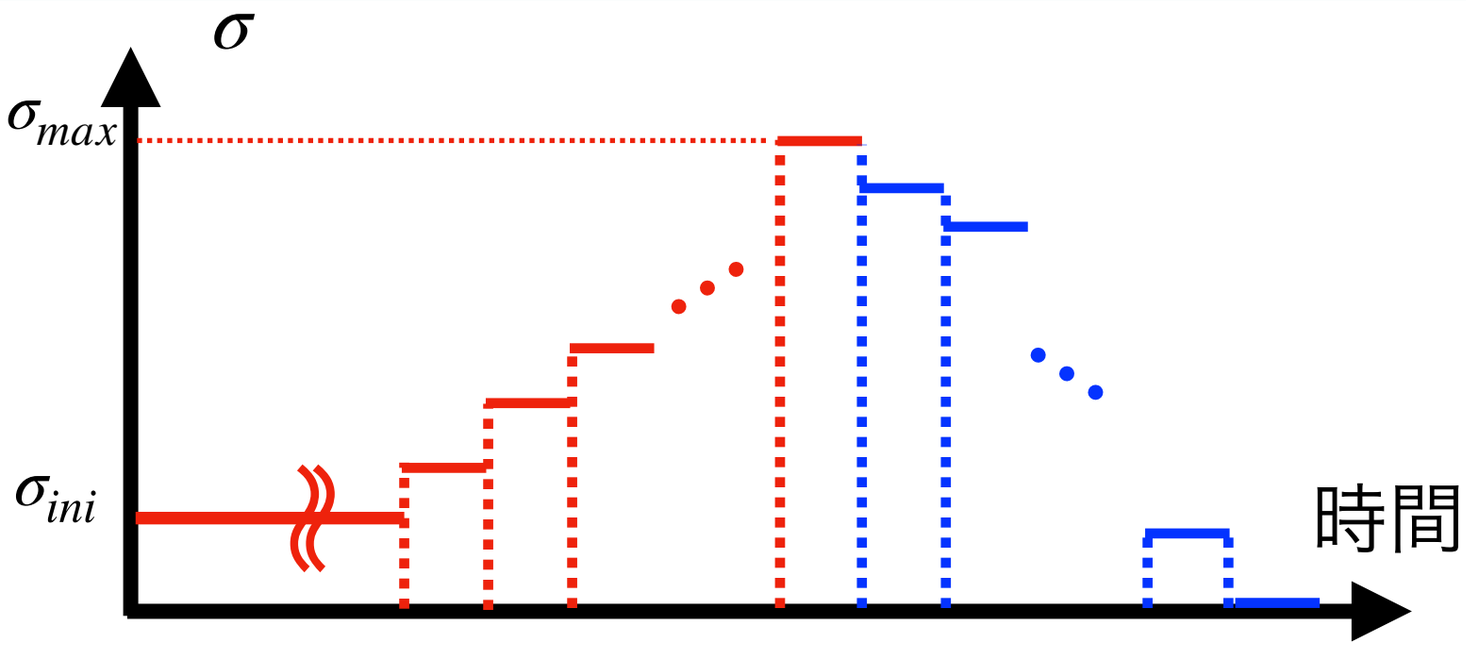
目標の応力 σ_t に達するように,
せん断速度を更新





履歴依存性が期待される.

