

気泡を含む液体の粘弾性モデリングと 過渡的せん断応答シミュレーション

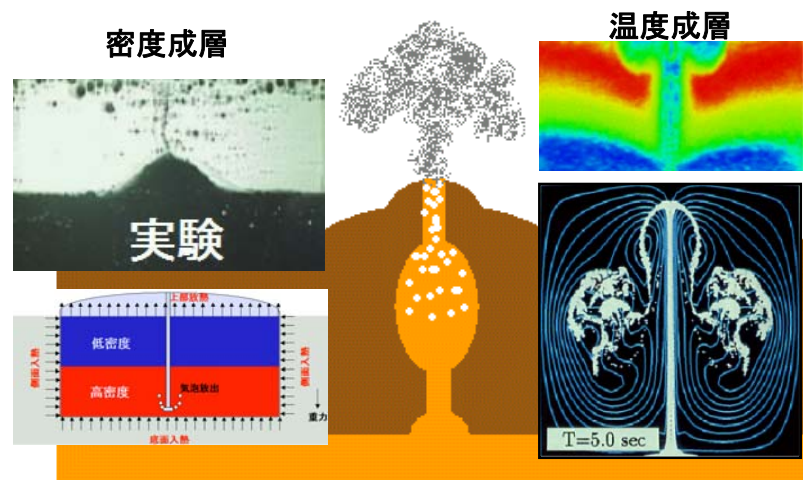


Bubbles in Transient Deformation Provide Different Viscosity

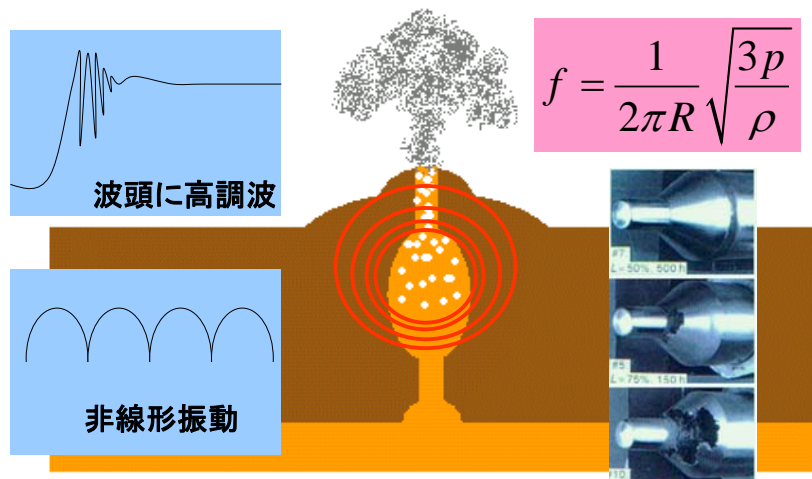
村井 祐一(北海道大学)

資料提供協力 田坂裕司, 桜井康介, 矢野可南子

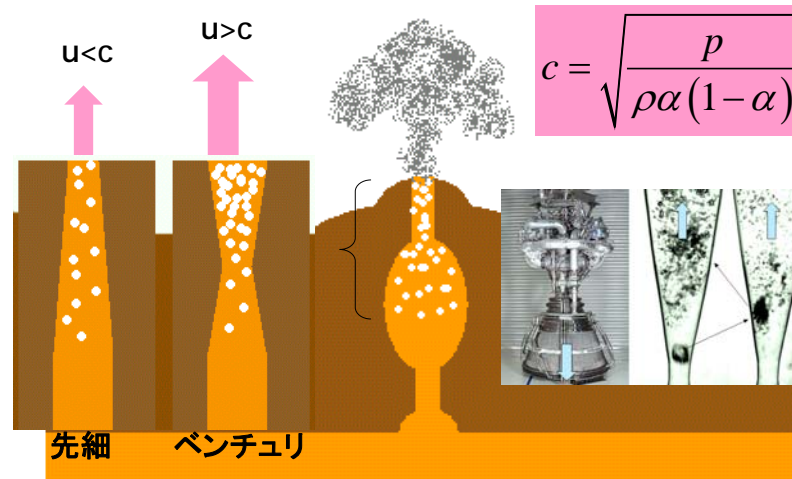
火山と機械工学の接点 対流



火山と機械工学の接点 衝撃



火山と機械工学の接点 音速



分散気泡を含む媒体の粘度

粘度の増加

$$\frac{\mu^*}{\mu_c} = 1 + \alpha$$

粘度の低下

$$\frac{\mu^*}{\mu_c} = 1 - \frac{5}{3}\alpha$$

球形気泡

降伏変形時

表面張力による変形抵抗が消失する

Stokes-Einsteinの式
(G.I. Taylor, G. Batchelor)

