

III - 1 7

高速変形下における粒状体のエネルギー散逸機構の考察

東 北 大 学 工 学 部 学 生 員 ○ 平 澤 賢 治
東 北 大 学 工 学 部 正 員 佐 武 正 雄
東 北 大 学 工 学 部 正 員 中 川 昌 美

1. ま え が き

数多くある材料物質の中でも、特に粒状体はその力学的特性に注目すべき点、そして未だ解明されていない点を多く残している。本文は粒子の集合体が高速変形下において示す流体的な性質を考察するものである。自然災害の一つである雪崩や土石流、そして様々な粒体の輸送の際のそれらの流動機構について粒状体をモデルとした研究が土木工学を含む各分野で進められている。以下は円盤粒子集合体の単純せん断流をコンピューターシミュレーションにより解析したものである。

2. 理 論 と 解 析 方 法

粒子は全て同一な円盤形状で均質、粗な表面を持つ非弾性体であるとし、二体衝突が運動量伝達のメカニズムとする。境界内部の粒子の運動エネルギーは衝突することで減少するが、その衝突の機構は次のようである。衝突直前の接触点における二体粒子の相対速度を $\underline{V}$ 、同様に衝突直後の相対速度を $\underline{V}'$ とし、衝突時に粒子1と粒子2の中心点を結んでできる単位ベクトルを $\underline{k}$ とする。衝突前後の相対速度の法線方向の成分の変化は反発係数 e をもって

$$(\underline{k} \cdot \underline{V}') = -e (\underline{k} \cdot \underline{V}) \quad (1)$$

となる。同様な表現で相対速度の接線方向の成分を

$$(\underline{k} \times \underline{V}') = -\beta (\underline{k} \times \underline{V}) \quad (2)$$

のように表し、 β はあらさ係数と言われ、-1から1まで取り得ると仮定されている。 $\beta = -1$ のときには衝突後も接線方向の成分が変化せず、1であるときには全く逆向きの成分となる。ここで取り扱う β は-1から0の範囲であり、これは衝突の際のすべりの度合により、成分は減少するが、その成分の方向は変わらないことを示している。この β は衝突によって一つの粒子が他方に及ぼす力の法線方向と接線方向の両成分をCoulombの摩擦法則で結びつけることによって摩擦係数 μ 、反発係数 e を含む式として求められており、 $\underline{k}$ と $\underline{V}$ のなす角度、衝突角 γ の関数として表現されている。¹⁾

$$\beta = -1 + \frac{(1+\kappa)\mu(1+e)}{\kappa} |\cot \gamma|, \quad \kappa = \frac{4I}{m\sigma^2} \quad (\text{図-1 参照}) \quad (3)$$

次にシミュレーションに用いたシステムは、水平に置かれた矩形の中の粒子群が上部境界の動きにより引き起こされたせん断変形により図-1のX方向に流動しているものとし、限られた計算時間でより現実的な流れを表現できるように左右の境界にはperiodic boundaryが仮想してある。これは一つの境界を粒子が抜けていくと反対側の境界から抜け出した時と同じ速度、同じ高さで入ってくるものであり、その境界内には常に同数の粒子があるようになっている。図-1に示す連続して並ぶ3つの境界がそのイメージであるが、そのうちの中央の一つが解析を行う境界内部である。境界内には40個の粒子が入り、この解析では密度は0.59である。粒子間、粒子一壁面間共に反発係数 $e=0.8$ 、摩擦係数 $\mu=0.5$ で各粒子が最低500回以上衝突を繰り返した後、深さ方向に10区分された領域の各領域内で各種のデータをとった。

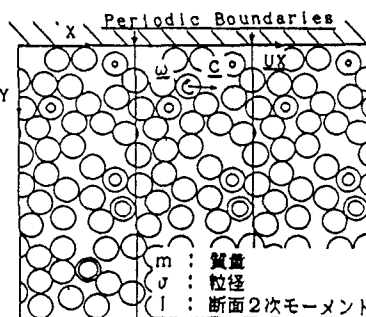


図-1 システムと粒子特性

3. 結果と考察

定常状態の典型的な粒子の流れを図-2(a)に示す。図-2(b),(c)は無次元化された密度分布と速度分布を示している。²⁾下部の境界近傍での速度が小さく、流れの中央部での密度が大きくなっているが、これは粒子の活性には回転が影響を及ぼしていると考えられ、その回転により粒子は下の境界に対してスリップを生じ、結果として図-2(c)に示す様に下壁面での速度は上壁面のその