履歴依存性



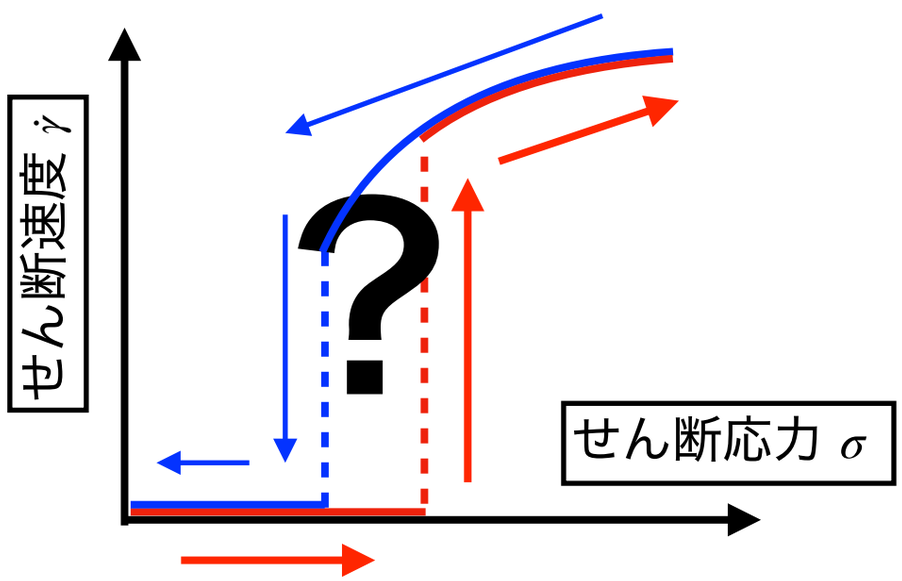
せん断応力制御

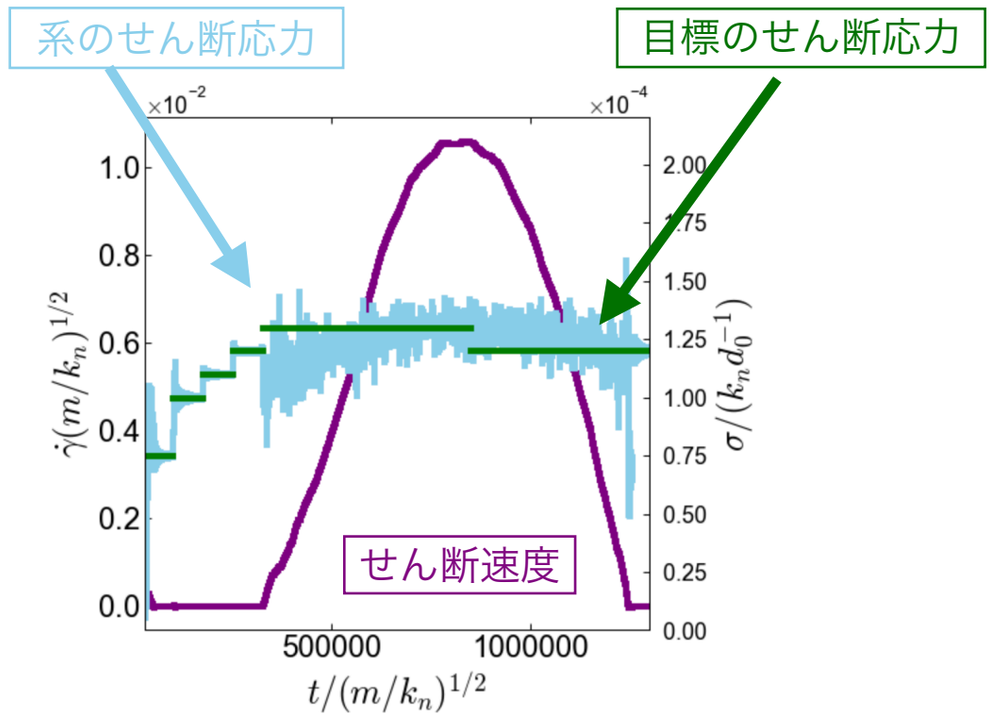
$$\frac{d\dot{\gamma}}{dt} = \frac{\sigma_t - \sigma_{xy}}{Q}$$