平衡変形における実効粘度

Acrivosの平衡変形(定常せん断)粘度

$$\frac{\mu^*}{\mu_c} = \frac{1 + A^2 B (1 + 4\alpha)}{1 + (AB)^2} \left(1 + \alpha + \frac{5}{2}\alpha^2 \right)$$

キャピラリ数

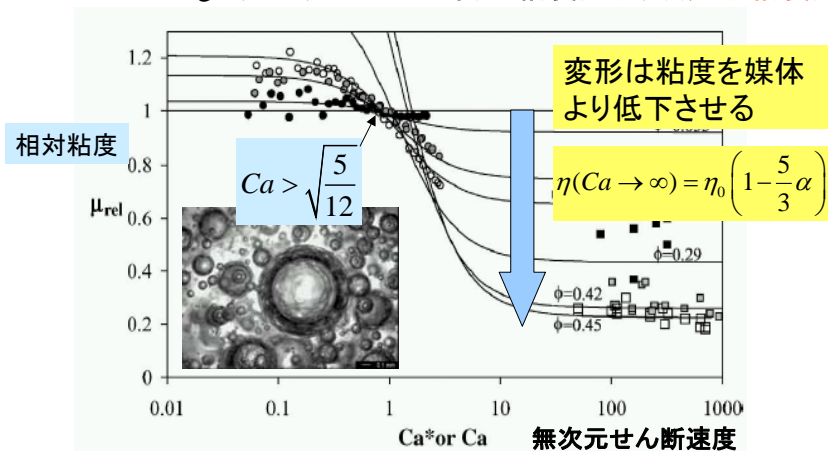
$$Ca = \frac{r}{\sigma} \left(\mu_0 \frac{du}{dy} \right)$$

非ニュートン流体
(Schwoelter, Rust, Manga)

$A = \frac{6}{5}Ca, B = 1 + \frac{20}{3}\alpha$

大変形気泡流の実効粘度の実測値

Rust & Manga (2002) 二重円筒式粘度計測法(定常粘度)



分散混相媒体の粘度

ポイド率 α の係数の振る舞い

$$\mu = \mu_0 (1 + f\alpha)$$

f は剪断変形周波数の関数

$$f|_{\omega \rightarrow 0} = +\frac{5}{2}$$

弾性回復力が卓越し球形を保持(球形粒子)

$$f|_{\omega \rightarrow 0} = +1$$

弾性回復力が卓越し球形を保持(球形気泡)

$$f|_{\omega \rightarrow \infty} = -\frac{5}{3}$$

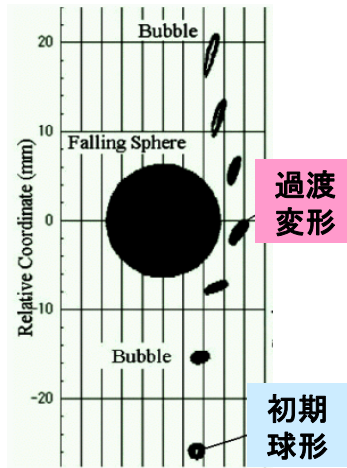
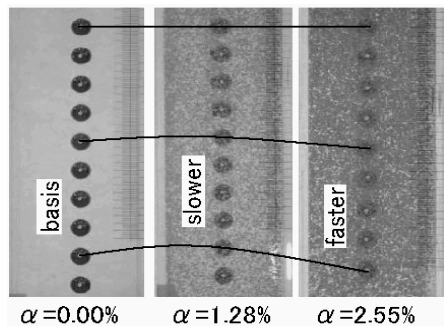
弾性回復力より慣性が上回る(無抵抗に変形する降伏気泡)

【参考】

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{\alpha}{1-\alpha} f\right)$$

.....分散相体積率が高い場合($\alpha > 0.3$)

