

土木分野における粒子法の適用性について

解析事業部 解析情報部 塚 宣晴
齊藤 憲一郎
田村 善昭

1. はじめに

粒子法はメッシュ分割すること無しに、連続体の運動を有限の数の粒子の運動として解析する手法である。粒子法は近年、3次元の連続体の解析において適用範囲を広げており、注目を集めている手法である。

粒子法の歴史は比較的新しく、最初の粒子法としてPAF (Particle-and-Force) 法が1965年米国ロスアラモス国立研究所で提案されている²⁾。その後、移流項を粒子とし他の項を格子によって解くPIC (Particle In Cell) 法や、界面形状をとらえるためだけに流体のトレーサとして粒子を用いたMAC (Marker and Cell) 法が提案された。

また、宇宙物理学では真空のような低密度から星の内部のような高密度まで圧縮性のある流れ場を扱うため、新しい粒子法として SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法が 1977 年に提案された。

最近では非圧縮性流れの計算アルゴリズムを導入した MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法が、1995 年に提案されている。MPS 法は粒子間相互作用モデルを適用することにより微分方程式の離散化を行っている。¹⁾²⁾

粒子法はラグランジュ法である。オイラー法である差分法や有限要素法では、観測者(計算点)が空間に固定されているのに対し、粒子法は、連続

体に観測者が乗っていて、連続体の移動と共に観測者も移動することとなり、連続体を構成する粒子各々の運動を独立して見ることができる。

また、粒子間の距離がある距離より離れると相互間作用が無くなるとすることで、流体の分裂や合体、構造物の破壊など複雑に変化する境界面を伴う問題に適用することが容易である。

さらに、差分法や有限要素法では、計算メッシュを流体や構造物の形状にあわせて作成しなければならないが、粒子法では計算メッシュ自体が必要ないため、煩雑なメッシュ作成作業が無いことも利点である。

これまでに、界面の大変形を伴う砕波や、相変化を伴う沸騰、蒸気爆発などの現象を扱う数値解析に成功している。さらに、構造物の破壊等の変形や破壊を伴う固体力学、流体と構造物が相互に作用し合う現象を取り扱った流体-構造連成問題にも適用されている。²⁾³⁾

本稿では粒子法の土木分野への適用性について検討を行った。

2. 粒子法の結果例

ここでは、様々な粒子法の中でも越塚らが提案している MPS 法による非圧縮性流れの解析結果例を示す。

MPS 法の特徴は、発散、勾配、回転、ラプラシ

アン等の微分演算子に対してそれぞれ粒子間相互作用モデルを用意し、これらを用いて微分方程式を離散化したことにある。これらの詳細は MPS 法の創始者である越塚等の文献に詳しい。¹⁾²⁾⁴⁾

さて、結果例であるが、粒子法の計算のベンチマーク問題としては、水柱崩壊、単一気泡の上昇、スロッシング等がある。

ベンチマーク問題とは、検証用に標準的に解かれる問題であり、多くの研究者が様々な計算コードにより解いていて、正解がわかっている問題である。

ここでは、水柱崩壊の計算例を示す。

水柱崩壊は大変形のある流体解析として代表的な問題である。粒子法はメッシュ分割を用いないので、このような大きく変形する流体の計算に適用できる。この結果を見ると、まず水が側方に流動(0.08sec)し、砕波しながら斜面を駆け上がっている(0.16～0.24sec)。やがて側壁に衝突し(0.32sec)、飛沫が飛び散る状況(0.40sec)が計算できている。

計算は流体粒子 600 個、境界粒子 500 個程度であり、粒子径は 8mm、左右の壁間は 880mm である。計算時間は PentiumIV の PC で 5 分程度である。