目標のせん断応力

系のせん断応力

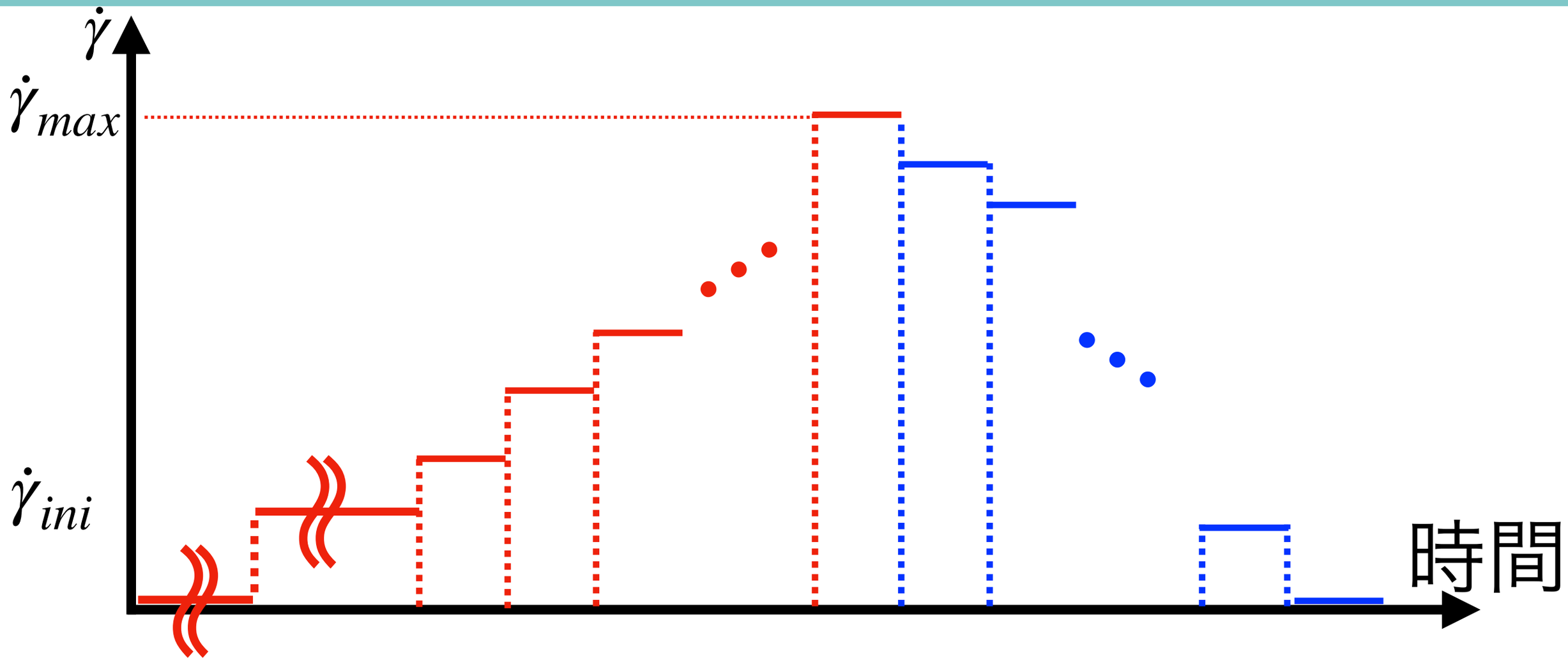
目標の応力 σ_t に達するように,
せん断速度を更新





☑ 履歴依存性は見られなかった.
＞十分に応力を上げてから下げるなど, プロトコルを変更する必要性？

プロトコル②：せん断速度を制御



せん断速度制御

- 初期に十分な剪断歪みを加える.
  その後、せん断速度を段階的に上げ、途中で折り返しせん断速度を下げる.

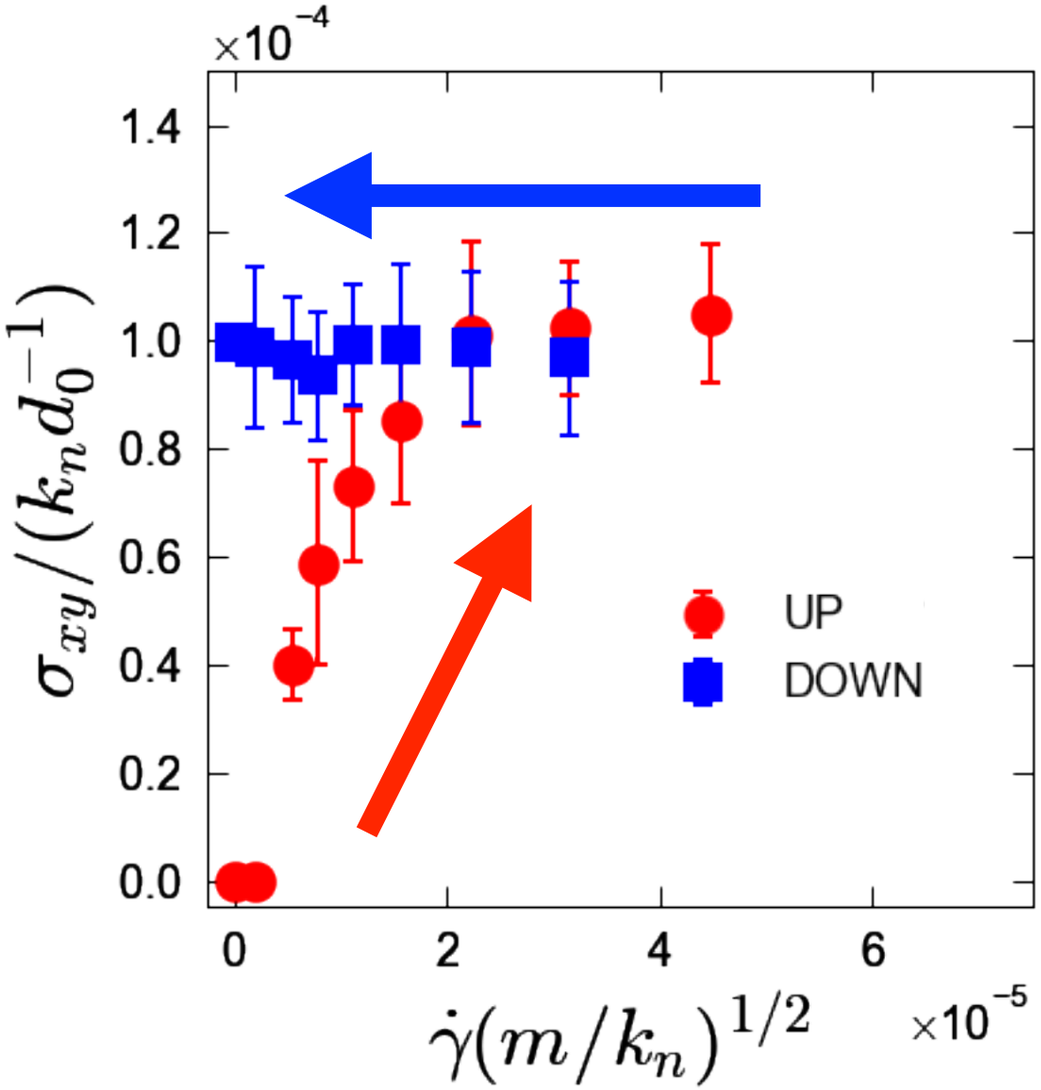
UPの過程　　：$\dot{\gamma} = 1.0 \times 10^{-A+\delta m}, (m = 0,1\cdots,11)$と順に上げる.

DOWNの過程：$\dot{\gamma} = 1.0 \times 10^{-B-\delta l}, (l = 1,2,\cdots,10)$と順に変化させた後に$\dot{\gamma} = 0$下げた.

