

乱流境界層流中での粒子飛散機構

京大工 小森 悟 (Satoru Komori)
(財) 電中研 黒瀬良一 (Ryoichi Kurose)

1. 緒言

乱流境界層流中を飛散する粒子の運動機構を解明することは、砂漠や石炭堆積場からの粒子の巻き上げによる環境問題や、粉体の空気輸送や混合などの工業問題とも関連して極めて重要である。

このような乱流場では通常、壁が境界として存在するために、壁近傍領域の流体中には強い速度勾配が存在し、その中を飛散する粒子は壁との衝突により回転運動を伴う場合が多い。この流体中の速度勾配や粒子の回転運動の影響により粒子には主流方向の抗力ばかりでなく鉛直方向にも揚力が働く。これまでに、抗力や揚力に及ぼす流体中の速度勾配や粒子の回転運動の影響を検討した研究は数例報告されている[1][2]。しかし、そのほとんどは粒子と流体の相対速度 U_0 及び粒子径 $2a$ を基準にした粒子レイノルズ数 $Re(=2aU_0/\nu)$, ν :流体の動粘性

係数)が1よりもかなり小さい場合($Re \ll 1$)を対象としており、それらの知見を粒子レイノルズ数が大きな場合($Re \gg 1$)にそのまま適用することはできない。粒子レイノルズ数が大きくなると、球の下流側表面には剥離とそれに伴う不規則な渦運動が現れ、抗力や揚力に少なからず影響を及ぼすと考えられる。

本研究では、球の回転速度と流体中の速度勾配とを任意に変えた一様せん断流中の単一回転球まわりの流れに三次元直接数値計算(DNS)を適用することにより、球の回転運動と流体中の速度勾配とが球に働く抗力と揚力に及ぼす効果を粒子レイノルズ数が比較的大きな場合($1 \leq Re \leq 500$)について検討した。また、計算結果をもとにして作成した抗力と揚力の近似評価式を用いて実際の乱流境界層中における粒子の飛散軌跡を予測し、粒子の回転運動と流体中の速度勾配の粒子飛散軌跡への影響を検討した。詳細については別報[3]を参照されたい。

2. 三次元直接数値計算 (DNS)

Figs.1,2に計算対象とした回転球まわりの一様せん断三次元流れ及びその計算領域の概略図を示す。流れの支配方程式である連続の式とNavier-Stokes方程式を連立させて解く方法としては、有限差分法に基づくMAC法を採用した。

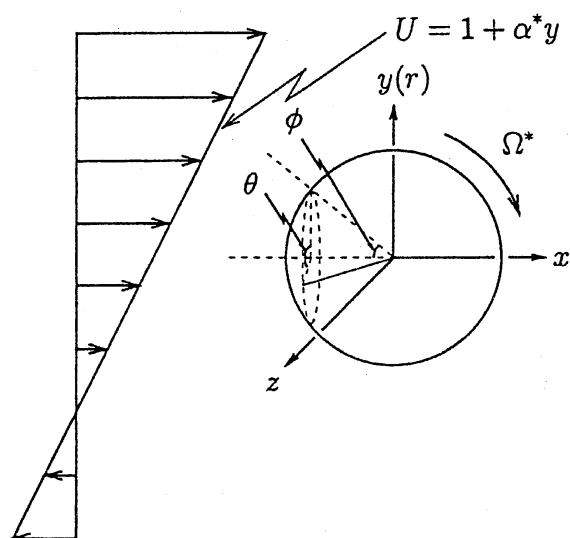


Fig.1 Coordinate system for a rotating sphere in a linear shear flow.

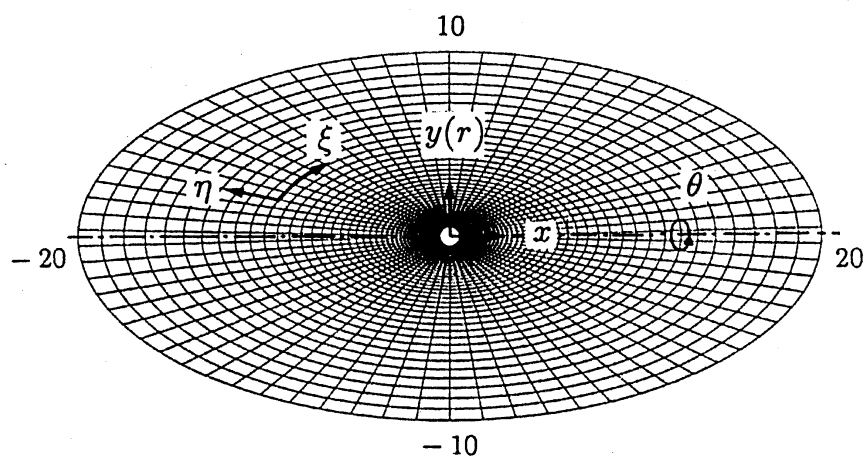


Fig.2 Numerical grids.

