

粒子法による剛体間の衝突応答に関する高精度化

岩手大学 学生会員 ○佐々木智, 砂川透吾, 正会員 小笠原敏記

1. はじめに

津波氾濫流に伴う漂流物は、家屋や漂流物同士の衝突を引き起こし、二次的な被害を及ぼすことが予想される。漂流物を剛体と見なした粒子法による数値解析が行われており、代表的な衝突応答の解析にペナルティ法が挙げられる(田中ら, 2007)。しかしながら、衝突時の粒子相互の軸の対称性がずれるような場合、正確な衝突応答を評価しているとは言えず、改善の余地が十分にあると言える。

そこで本研究では、粒子の集合体で表された剛体の衝突を計算する際、着目粒子と近傍粒子間の距離を用いるのではなく、着目粒子と近傍粒子が存在する面的な情報を利用し、反発力および摩擦力を評価する。理論値と計算結果を比較し、ペナルティ法よりも計算精度が向上する手法であることを明示する。

2. ペナルティ法の問題点

ペナルティ法は剛体間に若干のめり込み量を許し、その量に応じた反発力を加えるという手法である。この手法は計算コストが低く、多数の剛体衝突を計算することができる点が長所と言える。しかし、粒子で構成された剛体の衝突応答では、**図-1**に示すような粒子間の対称性および非対称性の衝突の場合、異なる衝突応答を引き起こす可能性がある。

そこで、粒子間距離 1cm で構成された密度

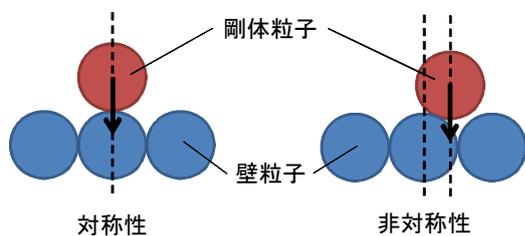


図-1 粒子の対称性と非対称性

$\rho=0.25\text{g/cm}^3$ の立方体 (${}^L6\times{}^H5\times{}^W6\text{cm}$) について、水平な壁面から高さ 10cm の位置で自由落下させたときの重心位置 z_{cg} の時間変化を示したものが**図-2**である。図中の実線(赤色)は理論値、破線(青色)および

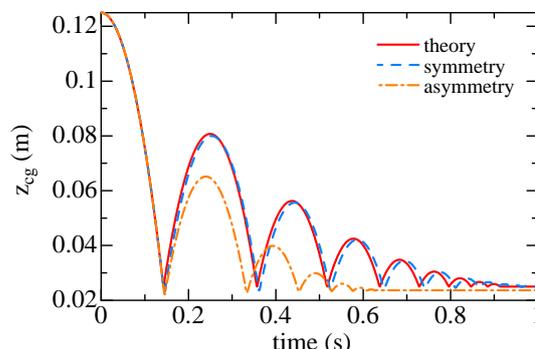


図-2 衝突時の粒子の対称性と非対称性による計算結果と理論値の比較

表-1 非対称性における衝突前後の衝突力

Time (s)	n_x	n_y	n_z	F_x	F_y	F_z
	(-)			(N)		
0.137	-0.27	0.00	-0.96	0.24	0.00	0.97
0.138	-0.31	0.00	-0.95	0.50	0.00	1.53
0.139	-0.35	0.00	-0.94	0.21	0.00	0.56

び一点破線(橙色)は、剛体粒子と壁面粒子が対称性か非対称性の違いによる衝突時の結果を示す。なお、反発係数は $e=0.75$ とする。対称性の衝突応答では、理論値と概ね一致しているが、非対称性では、理論値と大きな差異が生じていることが確認できる。

このときの壁面衝突時の剛体粒子が持つ単位法線ベクトルおよび各成分の反発力を示したものが**表-1**である。剛体粒子(着目粒子)と壁面粒子(対象粒子)は正面弾性衝突であるため、鉛直方向の反発力 F_z のみ発生するはずであるが、粒子の非対称性により鉛直方向以外の反発力が発生している。着目粒子の進行方向の軸上に対象粒子の中心が一致していないことにより、相対位置ベクトルのズレが発生し、水平方向の単位法線ベクトル n_x が計算されるためと考えられる。

3. 衝突計算手法の改良

ここでは、壁面を粒子として扱うのではなく、面的な境界条件として与え、次式を用いて衝突後の重心速度 V' および重心角速度 ω' を評価している。

キーワード 粒子法, 剛体運動, 衝突計算

岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学工学部社会環境工学科・019-621-6448・019-652-6048

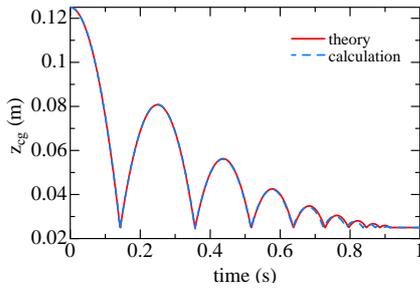


図-3 図-2 の計算条件で本計算手法を導入した計算結果と理論値の重心位置の比較

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V} + \frac{\mathbf{n}J}{M} \quad \dots(1)$$

$$\boldsymbol{\omega}' = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{I}^{-1}(\mathbf{r} \times \mathbf{n})J \quad \dots(2)$$