各々のせん断速度で，ひずみ $\gamma = 10$ 加えている．$(A = 6.0, B = 4.5, \delta = 0.15)$

せん断応力

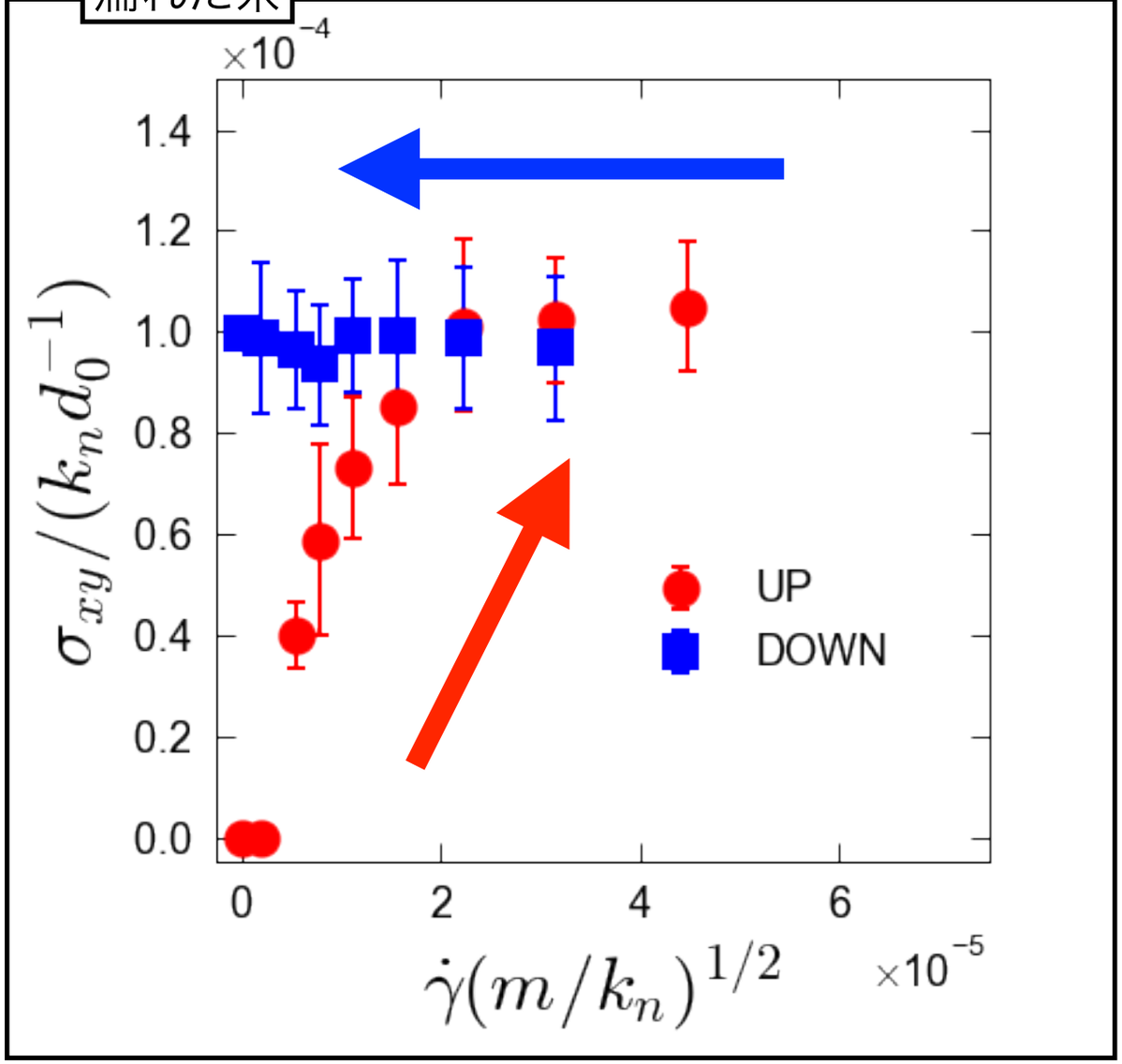