落球粘度測定法



Re << 1 の条件での落球法

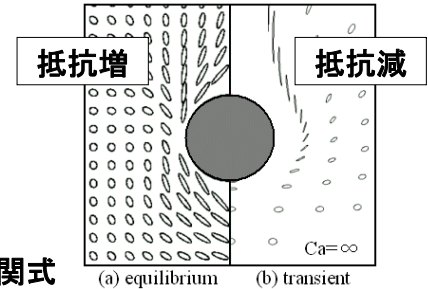
$$\frac{4}{3} \pi r_s^3 (\rho_s - \bar{\rho}) g = C_D \pi r_s^2 \frac{1}{2} \rho U_\alpha^2$$

落球粘度測定法からの f の測定結果

球まわりの流れ場

$$u_r = U \cos \theta \left(1 - \frac{3 r_s}{2 r} + \frac{1 r_s^3}{2 r^3} \right)$$

$$u_\theta = U \sin \theta \left(1 - \frac{3 r_s}{4 r} - \frac{1 r_s^3}{4 r^3} \right)$$

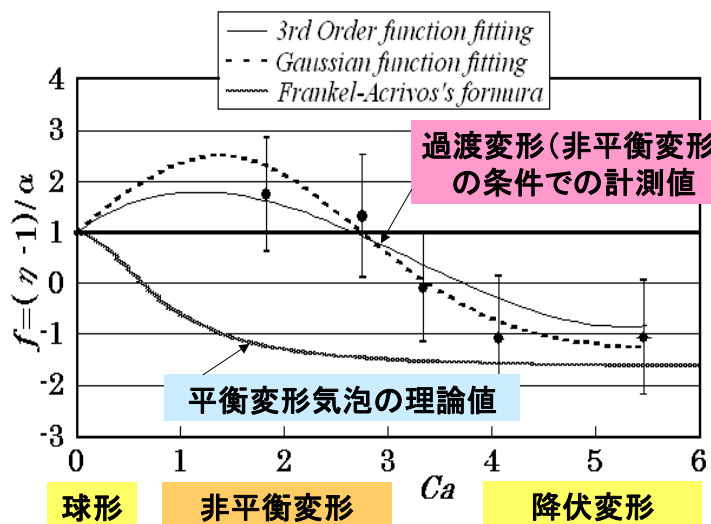


落球式粘度計測法による相関式

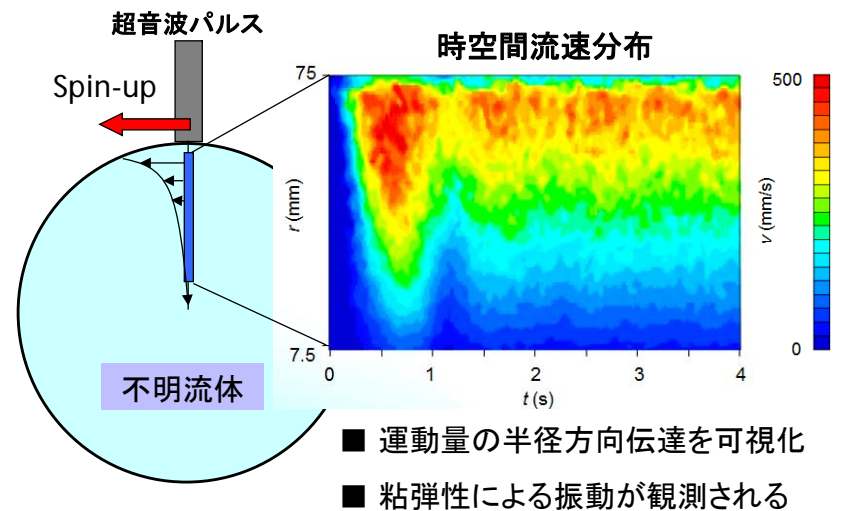
$$f = 1 + A \left\{ e^{-\frac{(Ca-C)^2}{B}} - e^{-\frac{C^2}{B}} \right\}, \begin{cases} A = 3.818 \\ B = 3.796 \\ C = 1.386 \end{cases}$$

Y.Murai, H.Oiwa, FDR (2008)