30%程度になるものと思われる。又、速度分布の中央部はやや窪んでいて、そこでの密度は大きいことから局所的にplug flowのような状態であることが推測される。次に示す図-3(a)~(d)は区分された領域のうち、上から1,6,9,10番目の領域(図-2(c)参照)における衝突角と衝突回数との関係を示すグラフである。流れの中央部は密度が大きいため(b)の衝突回数は(a),(d)に比べて多い。(3)式において $\beta=0$ となる γ は 69.7° となり、それよりも小さな角度での衝突は全て $\beta=0$ とみなすが、(a),(d)では全衝突に対して、約60%の衝突が $\beta=0$ となるような衝突角での衝突であり、(b)においては約90%がそうである。このことから流れの中央部においては、衝突点における相対速度の接線方向の成分による運動エネルギーの散逸の大きい衝突が卓越しているのがわかる。その影響を前述の密度分布やplug flowは多少なりとも受けていると思われる。衝突角と衝突回数との関係について検討を重ね、さらに詳しいエネルギーの散逸の機構の考察を今後の課題としたい。最後に示す図-4は上記のシミュレーションを粒子と下壁面との間に摩擦がない場合で常に $\beta=-1$ となるような境界条件で行ったものである。密度は中央部まで粒子が堆積しているような分布であり、速度分布は下壁面近傍の速度が図-2(c)のものに比べ

大きくなっている。これは粒子間では衝突を繰り返して、その粒子群は塊のようになって境界面上を滑っていると考えることができ、境界条件の違う場合の比較参考として示したものであり、更に境界条件が流れに与える影響を考察する必要性のあることを示唆している。

- 《参考文献》 1) Nakagawa, M. KINETIC THEORY FOR PLANE FLOWS OF ROUGH, INELASTIC, CIRCULAR DISKS
2) C.S. Campbell Shear Flows of Granular Materials Report E200.7

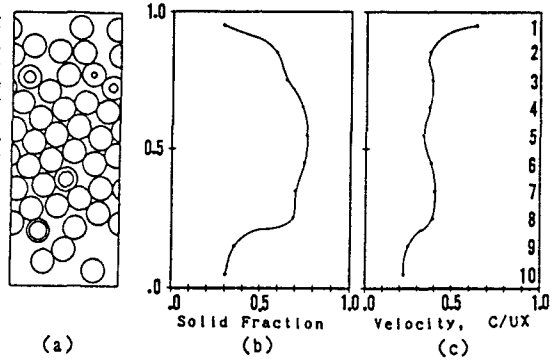


図-2 定常状態での粒子の密度分布と速度分布

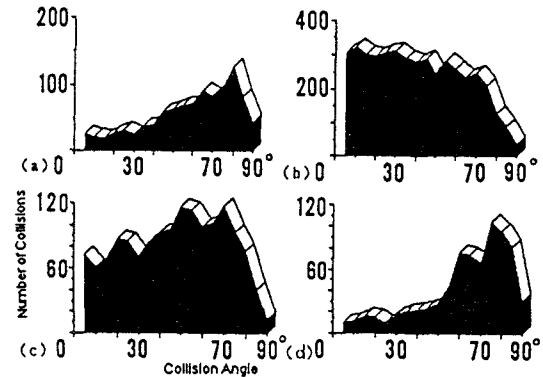


図-3 区分された領域毎での衝突角-衝突回数図

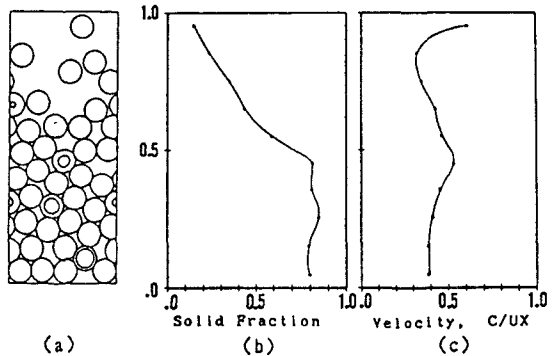


図-4 下壁面との間に摩擦がない時の密度分布と速度分布