充填率：$\phi = 0.480$



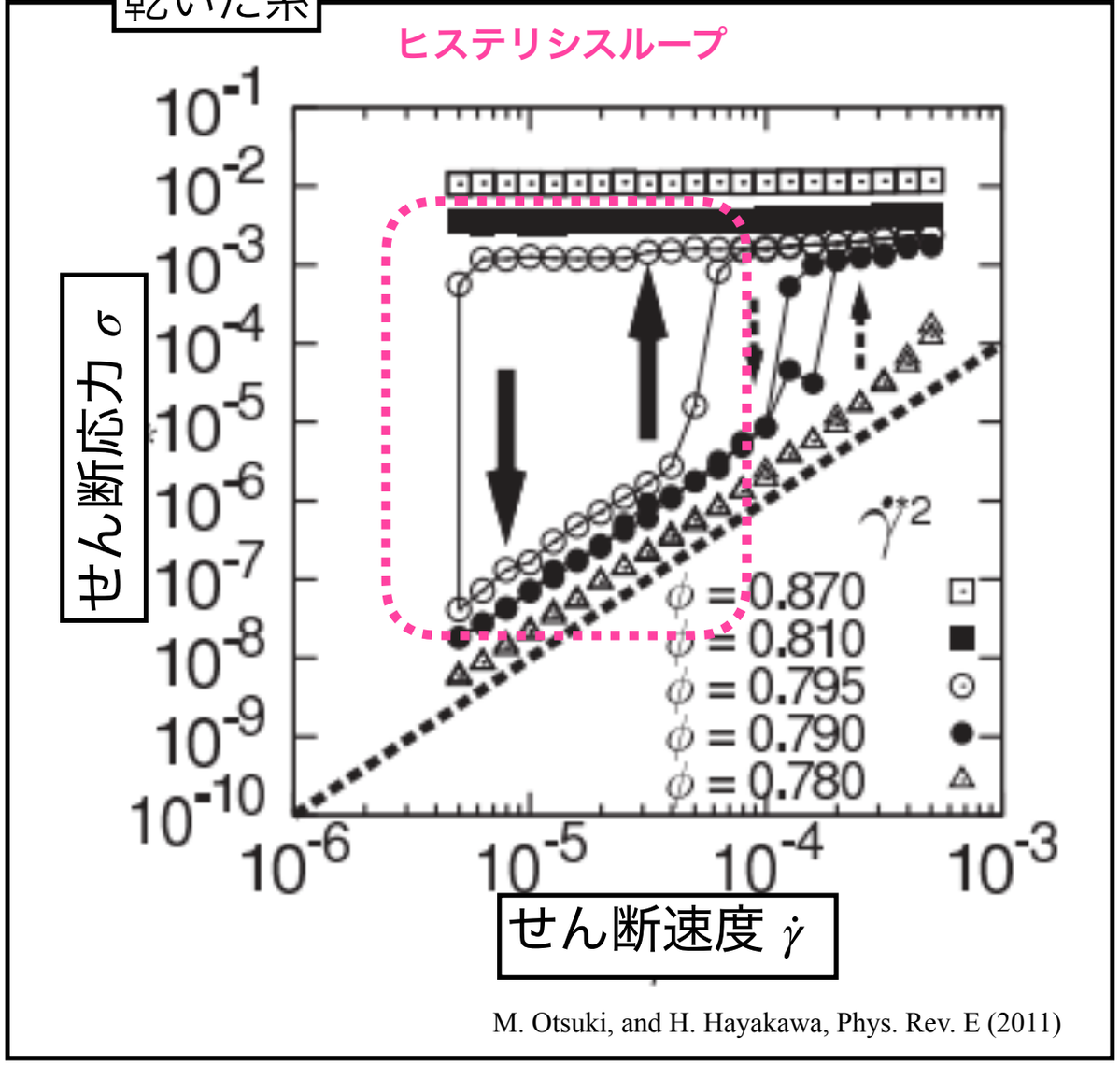
- せん断速度を上げる：急激なせん断応力の上昇.
- せん断を下げる：せん断応力がせん断速度ゼロでも残る.