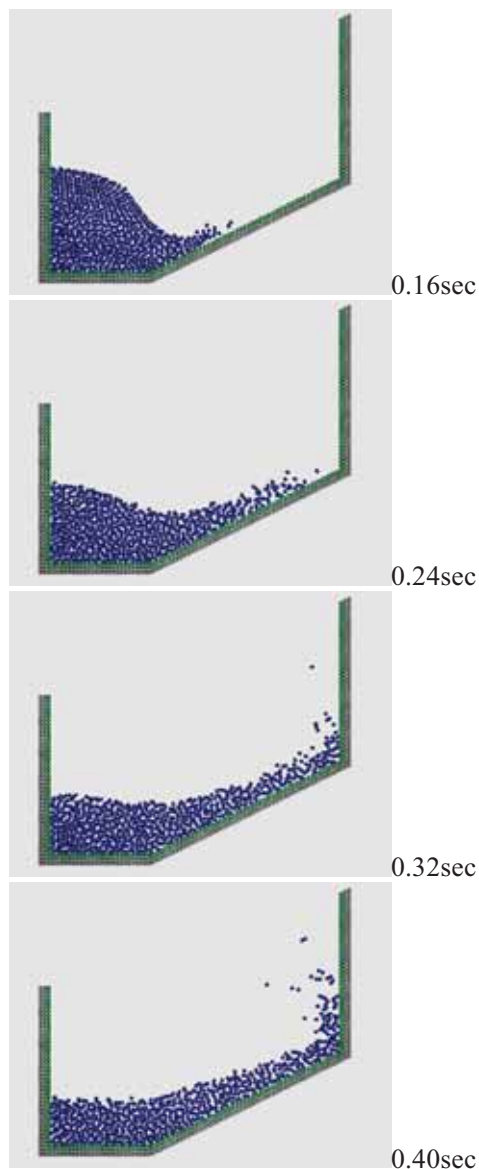
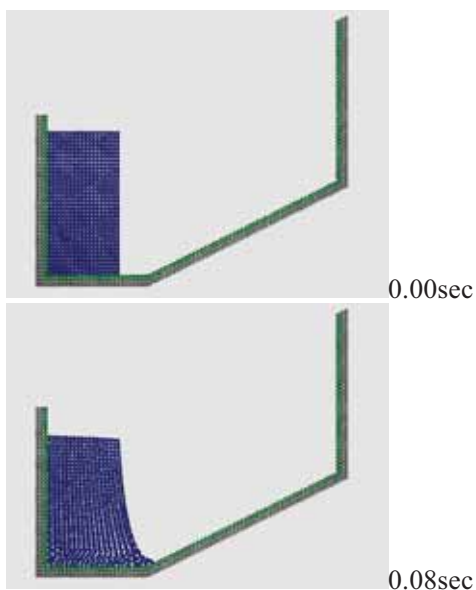


図 2.1: MPS 法による計算例



次に示すのは水中に土砂が流入する状況を模した計算である。粒子法では粒子の物性値(密度)を変更することにより、簡単に複数流体の共存する流れを計算することができる。

計算は流体(水)粒子 300 個、流体(土砂)粒子 120 個、境界粒子 700 個程度であり、粒子径は 8mm、斜面の傾斜 10 度である。計算時間は PentiumIV の PC で 5 分程度である。

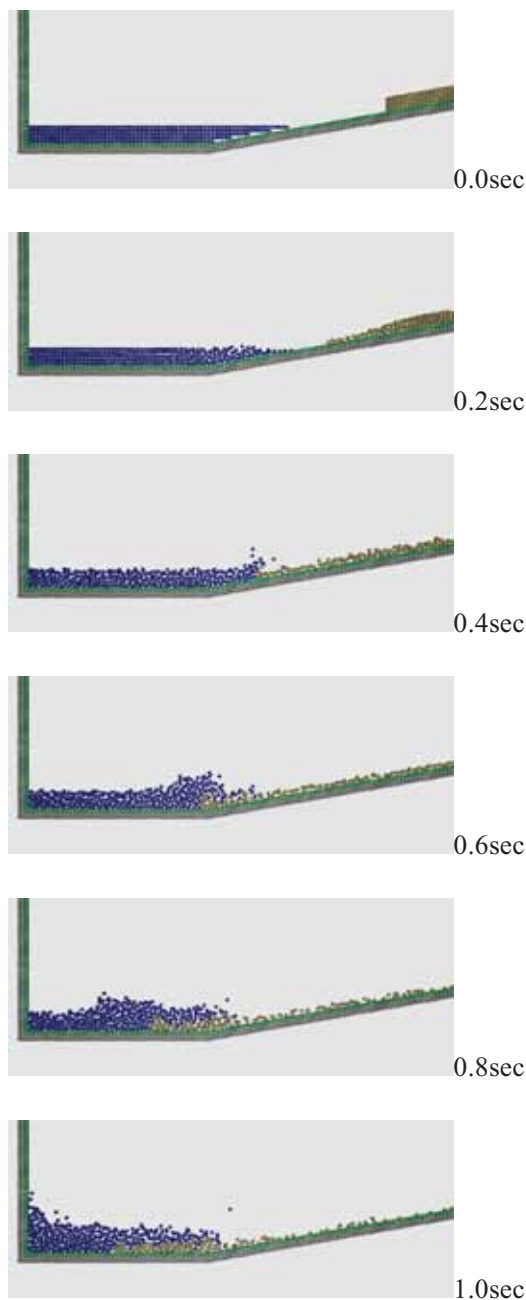


図 2.2: MPS 法による計算例

土砂粒子が水面に到達すると、水粒子が跳ね上げられる(0.4sec)。その下を土砂粒子が流入し、水面を押し上げる(0.6sec)。左向きに波が発生し、土砂はさらに左側に浸入していく(0.8sec)。土砂は底面にほぼ水平に堆積し、その上に水が乗った状態となる(1.0sec)。