落球粘度測定法からの f の測定結果

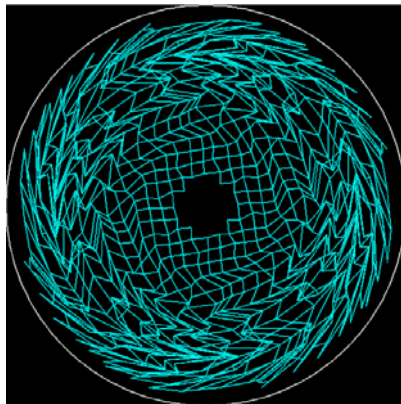


超音波ドップラーレオメトリ



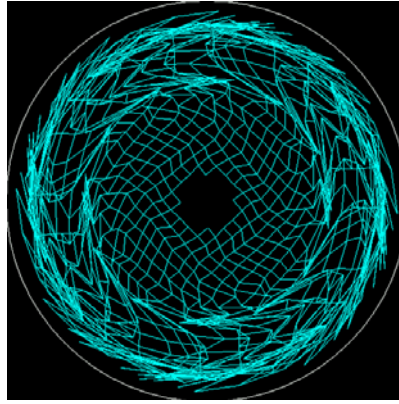
スピンによる流体の変形の構造

1w%のPAA水溶液



粘弾性による構造保持

ヨーグルト



降伏・液状化層と弾性層

レオロジー物性値の計測

運動量保存方程式

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{r \partial \theta} \right) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau)$$

$$\rightarrow \rho \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau) = 0$$

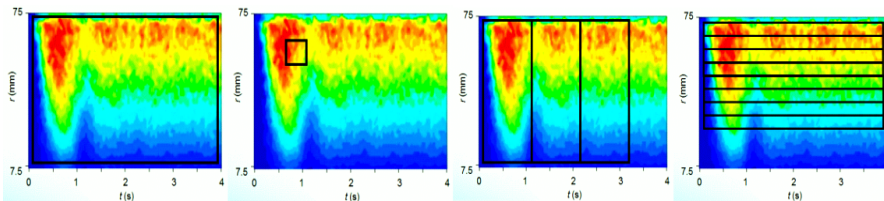
Herschel-Bulkley モデル

$$\left[\begin{array}{l} \tau = E\gamma = E \int \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = E \int \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) dt \quad (\tau < \tau_y) \\ \tau = K \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^n + \tau_y \quad (\tau \geq \tau_y) \end{array} \right.$$

レオロジー物性値の計測

費用関数による最適値検索

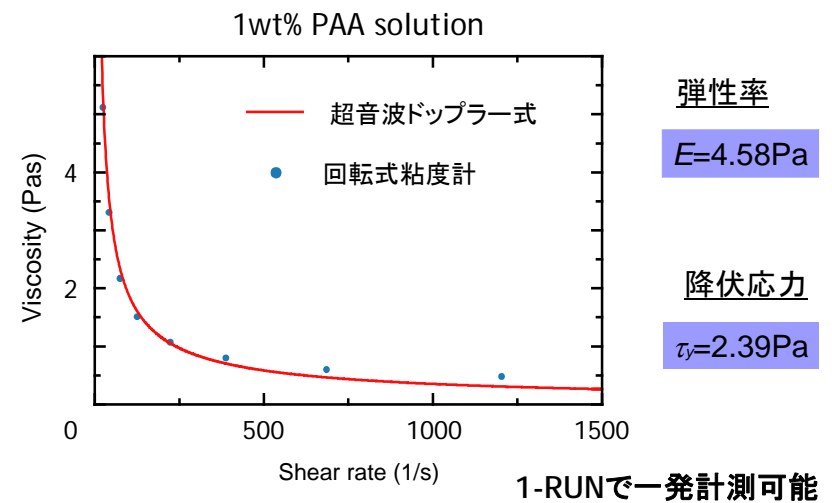
$$g(K, E, n, \tau_y) = \left\{ \rho \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau) \right\}^2$$



