1　計算手法

1.1　Suirmer モデル

マイクロスイマーのモデルとして，Squirmer モデル [] を採用した．このモデルでは，球形の粒子表面において，粒子と流体の速度差が式 (1) で表される様な sliding 境界条件を用いる．

$$\boldsymbol{u}^{\mathrm{s}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n(n+1)} B_n P_n'(\cos\theta) \sin\theta \hat{\boldsymbol{\theta}} \tag{1}$$

ここで，$\hat{\boldsymbol{r}}$ は粒子の中心からその表面上の点に向かう単位ベクトルであり，θ は $\hat{\boldsymbol{r}}$ と粒子の方向ベクトル $\hat{\boldsymbol{e}}$ とが成す角，$\hat{\boldsymbol{\theta}}$ は単位極角ベクトルである．また，$\boldsymbol{u}^{\mathrm{s}}$ はマイクロスイマー表面の重心に対する slide 速度，B_n は係数，P_n' は n 次 Legendre 多項式の導関数である．しかし，$n = 1$ の項は squirmer の泳動速度を，$n = 2$ の項は squirmer の存在によって生じる応力を決めるが，$n \geq 3$ の項は，泳動速度，および応力に影響を与えないので，式 (1) は，式 (2) の様に簡略化できる．

$$\boldsymbol{u}^{s} = B_1 \left(\sin\theta + \frac{\alpha}{2} \sin 2\theta \right) \hat{\boldsymbol{\theta}} \tag{2}$$

ここで，B_1 はマイクロスイマーの進行速度の大きさ ($U = 2/3B_1$) を与え，$\alpha = B_2/B_1$ はその符号によりスイマーの種類を表す定数となる．$\alpha > 0$ を Puller 型，$\alpha = 0$ を Neutral 型，$\alpha < 0$ を Pusher 型と呼ぶ．Puller 型は，周辺流体に収縮流を生成し，Pusher 型は伸長流を生成する．

Fig. 1 Squirmer モデルにおける Pusher 型，Neutral 型，Puller 型の概略図

1.2　Smoothed Profile Method

固液二相シミュレーションにおいて，固体-液体の移動境界の取り扱いは非常に重要である．今回のシミュレーションでは，物理量とは異なる識別関数を導入し，仮想流体領域を考える Smoothed Profile Method(SPM)[] を用いた．SPM では，流体と粒子の界面に Fig.1.2 のような界面関数 ϕ を導入する．この界面関数は，流体領域で $\phi = 0$，粒子領域で $\phi = 1$ をとり，幅 ξ の界面領域では滑らかに変化する連続関数である．界面関数の導入により，境界条件を解く必要がなくなり，以下で説明する Navier-Stokes 方程式，および運動方程式を直接数値計算によって解くことが可能となる．

Fig. 2 SPM の界面関数

1.3　支配方程式

本研究では，流体の運動を非圧縮条件の Navier-Stokes 方程式，マイクロスイマーの運動を Newton 方程式，および Euler 方程式を用いて解いた．

1.3.1 Navier-Stokes 方程式

$$\rho_{\mathrm{f}}(\partial_t + \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{\nabla})\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{\sigma} + \rho_{\mathrm{f}}(\phi\boldsymbol{f}_{\mathrm{p}} + \boldsymbol{f}_{\mathrm{sq}} + \boldsymbol{f}_{\mathrm{s}}) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{u} = 0 \tag{4}$$

ここで，t は時間，ρ_{f} は流体の質量密度，$\boldsymbol{\sigma}$ は流体の応力テンソル，$\phi\boldsymbol{f}_{\mathrm{p}}$ は粒子の剛直性を保証する体積力，$\boldsymbol{f}_{\mathrm{sq}}$ は流体と粒子間の速度差を生じる力，$\boldsymbol{f}_{\mathrm{s}}$ はジグザグ流を生じる力である．ジグザグ流とは，Fig.1.3.1 のような速度プロファイルで表される流体の流れである．

Fig. 3 ジグザグ流

ここで，$\dot{\gamma}$ はせん断速度，y は y 座標の値，L_y は y 軸方向の系の大きさである．この流れは，$L_y \to \infty$ のとき，厳密に Couette 流とみなすことができる．