3. 結果及び考察

一様等速流中の回転球(球の回転運動のみが存在する場合)に働く揚力係数 C_y の Re と球の角回転速度 $\Omega^*(=\Omega a/U_c, \Omega$:角回転速度の有次元数)に対する変化をFig.3(a)に、また、一様せん断流中の静止球(流体中の速度勾配のみが存在する場合)に働く C_y の Re と流体中の速度勾配 $\alpha^*(=\alpha a/U_c, \alpha$:速度勾配の有次元数)に対する変化をFig.3(b)にそれぞれ示す。一様等速流中の回転球に働く C_y は Re の増加に伴い一定値に漸近し、その値は Ω^* の増加に伴い増大する。一方、一様せん断流中の静止球に働く C_y は Re の増加に伴い減少し、 $Re>60$ では負の値をとる。これまで、一様せん断流中の静止球に働く揚力が流体速度の速い領域側から遅い領域側へ働く現象を示した例は報告されていなかった。球表面に働く圧力とせん断力の鉛直方向分布図及び球まわり流れのベクトル分布図(図は省略)から、このような C_y の変位は、球の後流側表面に現れる剥離とそれに伴う渦運動が圧力やせん断力の球面分布を変化させるために生じることがわかった。また、Fig.4に示すように、一様等速流中の回転球及び一様せん断流中の静止球に働く抗力係数 C_x はそれぞれ Ω^* や α^* の増加に伴いわずかに増大する。

