1. はじめに

津波は大きな掃流力を有しているため、砂浜を遡上する際、 海底の土砂を大量に巻き上げながら土砂と海水の混ざり合っ た流れ場を形成する.さらに、土砂を含んだ津波が構造物や 農作物への二次的被害の拡大に繋がる可能性もあり得る.こ のような固-液混層流場の遡上過程を現地で観測することや 実験で再現することは困難であり、その現象の特性について は、未解明な部分が多いものと考えられる.

そこで本研究では、固-液混層流場を任意に設定すること が可能であり、ダイナミックな自由表面の運動を表すことが できる粒子法を用いた数値シミュレーションの開発を試みる. そして、津波の段波を水柱の崩壊と見なし、その水柱の水と 砂の混合率を変化させて、斜面を遡上する流量の比較を行う. 特に、水柱の流量や砂含有率と越流量の関係を検討する.

2. 数値計算手法の概要および精度検証

粒子法はKoshizuka (1995) らによって提案された手法であり、支配方程式は次式の連続式とN-S方程式である.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + v\nabla^2 \vec{u} + \vec{g}$$
⁽²⁾

ここで、D/Dtはラグランジュ微分、 ρ は流体の密度、 \vec{u} は流速 ベクトル、pは圧力、vは動粘性係数、 \vec{g} は外力を示す。粒子 法では、支配方程式の離散化に次式に示すような勾配および ラプラシアンモデルによる粒子間相互作用モデルを用いる。 このモデルの特徴として、計算点間のつながりを考慮する必 要がないため、格子の変形や再配置の最適化と言ったラグラ ンジュタイプ格子の問題による計算の破綻とは無縁である。

$$\nabla \phi_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{r_{ij}^2} \left(\vec{r}_j - \vec{r}_i \right) w(r_{ij}) \tag{3}$$

$$\nabla^2 \phi_i = \frac{2d}{\lambda_i} \sum_{j \neq i} (\phi_j - \phi_i) w(r_{ij})$$
⁽⁴⁾

ここで、dは計算空間の次元数、 n^{0} は初期粒子数密度、 ϕ は点iでの物理量、 r_{ij} は粒子iとj間の距離である。また、ラプラシアンモデルの λ は式(4)が拡散方程式を満たすための定数である。また、wは粒子距離が影響半径 r_{e} を超えた場合ゼロになる重み

岩手大学	学生会員	○菊地 重	重友
岩手大学	学生会員	佐々木	信也
岩手大学	正会員	小笠原	敏記
岩手大学	正会員	堺 茂橋	1 1

関数であり、次のように表わされる.

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (0 \le r \le r_e) \\ 0 & (r_e \le r) \end{cases}$$
(5)

粒子法のアルゴリズムはMAC法とよく似ており,速度-圧 力で修正を繰り返しながら時間発展を行う. 圧力のポアソン 方程式は,式(4)で離散化を行うと係数行列が疎行列になる連 立一次方程式を構成する. この方程式をICCG法による反復法 を用いて圧力を求める.

本プログラムの精度検証には、自由表面流れの解析におい て代表的なベンチマーク問題である水柱の崩壊の問題を用い た.図-1は、崩れた流体の底面における先端位置の変化を実験 値(Martin・Moyceおよび玉古)と比較したものである.なお、 流体と壁面の間には、non-slip条件を適用させた.計算値は、 実験値よりやや速くなっているが、濡れ性による先端形状の 違いによるものであることから、良好な結果を示しているも のと言える.



図-1 水柱の崩壊による流体の先端位置の変化における実験と計 算の比較

3. 固一液混層流場の計算

ここでは、水柱中の砂含有率yを変化させたとき、斜面を遡 上する流量について検討を行う.図-2は、解析に用いた計算領 域であり、1/10勾配の斜面と遡上した流量を求めるための貯水 域を設置した.斜面を設置した際、壁に相当する粒子間距離



図-2 計算領域

が大きくなることにより、粒子が漏れる現象が生じるため、 図-2の拡大図に示すように圧力を計算する層を二層とした.計 算領域の左端に水柱を設置し、その幅Bを0.4mで一定、高さHを5cm間隔で5cmから20cmまでの4種類とした.さらに、初期 の砂含有率yを10%間隔で0%から50%までの6種類とし、乱数 を用いてランダムに砂を配置した.粒子の総数は800~3,200 個となった.なお、本研究では、水と砂の違いを密度のみと し、水の密度 ρ_w を1,000kg/m³、砂の密度 ρ_s を2,650 kg/m³とした.

図・3は、水柱崩壊後の流体が斜面を遡上する過程について、 砂含有率y=0%および30%の空間波形を示したものである.砂 の含有率に依らず、斜面を遡上する流体の先端位置や貯水域 に放出される様子に大きな差異は見られない.ただし、貯水 域では、砂粒子が壁面上に堆積し、水粒子がその上に貯まる 様子が見られた.次に、砂含有率yと遡上後の貯水域へ放出さ れた単位幅当たりの流量qの関係を図-4に示す.流量は、砂含 有率に依らず、ほぼ一様であり、水柱の高さに伴って大きく なることわかる.次に、図-5は水柱の砂含有率yと遡上後の貯 水域へ放出された流量qに対する砂含有率y'の関係を示したも のである.水柱の初期条件にかかわらず、yの増加に伴いy'も 増加し、単調比例の傾向を示す.

以上より,砂を含んだ水柱の崩壊による斜面の遡上過程に おいて,砂の含有率の影響がほとんど見られない結果となっ た.しかし,本研究では、粒子の密度差による検討のみであ ったため、粒子径や水と砂との摩擦抵抗などの検討を行う必 要がある.

謝辞:本研究は科学研究費(若手研究(B)19710153)の補助を受けて行われたものである.ここに記し,深謝の意を表します.

参考文献

S.Koshizuka, H.Tamako, and Y.Oka: A Particle Method for Incompressible Viscous Flow with Fluid Fragmentation, Comput.Fluid Dynamics J., 4, 29-46, 1995.

Martin, J.C. and Moyce, W. J.:An Experimental Study of the Collapse Liquid Columns on a Rigid Horizontal Plane, Philios. Trans. R. Soc. London SerA., 244, 321-324, 1952.

玉古博朗:界面の分裂飛散を伴う流れの解析のための粒子法の開発, 東京大学修士論文, 1994.



図-3 水柱崩壊後の斜面を遡上する過程 (上段:p=0%,下段:p=30%)



図-4 砂含有率 y と遡上後の流量 q/q の関係



図-5 水柱の砂含有率ッと遡上後の砂含有比パの関係