せん断応力：乾いた系との比較

濡れた系



乾いた系

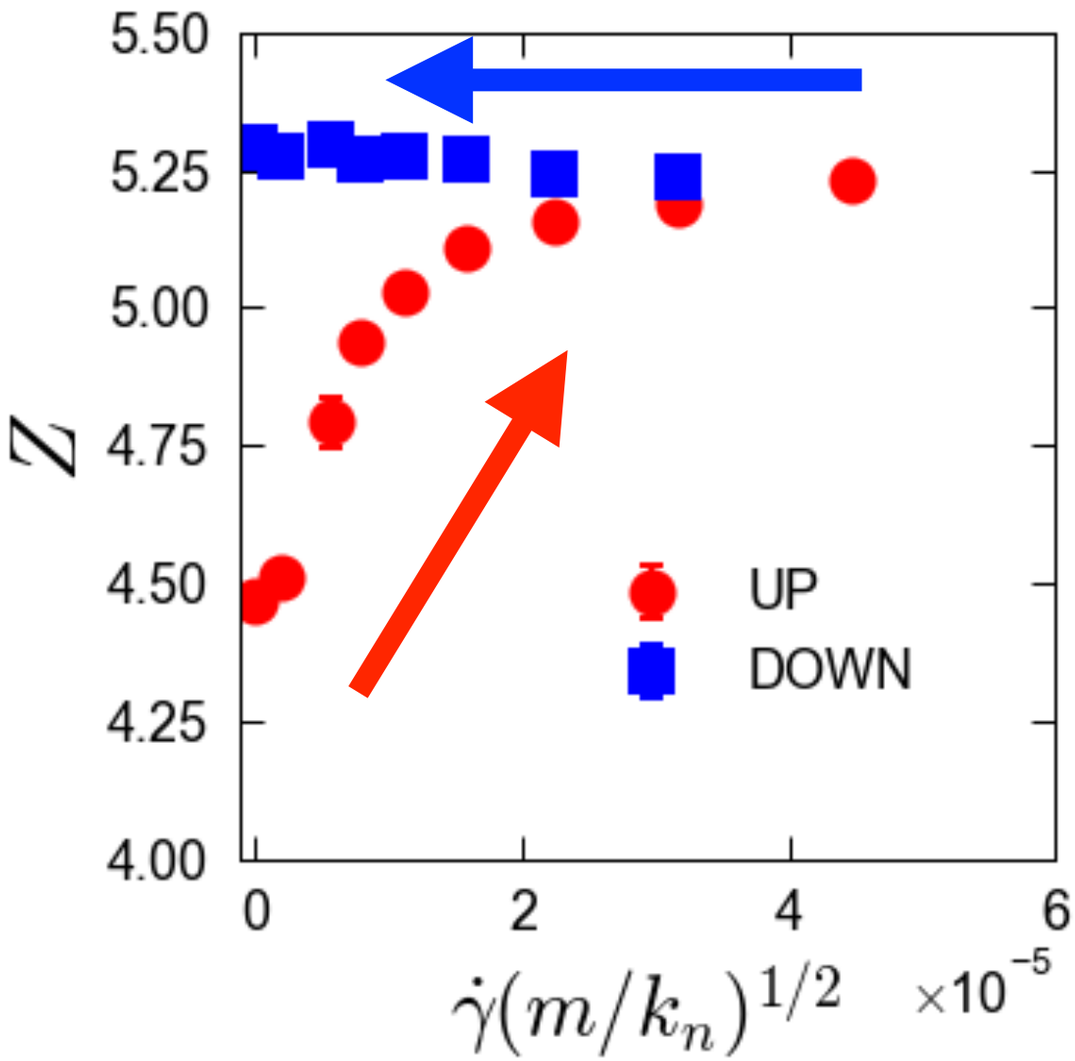


- せん断速度を上げる：急激なせん断応力の上昇.
- せん断を下げる：せん断応力がせん断速度ゼロでも残る.

- 乾いた系と濡れた系で異なる履歴
  乾いた系：$\dot{\gamma} \to 0$で，応力$\sigma \to 0$になる．／濡れた系：$\dot{\gamma} \to 0$でも，有限の応力が残る.