球の回転運動と流体中の速度勾配が共存する、一様せん断流中の回転球まわりの流れの数値計算結果をもとに、任意の

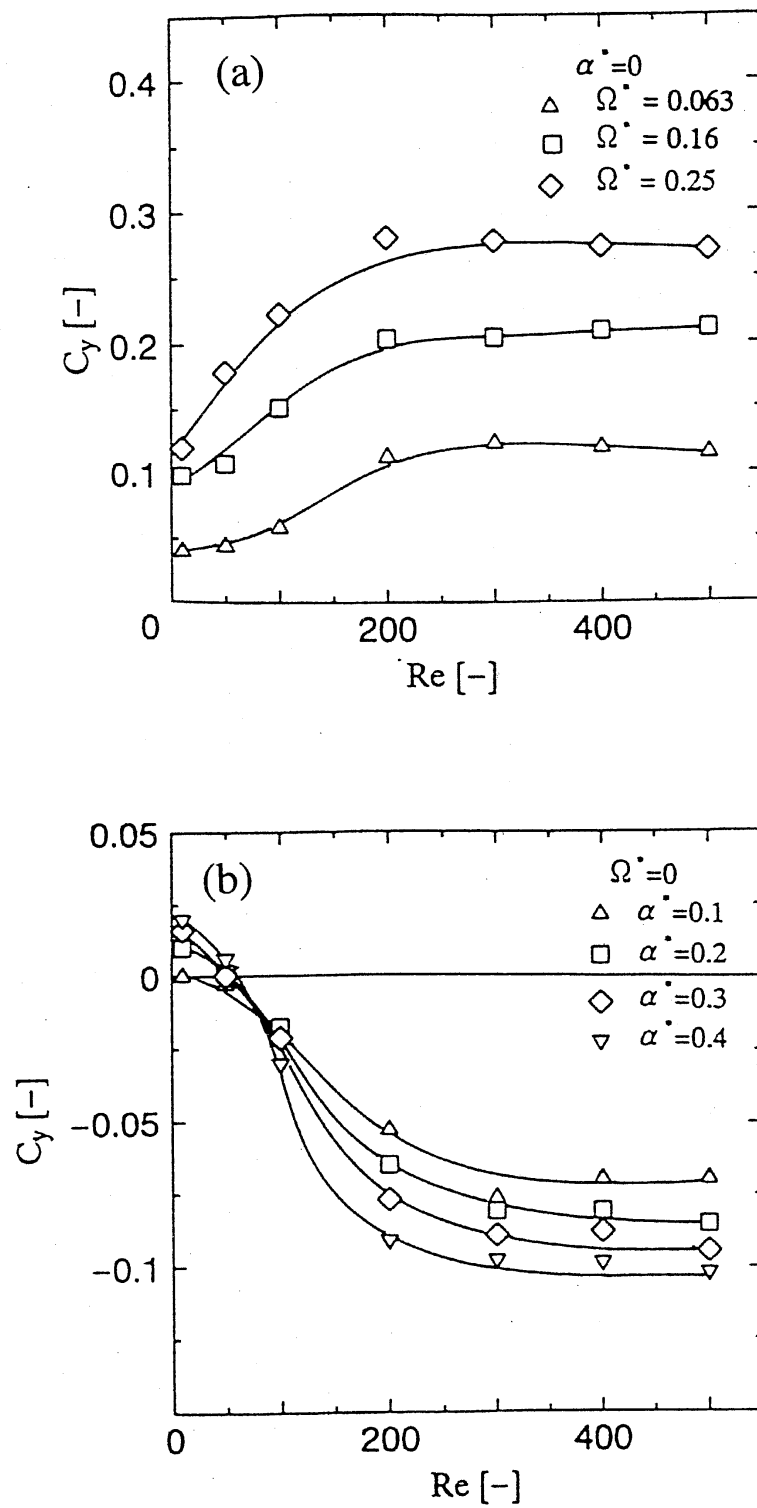


Fig.3 Lift coefficient: (a) rotation effect; (b) shear effect.

