

天体まわりの気体流れの研究

武田英徳 (京大工)

微惑星の成長過程を明らかにするために、大きなダストの塊のまわりの流れを、数値シミュレーションによって求めている。

微惑星は、ダストの塊が互いに衝突し合体することにより形成されると考えられる。ダスト塊が十分に大きくなれば、衝突の際に、相互の重力により合体することが可能だと考えられるが、我々は (関谷実氏が共同研究者である) その大きさに至る以前の、物質間力による相互付着による合体の可能性を考察している。

原始円盤ガス中で、ある程度大きくなったダスト塊に、小さなダスト塊が衝突し付着することにより、大きなダスト塊がさらに成長する場合を考える。ダスト塊のサイズが、それを取り囲む原始円盤ガス粒子の平均自由行程以下の場合には、大きいダスト塊が小さいダスト塊を効率よく集積するということが実験的に示されている (Wurm *et al.* (2001))。しかしながら、ダスト塊のサイズが、ガスの平均自由行程よりもずっと大きい場合には、そのまわりのガスは流体として取り扱われねばならない。その際、小さなダスト塊は、大きなダスト塊に、弾道的に衝突するのではなく、衝突パラメータによっては、大きなダスト塊のまわりの流れに引きずられて流れ去ってしまうこともありうる。

我々は先ず、球状天体 (大きなダスト塊) の周りの流れを求め、その流れのもとで、小さなダスト塊の軌道を計算し、衝突係数と衝突の関係を調べ、ダストの集積の可能性を調べる。

数値計算

これまで用いてきた Implicit factored method という数値計算法によるプログラムを用い、一定速度で運動している球状天体のまわりの流れ、すなわち、無限遠で一様流となる粘性流体中に置かれた球のまわりの流れの数値シミュレーションを行った。

ここで我々が問題にしているのは、マッハ数の小さな流れであり (例えば、 $M_\infty = 0.06$, $M_\infty = v_\infty/C_s$, ここで v_∞ と C_s はそれぞれ無限遠方における速度及び音速)、レイノルズ数が数十から千程度の流れである。

レイノルズ数と流れ場

球のまわりの流れ場はレイノルズ数の増大とともに変わる。例えば Lee(2000) が $100 \leq Re \leq 500$ の範囲で行った数値シミュレーションの結果によると、

$Re = 100 - 250$ では、流れは軸対称で、球の後に定常な渦流がくっついている。

$Re < 375$ では、流れ場は非軸対称で、定常な渦が球の後ろにくっついている。

$450 < Re$ では球からの渦の放出が起こり流れは非定常になる。

したがって、レイノルズ数が小さいときには、2次元軸対称計算で球のまわりの流れを求めればよい。この定常な流れ場の中で、抵抗を受けながら運動する小さいダスト塊の軌道を計算し、球 (大きいダスト塊) に衝突し付着するかどうかを調べるのである。

2次元計算

2次元計算の例として $Re = 50$ の場合の球の近傍の流れ場を Fig.1 に示す。矢印は、流体の速度を表す。ここで $Re = 2Rv_\infty/\nu$, R = 球の半径, v_∞ = 無限遠での一様流の速度、 ν = 気体の動粘

性係数である。上流で一定方向の速度を持っていた小さなダスト塊も、球の近くでは、この流れに引きずられて直線運動からずれる。この様子を Fig.2 に示す。ガスの流れ方向は上向き (z 方向) にとってある。図中の点線はガスの流線を表し、実線は小さなダスト塊の軌道を表している。 T_f は無次元化した friction time で $T_f = t_f v_\infty / R$ である。ここで t_f は、ダストの速度 v_d の時間変化を、ガスの速度 v_g を用いて $dv_d/dt = -(v_d - v_g)/t_f$ と表したときの friction time であって、ダストの質量、衝突断面積、ガスの密度によって決まる量である。ダストの軌跡は T_f と Re で決まるが、Fig. 2 は $T_f = 1.0$ で $Re = 50$ の場合である。 Π と Z は半径 R で規格化した座標である。

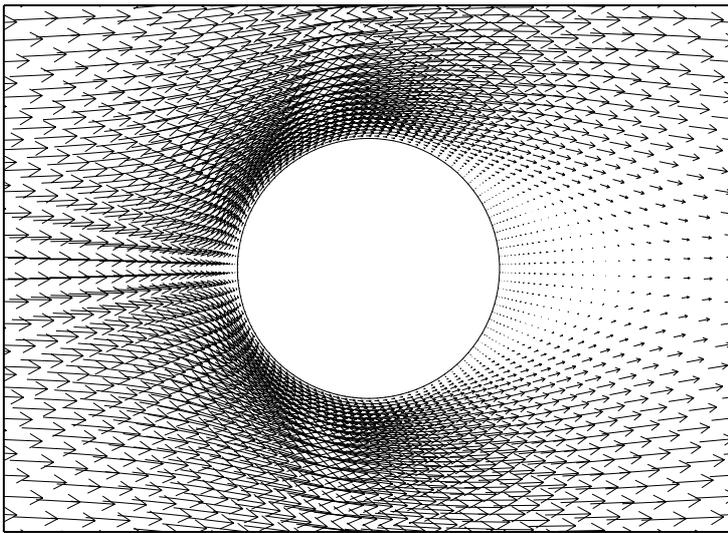


Fig.1 球のまわりの流れ ($Re = 50$)