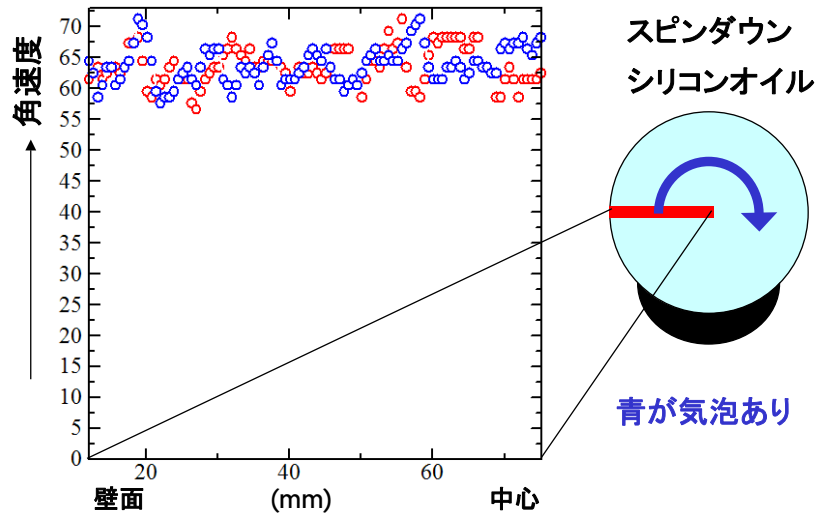
時空間積分型費用関数を利用

$$G(K, E, n, \tau_y) = \iint g(K, E, n, \tau_y) dr dt \rightarrow \min$$

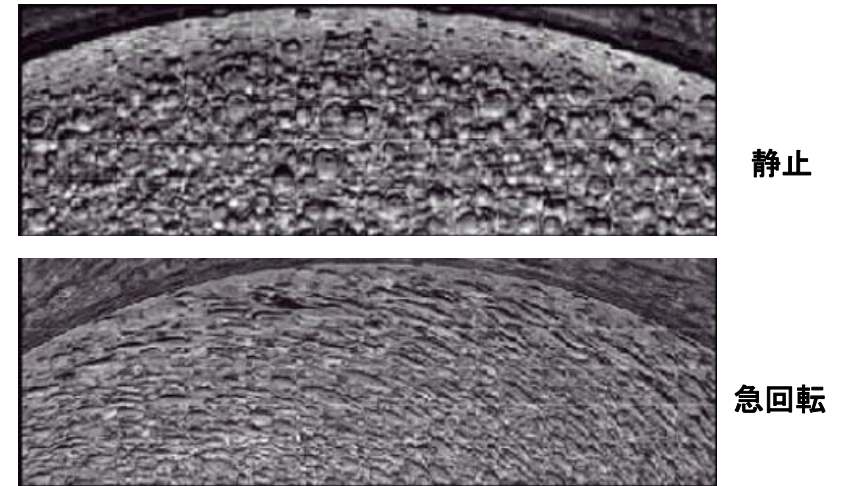
レオロジー物性値の計測結果



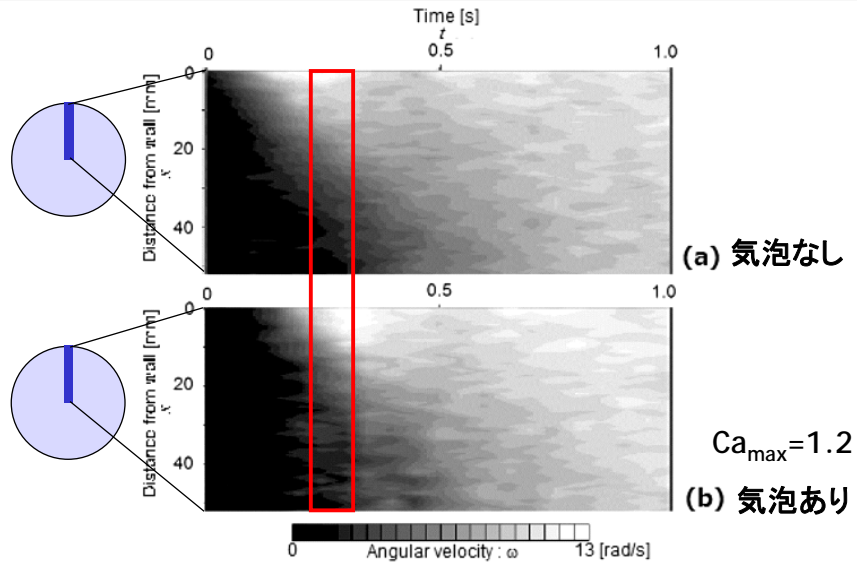
気泡を含む液体のスピンドウン応答



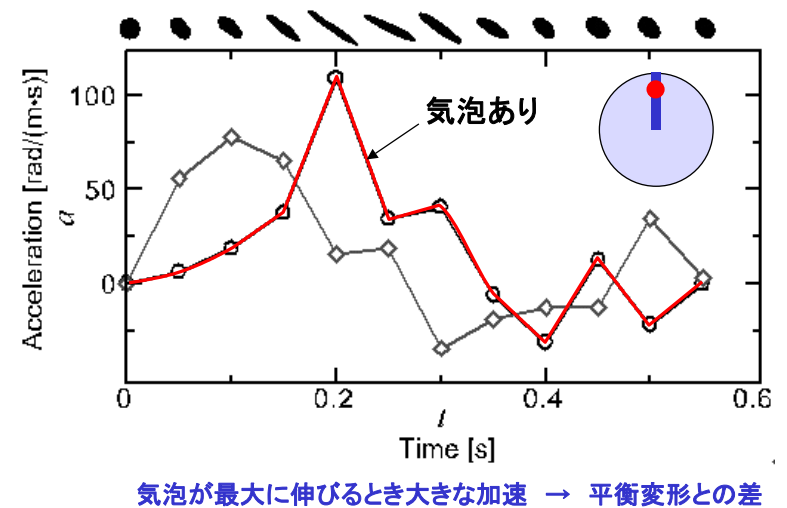
スピンドアップ時の気泡の変形



スピンドアップ時の流速分布の応答



スピンドアップ時の気泡形状と流速の関係



粘弾性(複素粘度)のモデリング

運動量保存方程式

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{uv}{r} + \frac{u}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau)$$