接触点数

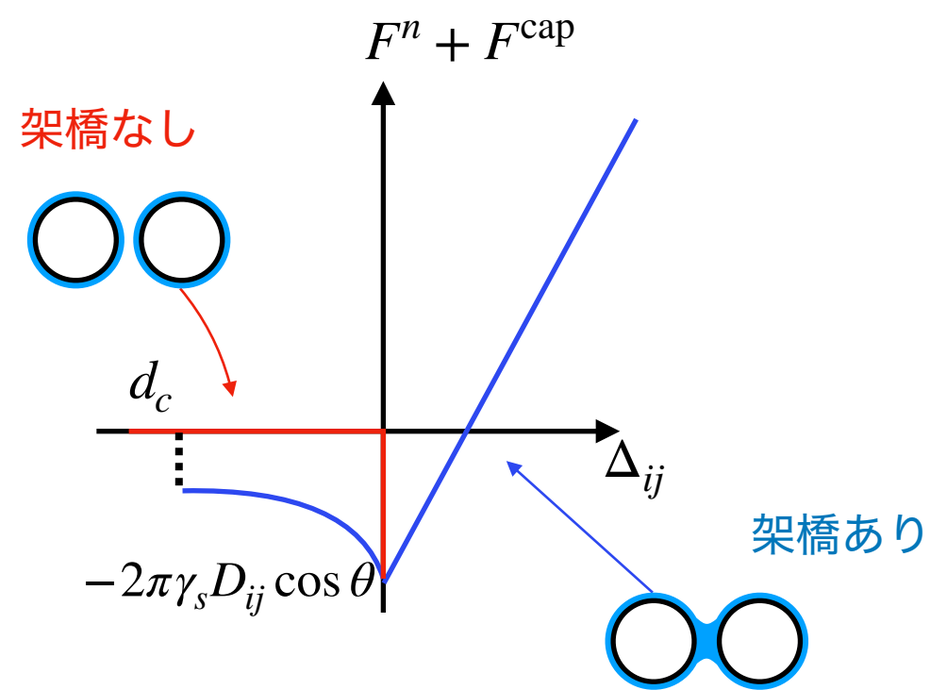
充填率：$\phi = 0.480$



接触点数 Z：

$\Delta_{ij} > -d_c$ かつ液体架橋が存在する

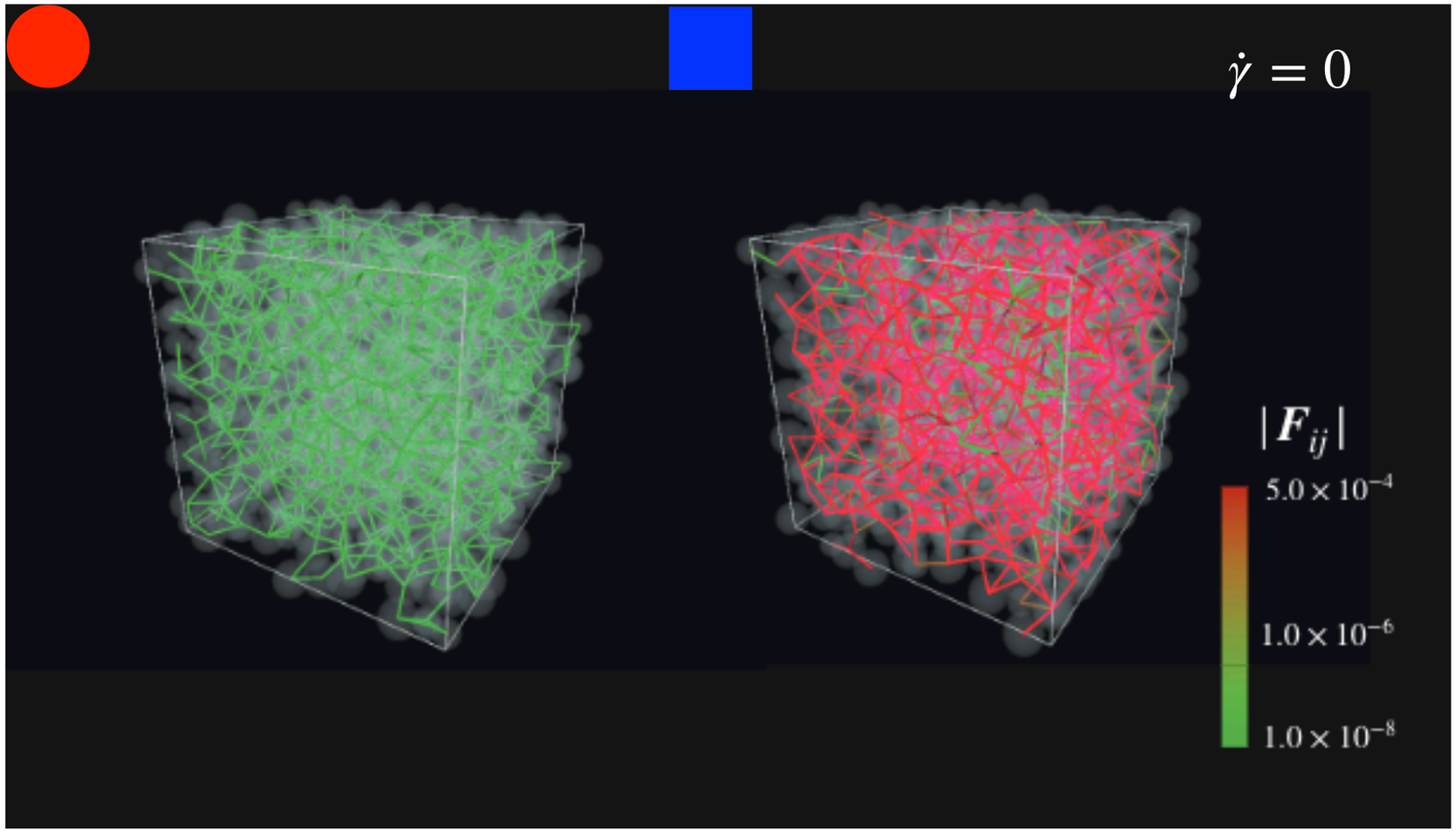
粒子ペアからカウント

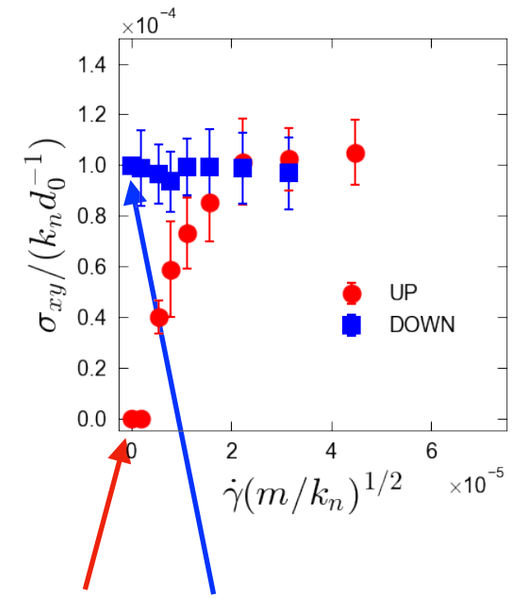


- せん断応力と同様の履歴がある.
- せん断によって誘起された構造変化が，せん断速度を下げても粒子間引力によって保持される.

応力鎖

充填率：$\phi = 0.480$





UpとDownの$\dot{\gamma} = 0$の時を可視化

応力鎖：接触粒子間の力$|\boldsymbol{F}_{ij}|$を粒子間に大きさに応じて色をつけて引いた
$(\boldsymbol{F}_{ij} = F_{ij}^{\mathrm{n,tot}}\boldsymbol{n}_{ij} + F_{ij}^{\mathrm{t}}\boldsymbol{t}_{ij})$

- どちらの場合でも粒子の接触はあるももの，せん断を加える前後，粒子間力の大きさが変化することがわかる.
- 接触点数だけでなく，粒子間力の大きさも変化.