1.3.2 運動方程式

$$\dot{\boldsymbol{R}}_i = \boldsymbol{V}_i \tag{5}$$

$$M_{\mathrm{p}}\dot{\boldsymbol{V}}_i = \boldsymbol{F}_i^{\mathrm{H}} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{p}}\cdot\dot{\boldsymbol{\Omega}}_i = \boldsymbol{N}_i^{\mathrm{H}} + \boldsymbol{N}_i^{\mathrm{b.h.}} \tag{7}$$

ここで，$\boldsymbol{F}_i^{\mathrm{H}}$ は流体から受ける力，$\boldsymbol{N}_i^{\mathrm{H}}$ は流体から受けるトルク，$\boldsymbol{N}_i^{\mathrm{b.h.}}$ は bottom heavy 性によるトルクである．M_{p} は粒子の質量，$\boldsymbol{I}_i$ は慣性モーメント，$\dot{\boldsymbol{R}}_i$ は粒子の位置，$\boldsymbol{V}_i$ は粒子の速度，$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_i$ は粒子の角速度である．

Fig. 4 bottom heavy 性を有する squirmer

Fig.**??**のように表される squirmer について，bottom heavy 性によるトルクは式 (8) で計算される．

$$\boldsymbol{N}^{\mathrm{b.h.}} = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho h \boldsymbol{e}\times\boldsymbol{g} \tag{8}$$

ここで，a は粒子の半径，ρ は粒子の密度，h は球の中心と粒子の重心との距離，$\boldsymbol{e}$ は粒子の方向ベクトル，$\boldsymbol{g}$ は重力ベクトルである．

1.3.3 異方性の導入

本研究では，bottom heavy 性を squirmer に付加することで，squirmer の進行方向に異方性を与えた．その原理について述べる．周辺流体に流れを生じさせる，Pusher 型/Puller 型の squirmer の進行方向が鉛直上上向きからずれた場合，Fig.1.3.3 のように擬似的なせん断流を考えることができる．

Fig. 5 suirmer の存在による応力

粒子が存在することによって生じる応力は式 (9) のように表される [].

$$\boldsymbol{\Sigma}^{\mathrm{p}} = \frac{1}{V}\sum \boldsymbol{S} \tag{9}$$

ここで，V は系の体積，$\boldsymbol{S}$ は単体粒子による応力である．系に存在するのが単体の squirmer のみの場合，その応力は式 (10) により計算される [].

$$\boldsymbol{S} = \frac{4}{3}\pi a^2(3\boldsymbol{ee} - \boldsymbol{I})B_2 \tag{10}$$

ここで，a は squirmer の半径，$\boldsymbol{e}$ は squirmer の方向ベクトル，$\boldsymbol{I}$ は単位行列である．したがって，これらの 2 式から，squirmer 単体が存在することで生じる応力の xy 成分は，

$$\boldsymbol{\Sigma}^{\mathrm{p}}_{xy} = \frac{4\pi a^2 B_2}{V} e_x e_y \tag{11}$$

と表される．ここで，e_i は squirmer の方向ベクトルの i 成分である．この応力は，粒子の進行方向により，Fig.1.3.3 のように表される．グラフから，粒子が定常的に回転している場合，この応力の影響はプラスとマイナスで打ち消されると考えられる．

Fig. 6 $\boldsymbol{\Sigma}^{\mathrm{p}}_{xy}$ と粒子の進行方向の関係

ここで，bottom heavy 性によるトルクの影響を考える．流体から受けるトルクと bottom heavy 性によるトルクの大小関係から，粒子の回転が制限され，粒子の進行方向がいずれかの進行方向に固定された結果，応力に影響を与えると考えられる．例えば，B_2 の値が正である Puller 型の場合，その進行方向が 0〜$\pi/2$ の間に固定された場合，応力を大きくする方向に影響を与えると考えられる．

Fig. 7 粒子の進行方向が応力の大きさに与える影響

本研究では，xy 平面上を x 軸方向に流体の流れを生じさせ，y 軸方向に重力をかけた．