1　理論

1.1　トルクと粒子の回転

xy 平面上を x 軸方向に流れるせん断流下に球形粒子が存在する場合，流体から受けるトルクは式 (1) で表される [].

$$N_z^{\mathrm{H}} = 4\pi\mu a^3\dot{\gamma} \tag{1}$$

ここで，μ は流体の粘度，a は粒子の半径，$\dot{\gamma}$ はせん断速度である．流体から受けるトルクに加えて，**??**で述べた bottom heavy 性によるトルクを考えることで，粒子の回転の有無を考えることができる．本研究では，xy 平面上を x 軸方向に流れるせん断流を考えたため，squirmer は xy 平面上を移動すると考えた．したがって，squirmer の方向ベクトルは θ を用いて $\hat{\boldsymbol{e}} = (\sin\theta, \cos\theta, 0)$ のように表すことができる．また，系にかかる重力を y 軸方向下向きとし，$\boldsymbol{g} = (0, -g, 0)$ と表すと，式**??**は，式 (2) のように表される．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{N}^{\mathrm{b.h.}} &= \frac{4}{3}\pi\rho h \cdot (\sin\theta, \cos\theta, 0) \times (0, -g, 0) \\ \therefore N_z^{\mathrm{b.h.}} &= -\frac{4}{3}\pi\rho h g \sin\theta \end{aligned} \tag{2}$$

したがって，流体から受けるトルクと，bottom heavy 性によるトルクの和の z 成分は，式 (3) のように表される．

$$\begin{aligned} N_z &= N_z^{\mathrm{H}} + N_z^{\mathrm{b.h.}} \\ &= 4\pi\mu a^3\dot{\gamma} - \frac{4}{3}\pi\rho h g \sin\theta \end{aligned} \tag{3}$$

したがって，粒子の進行方向と粒子にはたらくトルクの z 成分の関係は，せん断速度の大きさにより，Fig.1(a)〜(c) のように 3 種類のグラフで表すことができる．せん断速度が小さい場合には，bottom heavy 性によるトルクが支配的となり，Fig.1(a) のように，トルクの和が 0 となる $0 \leq \theta < \pi/2$ の間の角度で粒子の進行方向が固定され，粒子は回転しないことが予想される．また，Fig.1(b) のように，流体から受けるトルクの値が，bottom heavy 性によるトルクの大きさの最大値となる場合は，粒子の進行方向は $\theta = \pi/2$ に固定され，粒子は回転しないことが予想される．せん断速度がその値よりも大きくなると，Fig.1(c) のように，流体から受けるトルクが支配的となり，粒子が定常的に回転することが予想される．このように，流体から受けるトルクと bottom heavy 性によるトルクの釣り合いから，粒子の進行方向が異方的になることが予想される．

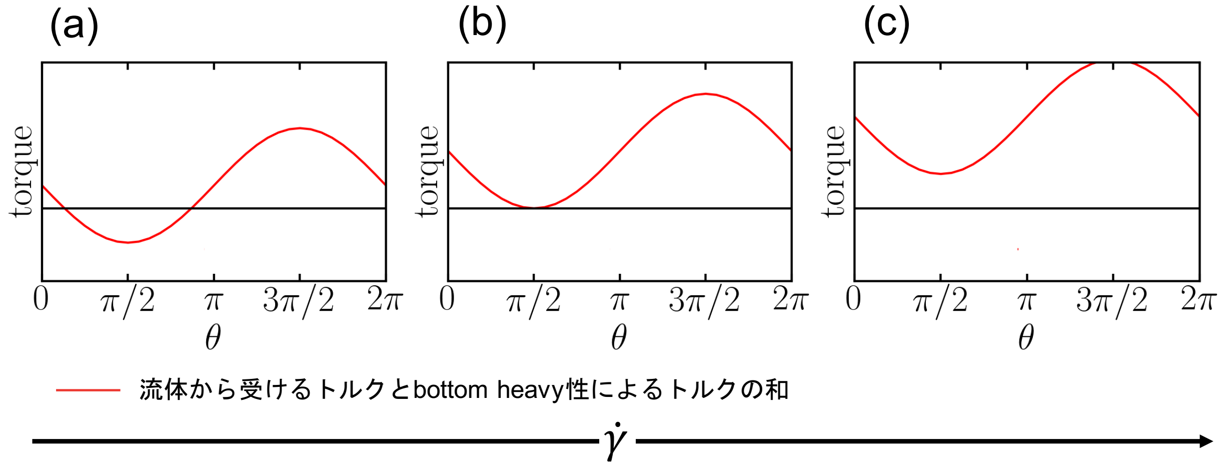

Fig. 1 せん断速度の大きさの違いによる粒子にはたらくトルクの分類

1.2 粒子の回転が系に及ぼす影響

粒子が系に存在することで生じる応力は，式 (4) のように，それぞれの粒子が存在することによる応力の総和を系の体積で割ることで求めることができる．

$$\boldsymbol{\Sigma}^{(\mathrm{p})} = \frac{1}{V}\sum \boldsymbol{S} \tag{4}$$

系に存在する粒子が，squirmer 単体である場合には，その存在による応力は，式 (5) のように表される．

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{sol}} = \frac{4}{3}\pi a^2(3\boldsymbol{ee} - \boldsymbol{I})B_2 \tag{5}$$

式 (5) を (4) に代入し，squirmer の方向ベクトルを成分表示し，応力の xy 成分を抽出すると，式 (6) のように表される．

$$\begin{aligned}\Sigma^{(\mathrm{p})}_{xy} &= \frac{4\pi a^2 B_2}{V} e_x e_y \\ &= \frac{4\pi a^2 B_2}{V} \sin\theta\cos\theta \end{aligned} \tag{6}$$

この応力は，$B_2 > 0$ の場合，Fig.2 のように表される．

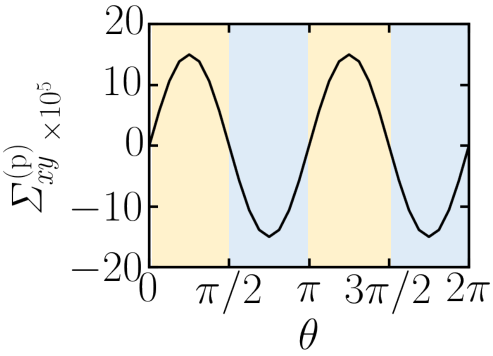

Fig. 2 単体 squirmer の存在による応力の xy 成分

このグラフより，粒子が定常的に回転している場合には，粒子の存在による応力の時間平均をとると，プラスとマイナスで打ち消し合い，系に影響は与えないと予想される．一方，粒子の進行方向がオレンジ色で示した範囲内に固定される場合には，系の応力を大きくする方向にはたらき，水色で示した範囲内に固定される場合には，系の応力を小さくする方向に働くことが分かる．$B_2 < 0$ の場合は逆に，粒子の進行方向がオレンジ色で示した範囲内に固定される場合には，系の応力を小さくする方向に働き，水色で示した範囲内に固定される場合には，系の応力を大きくする方向に働くことが分かる．ここで，**??**で述べた有効粘度の式を再掲する．

$$\eta_{\mathrm{eff}} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \tag{7}$$

この式から，系にはたらく応力が大きくなると有効粘度は大きくなり，応力が小さくなると有効粘度は小さくなることがわかる．したがって，1.1 で述べたように，squirmer の進行方向が，$0 \leq \theta < \pi/2$ で固定された場合，Puller 型の場合は，有効粘度を大きくする方向にはたらき，Pusher 型の場合は，有効粘度を小さく方向にはたらくことが予想される．