ここで、 \mathbf{V} および $\boldsymbol{\omega}$ は衝突前の重心速度および重心角速度、 M は剛体の質量、 \mathbf{n} は壁面の単位法線ベクトル、 \mathbf{r} は重心から衝突点までの相対位置ベクトル、 \mathbf{I}^{-1} は慣性テンソルの逆行列である。さらに、力積 J は次式で表される。

$$J = \frac{-(e+1)\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_p}{\frac{1}{M} + \mathbf{n} \cdot \{(\mathbf{I}^{-1}(\mathbf{r} \times \mathbf{n})) \times \mathbf{r}\}} \quad \dots(3)$$

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad \dots(4)$$

ここで、 e は反発係数、 \mathbf{v}_p は衝突点の速度である。

図-3 は、上述の計算手法を導入した結果であり、図-2 に示した計算条件下での重心位置 z_{cg} の時間変化の理論値との比較を示す。計算結果は、繰り返しの衝突過程において理論値と良く一致しており、ペナルティ法で見られた最高到達点の過小評価が解消され、衝突応答時の高精度化がなされたと言える。

4. 摩擦力の導入

物体の衝突時には、摩擦力も発生するため、式(1)および(2)に動摩擦係数 μ を考慮する。なお、臨界摩擦係数 $\mu_{cr} \leq \mu$ のとき、 $\mu = \mu_{cr}$ とし、臨界摩擦係数 μ_{cr} は次式を用いる。

$$\mu_{cr} = \left| \frac{b}{J} \right| \quad \dots(5)$$

$$b = \frac{\mathbf{t} \cdot \mathbf{v}_p}{\frac{1}{M} + \mathbf{t} \cdot \{(\mathbf{I}^{-1}(\mathbf{r} \times \mathbf{t})) \times \mathbf{r}\}} \quad \dots(6)$$

ここで、 \mathbf{t} は壁面の単位接線ベクトルである。

粒子間距離 1cm で構成された立方体 ($\rho = 0.25\text{g/cm}^3$, $L_6 \times H_5 \times W_6\text{cm}$) に、初速度 1.0m/s となるように水

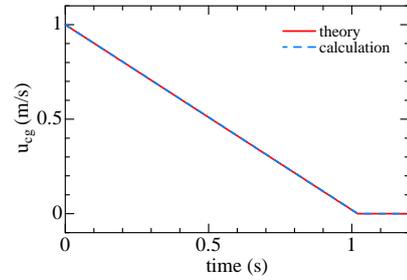
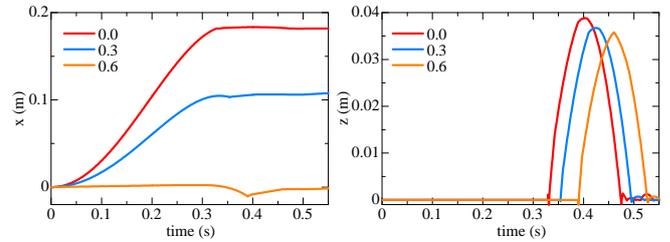


図-4 重心速度の計算結果と理論値の比較



(a) 水平位置

(b) 鉛直位置

図-5 異なる動摩擦係数での物体右端の位置の時間変化

平方方向の外力を与えたときの重心の水平速度 u_{cg} を図-4 に示す。 u_{cg} の値は、理論値と良く一致しており、時間に伴い摩擦力を受けて単調減少となり、最終的に静止することが確認できる。さらに、反発力と摩擦力が同時に発生するような場を再現するため、材質を松の角材を想定した物体 ($\rho = 0.52\text{g/cm}^3$, $L_{100} \times H_{10} \times W_{10}\text{cm}$) を水平面と 45 度のなす角で、右端を接触させ、斜めの状態から左端を放して自由落下させるような計算を行う。動摩擦係数 $\mu = 0.0, 0.3, 0.6$ の 3 種類に変化させた結果が図-5 であり、物体右端の水平および鉛直位置の時間変化を示す。なお、反発係数は $e = 0.4$ とする。水平面と接触しながら重力の作用により落下するが、 $\mu = 0.0$ の場合、摩擦力が発生しないため、水平方向に滑りながら移動する。一方、 $\mu = 0.6$ の場合、摩擦力の作用が強いため、ほとんど滑らない運動となる。従って、 μ の値の増加に伴い、接触点の水平移動距離が小さくなる。さらに、鉛直位置の変化では、壁面との衝突による跳ね上がりの軌跡が見られるが、摩擦力に依らず、同様な最高到達点となる。以上より、摩擦力および反発力を考慮した高精度な剛体衝突応答解析が可能と言える。

参考文献

田中正幸, 酒井幹夫, 越塚誠一: 粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成, 日本計算工学会論文集, Vol. 2007, 2007.