3. 土木分野へ適用について

3.1 粒子法の特徴と土木分野での適用性

土木分野における粒子法の適用性を次表に示す利点を前提とし、粒子法が得意とする流体解析において予測精度向上やこれまで不可能であった表現および問題点等に着目し、考察をおこなった。本稿では、土木分野の中でも、防災に係る津波・高潮シミュレーション、河川の洪水流・河床変動計算、外水はん濫シミュレーションを取り上げる。

粒子法の特徴からみた利点

- ラグランジュ法である
 - ・ 界面の大変形を扱うことが容易である。
 - ・ 水面から飛び出した飛沫や水塊の分裂・合体の計算ができる。
 - ・ 3次元化が容易である。(粒子距離の計算に第3番目の次元を追加すればよい)
- 格子(メッシュ)を必要としない
 - ・ 複雑な3次元物体の表現が容易。
 - ・ 煩雑な格子生成作業を必要としない。
 - ・ 大変形によるメッシュの破綻がない。
 - ・ 移動境界問題への適用性に優れている。

まず、津波・高潮のシミュレーションには、粒子法のメッシュを必要としない利点により、堤防、ビル、民家等の構造物を含めた詳細な地形による津波・高潮の精度の高い浸水予測計算が可能であろうと考えられ、また、飛沫や水塊の分裂・合体が計算可能であるので、高潮の予測と同時に高潮時の堤防からの越波の予測が可能であると考えられる。

次に河川の洪水流・河床変動計算には、メッシュレスの利点が、複雑な河道形状の表現に有効であろうし、洪水時に卓越する河川の3次元流れ(螺旋流)も、粒子法の3次元化の利点を持つてすれば、比較的容易に表現可能であろうと考えられる。更に、3次元流れが卓越した結果生じる橋脚等の

構造物周りの局所的な深掘れ等の河床変動も比較的容易に精度よく表現することが期待される。

外水はん濫シミュレーションはマニュアル⁵⁾にあるように河川を1次元不定流、はん濫原を2次元不定流で扱いこれらを連動させて計算を行うが、はん濫原には、津波・高潮のシミュレーションと同様、格子を必要としない利点により、詳細な地形を用いた浸水予測の精度向上が期待され、また、河川には流れの3次元化による精度の高い水位計算とメッシュレスによるリアルな堤防モデルにより、より実際の溢水、越水および破堤によるはん濫現象を表現できる可能性がある。

このように粒子法によるメリットを列挙したが、必ずしも万能では無く、問題も存在する。

実際、津波・高潮シミュレーションのように、陸地から、はるか沖合に起きた現象を扱うといった、解析対象とする空間が巨大な場合には、それ相応の粒子数が必要となり、必ずしも粒子法のみで解析するのが効率的であるとは言えない。

例えば、粒子法の手法であるMPS法で2次元の計算を行う場合、計算対象となる近傍粒子の数が有限体積法の隣接格子の2~10倍となり、この分計算時間を要することとなる。

このような問題の回避方法として、津波のシミュレーションの場合は、沖合の計算には従来のオイラー系の解析法を用い、津波の遡上に係る領域のみに粒子法を用いるハイブリットな手法が考えられている。

これらは、河川洪水流、外水はん濫についても同様であり、解析対象が大きくなれば、状況に応じて従来のオイラー系解析方法を併用することが賢明であると考えられる。

これらのことから、マクロ的検討には従来のオイラー系解析手法を用い、ミクロ的な詳細検討にはラグランジュ手法である粒子法を用いるといった、使い分けを行なうことが賢明であると考えられる。

4. おわりに

粒子法は、比較的新しい解析手法であり、現在様々な分野への適用が研究されているところである。土木、造船、自動車、機械、原子力等の各分野の数値解析で幅広く適用が試みられ、成果が上がっている。

この中でも本稿で考察した土木分野の津波・高潮、河川流、外水はん濫等では、これまでの解析手法で表現できなかった結果が得られる可能性があることがわかった。

今後は、粒子法を用い、外水はん濫シミュレーションを中心として、洪水流の水位計算精度向上、および、堤防・ビル・民家等の構造物を含めた詳細な地形による浸水深計算の精度検討等を順次実施して行く所存である。

引用文献

- 1) 越塚誠一:粒子法(丸善、2005)
- 2) 越塚誠一:“粒子法による流れの数値解析”、ながれ 21(2002),230-239
- 3) 越塚誠一:“粒子法によるマルチフィジクスシミュレータ”、(独)科学技術振興機構、平成18年度戦略的創造研究推進事業チーム型研究 CREST 研究年報
- 4) 後藤仁志:数値流砂水理学(森北出版、2004)
- 5) 土木研究所資料:汎濫シミュレーション・マニュアル(案)平成8年2月 建設省土木研究所 河川部都市河川研究室