Summary

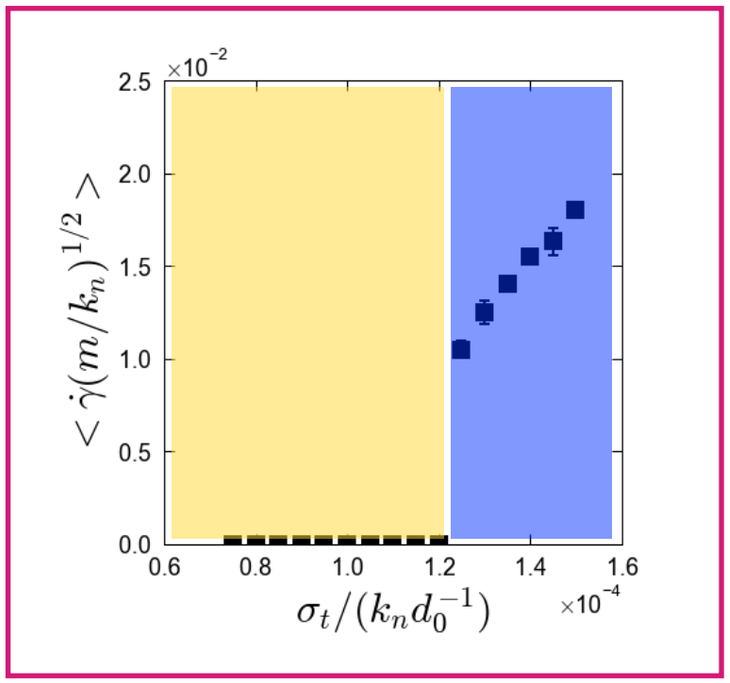
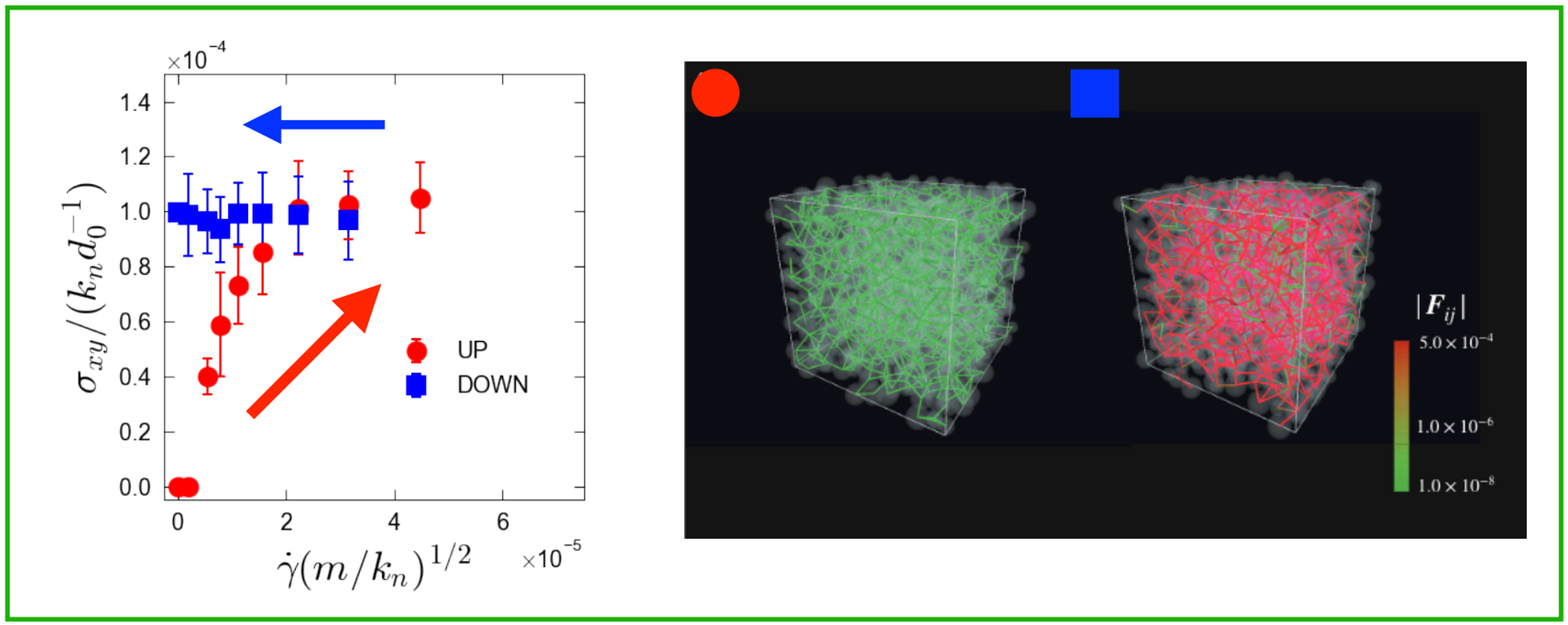
せん断応力制御

- 固相→流動相への転移は一次転移的

せん断速度制御

- せん断速度を上げる：せん断応力の急激な上昇
  せん断速度を下げる：$\dot{\gamma} \to 0$ でも有限のせん断応力

- せん断に誘起された構造変化が濡れの引力によって保持されることに起因

☑ 課題：履歴依存性

☑ 充填率依存性