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right) = \mu_0 (1 + f\alpha) \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right)$$

係数 f のモデリング

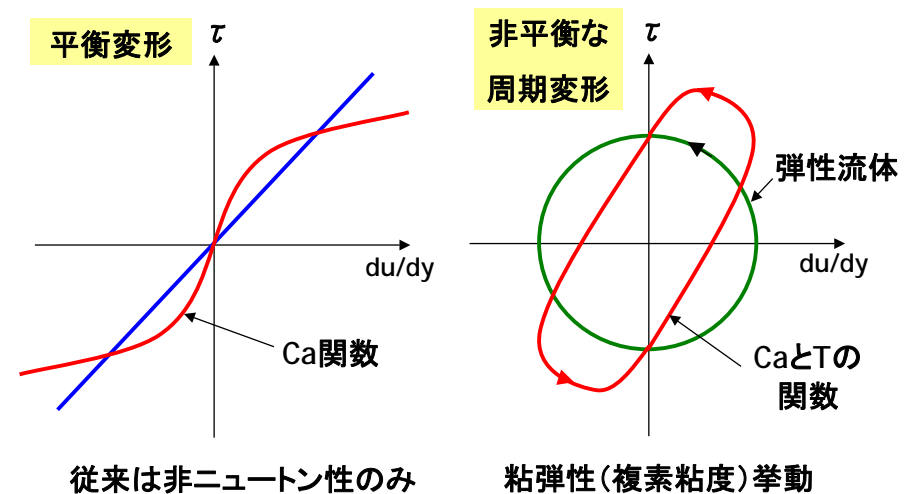
$$f = f_S + (f_A - f_S) \left(1 - e^{-\lambda^2} \right) \frac{\lambda}{|\lambda|}$$

$$f_S = \left(1 - \frac{12}{5} Ca^2 \right) \left[1 + \left(\frac{6}{5} Ca \right)^2 \right]^{-1}$$

$$\lambda = \frac{d|Ca|}{dt} \cdot T$$

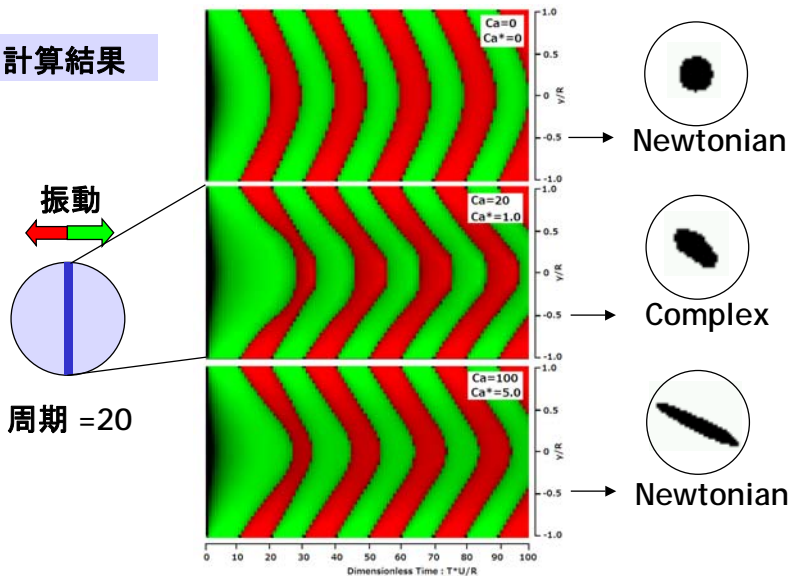
$$f_A = 1 + \frac{42}{11} \left[e^{\frac{5}{19} \left(Ca - \frac{18}{13} \right)^2} - e^{-\frac{5}{19} \left(\frac{18}{13} \right)^2} \right]$$