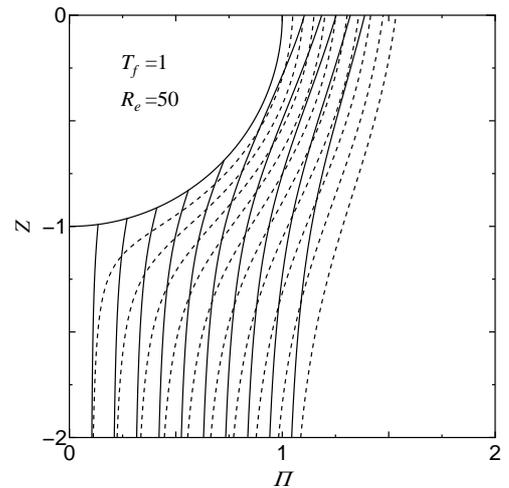


Fig.2 ダスト塊の軌跡 (実線)

小さなダスト塊の中には衝突後分裂し、分裂片が大きいダスト塊から飛び出すものもある。この飛び出した分裂片は流れによって運び去られて、大きいダスト塊の成長に寄与しない可能性もある。我々はこれらの事情を考慮し、原始惑星系円盤中でのダストの成長がどのようなものであるかを調べ、論文にまとめているところである。

3次元計算

レイノルズ数が大きくなると、前述のごとく、流れ場は非対称になり、さらには時間的に変動するようになる。このようなレイノルズ数の流れは、流体力学的に見ても興味深い問題である。Lee の論文を引用して $Re = 100 - 250$ で流れは軸対称かつ定常であると述べたが、 $Re \geq 130$ で、ゆっくりと周期的に振動する弱い伴流が見られるという観測もあり (Lee の数値計算ではそのようなものは、見られなかった)、流れ場はレイノルズ数の関数として確定されていない。このような点も考えに入れて、3次元流のテスト計算を行ってきた。現実の流れの中には、小さな攪乱がありこれがもとになり、流れ場は乱され非対称な又非定常な流れとなる。しかしながら、対称な条件のもとで、ゆらぎのない流れ場の数値計算を始めても、実験で見られるような非対称で時間的に大きく変動する流れはなかなか生じない。そこで人為的に、ゆらぎを作ってやって非対称な、また時間的に変動する流れをつくる方法がある。Lee にしたがって、ある時刻に流れ場を (すなわち球を) x, y, z 方向に揺さぶってやり、計算を続けた。Fig. 3, 4 は $Re = 1000, M_\infty = 0.06$

の場合の異なる時刻における計算結果である。流れ場が非対称で、時間変動することがわかる。

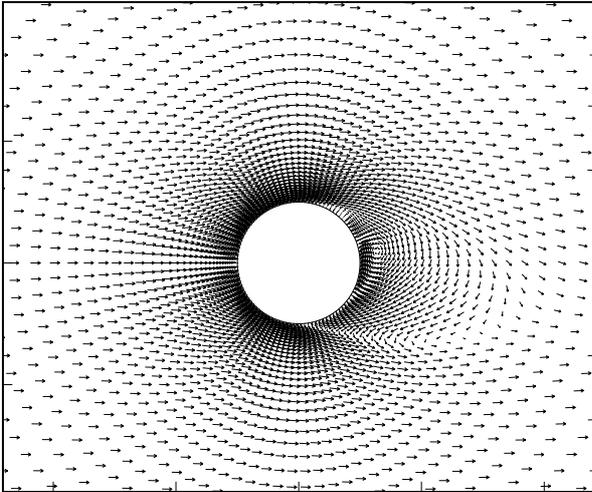


Fig.3 球のまわりの非定常流れ ($Re = 1000$)

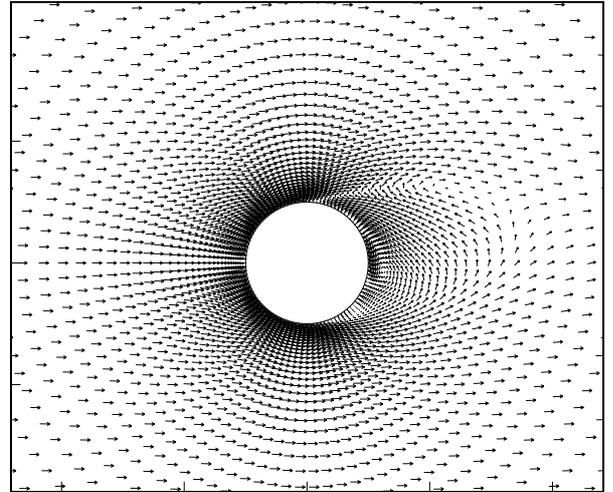


Fig.4 この図は Fig.3 と時刻が異なる

3次元計算は、天体物理学への応用にはいかなかったが、上述のような非対称な流れ、非定常な流れの数値計算は、十分注意して行うべきであることが分かった。流れ場において、非対称性の現れ方や時間変動のありさまは、座標系の取り方や解き方、揺さぶり方などに依存するようである。機会を見てさらに検討したいと思っている。

Wurm, G., J. Blum and J. E. Colwell, A new mechanism relevant to the formation of planetesimals in the solar nebula. *Icarus*, **151**, 318-321, 2001.

Lee, S., A numerical study of the unsteady wake behind a sphere in a uniform flow at moderate Reynolds numbers. *Computers & Fluids*, **29** 639-667, 2000.