

埋め込み境界法による揚力および粘性トルクの解析

(岡山理大工)(学)下山 悠・(岡山理大工)(正)桑木 賢也*

1. はじめに

気泡流動層や噴流層などの解析に、DEM(離散要素法: Discrete Element Method)+CFD(数値流体力学: Computational Fluid Dynamics)カップリングモデルは広く用いられているが、近年では、循環流動層(Circulating Fluidized Beds)のような粒子希薄系にも応用されるようになってきた。CFBは、粒子の自由行程が気泡流動層より長くなるため、揚力や粘性トルクのような粒子-粒体間の相互作用の影響は大きくなり、無視できなくなると考えられる。DEMではこのような粒子スケール以下の現象は直接求めることができない。

そこで本研究では、直接数値計算(Direct Numerical Simulation)の一種である Kajishima ら¹⁾により提案された体積力型埋め込み境界(Immersed Boundary)法を用いて揚力および粘性トルクに関して検討を行った。

2. 数値解析手法

解析領域を図 1 に示す。領域中心で球形粒子を回転させ、下方から流体を流入させたときにかかる力を求めた。本研究では、慣性項は三次精度風上差分法、粘性項は二次精度中心差分法により離散化を行ない、圧力場の解法には HS-MAC 法を用いた。

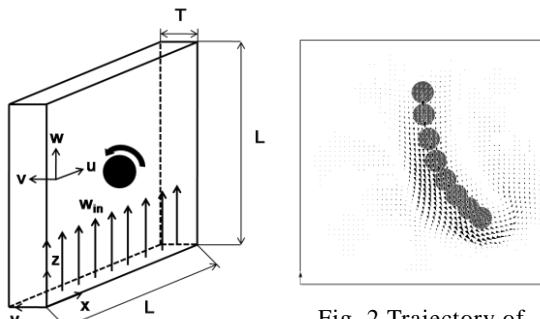


Fig. 1 Schematic of the system

Fig. 2 Trajectory of particle acted upon by Magnus force

3. 結果

粒子の回転により生じる揚力(Magnus 力)に関して検討した結果を図 3 に示す。また、表 1 に計算条件、Magnus 力がかかる条件下での粒子軌跡を図 2 に示す。粒子回転レイノルズ数は $Re_p=0.412$ とした。これは、粒径 $d_p=1.0\text{mm}$ のときの粒子の回転角速度 $\omega=30\text{rad/s}$ に相当する。この値は DEM シミュレーションにおいて、流動層内粒子の平均角速度が約 30rad/s であったことによる。図より Oesterle and Dinh の結果²⁾と良い一

致が見られたが、高レイノルズ数域($Re_p>20$)で離れていく傾向が得られた。Saffman 力に関しては、McLaughlin の結果³⁾に定性的に一致し、低レイノルズ数域($Re_p=2\sim 10$)を除いては定量的にも一致した。粘性トルクに関しては、Takagi の解析解⁴⁾と定性的には一致したが、定量的には全般的に 50% 程の差が見られた。

Table 1 Calculation conditions for Magnus force analysis

Case 1 (Magnus force)

Particle Reynolds number: Re_p	1.099, 5.495, 32.97, 65.93, 82.42, 109.9
Rotation Reynolds number: Re_R	0.412

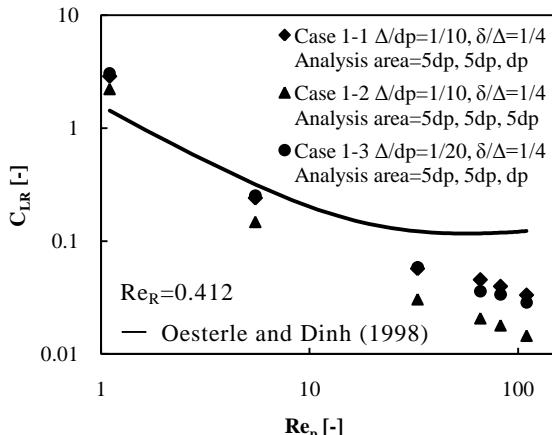


Fig. 3 Lift coefficient due to rotation

4. 結言

揚力、粘性抵抗トルクに関してシミュレーションを行い、DNS の一手法である埋め込み境界法(IB)法の適用性を検討した。解析の結果、揚力に関しては流れ方向の計算領域を粒径の 2 倍、計算メッシュを粒径の 1/20 程度にすれば比較的精度良くシミュレーションができることが分かった。一方、粘性抵抗トルクに関して、さらに小さい計算メッシュを用いる必要が分かった。

参考文献

- 1) Kajishima, T., Takiguchi, S., Hamasaki, H. and Miyake, Y., *JSME Int. Journal B*, 44-4, (2001) pp. 526-535.7
- 2) Oesterle, B. and Dinh, T.B., *Experiments in Fluids*, 25, (1998) pp.16-22
- 3) McLaughlin, J.B., *J. Fluid Mech.*, 224, 261-274 (1991).
- 4) Takagi, H., *J. Phys. Soc. Japan*, 42-1, (1977) pp. 319-325

* TEL: 086-256-9574, FAX: 086-255-3611, E-mail: kuwagi@mech.ous.ac.jp