気泡流のせん断応力サイクル

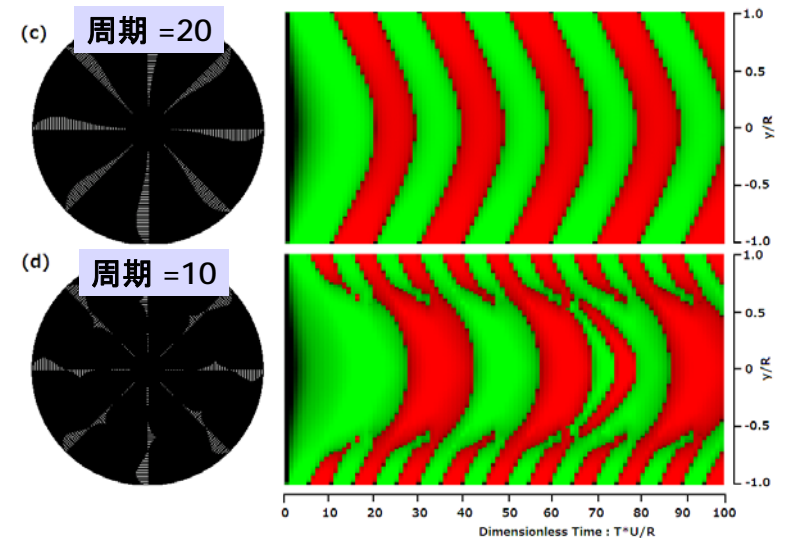


振動スピン流れの流速分布

計算結果



振動スピン流れの流速分布



まとめ

1世紀を超えた理論的研究

理論や実験は平衡変形条件のみ

せん断応力場の周波数応答性

界面張力由来の複素粘度

Ca=0.5~5.0の範囲で顕在化

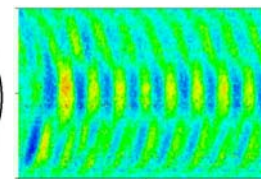
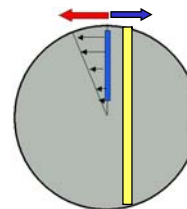


機械工学では気泡による流れのコントロール
火山シミュレーションでは過渡的応答に関係

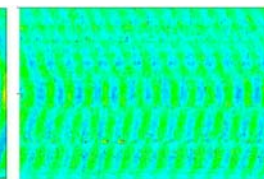
振動スピン流れの流速分布

振動スピン

→物性の周波数応答



低周波数スピン



高周波数スピン

非対称波形による振動

→ Rheological Streaming

粘弾性による流れの駆動



ホワイトノイズスピン

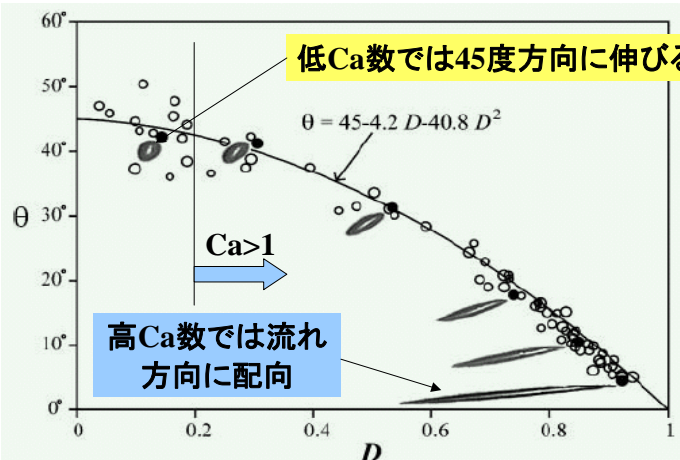
→ Spectral Assessment

成長モードの評価



気泡の扁平率と伸張角度の関係

Rust & Manga (2001)



超音波ドップラーレオメトリ