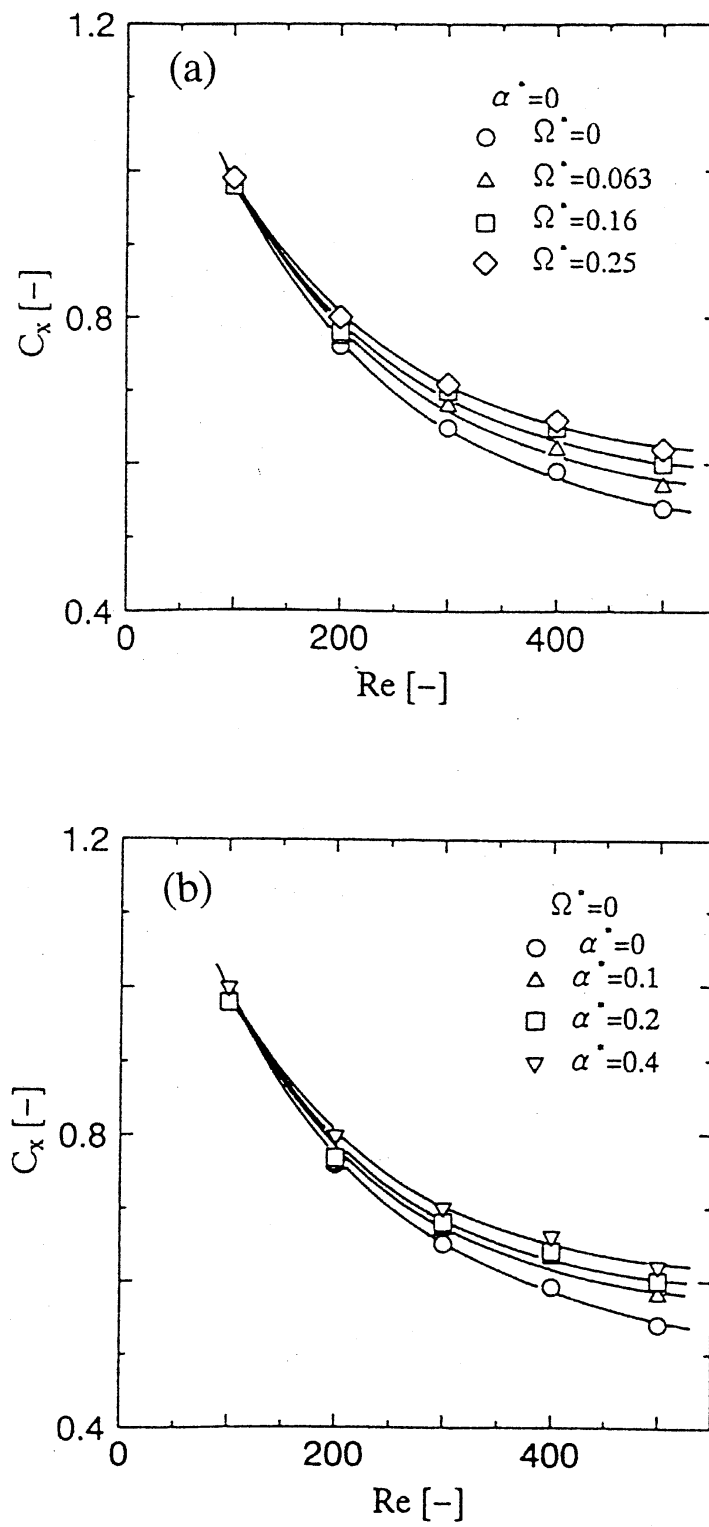


Fig.4 Drag coefficient: (a) rotation effect; (b) shear effect.

Re , Ω^* 及び α^* に対する C_x, C_y の近似評価式を提案した。初期の粒子の位置と速度, 粒子の回転速度, 及び乱流境界層内部の平均流速を著者ら[4]が行った乱流境界層流中での粒子飛散実験(粒径: $500\ \mu\text{m}$, 境界層外縁の一樣流速: 15.9m/s)と同じ条件に設定し、 C_x と C_y に対する近似評価式を用いて粒子の飛散軌跡を予測した。この粒子の飛散軌跡を流体中の速度勾配と粒子の回転運動の効果を無視した場合の計算値と比較して Fig.5 に示す。図から、粒子の回転運動と流体中の速度勾配は粒子の飛散軌跡に強く影響を及ぼし、それぞれ飛散距離を拡大・縮小する働きがあることがわかる。

4. 結言

本研究により、以下の知見を得た。

1. 一樣せん断流中の静止球に働く揚力は低粒子レイノルズ数域では正の値をとるが、粒子レイノルズ数の増加に伴い減少し、 $Re > 50$ では負の値をとる。これは、球の後流側表面に生じる剥離とそれに伴う渦運動の変化によるものである。
2. 乱流境界層流中を飛散する粒子の運動軌跡を正確に予測するためには、粒子の回転運動や流体中の速度勾配の効果を十分に考慮する必要がある。

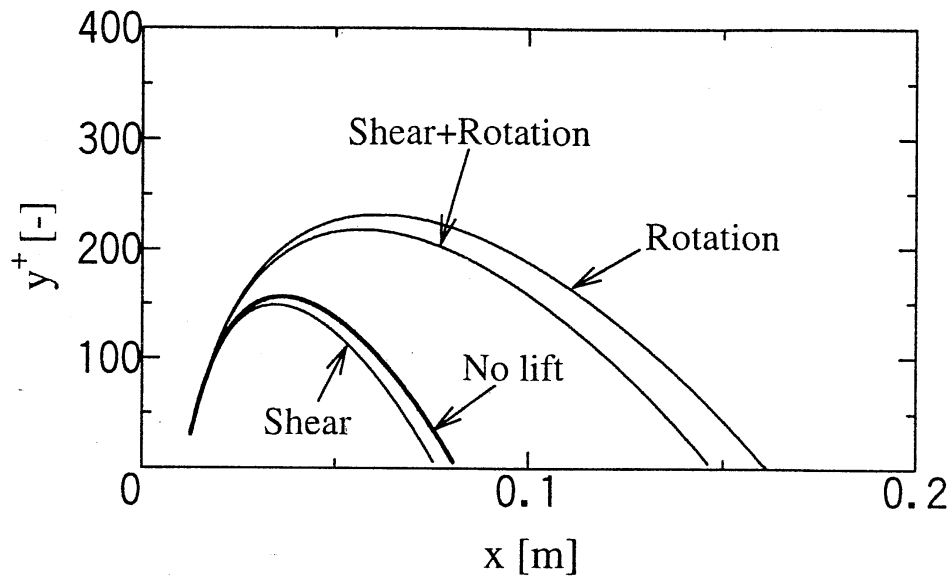


Fig.5 Comparison of particle trajectories.

謝 辞

本計算は国立環境研究所地球環境センターのスーパーコンピュータNEC-SX3を用いて行われた。

引 用 文 献

- [1] Saffman, P. G., *J. Fluid Mech.*, **22** (1965) 385.
- [2] Drew, A. D., *J. Fluid Mech.*, **88** (1978) 393.
- [3] Kurose, R. & Komori, S., *J. Fluid Mech.*, **384** (1999) 183.
- [4] 黒瀬・小森, 機論(B), **61-585** (1995) 1693.