W01-(4)

粒子法による3次元シミュレーション

Three-dimensional Simulation Using Particle Methods

○正 越塚 誠一 (東大)

Seiichi KOSHIZUKA

The University of Tokyo, 2-22 Shirane, Shirakata, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1106

Key Words: Particle Method, Three Dimensions, SPH, MPS

1. はじめに

空間をメッシュ分割する必要のない計算手法群をメッシュレス法と総称すると、その中で粒子法は物体の移動と粒子の移動が一致している完全ラグランジアンの方法を指す。メッシュレス法の中には計算点が空間に固定されているオイレリアンの手法や、粒子法と組合せた任意ラグランジアン-オイレリアン(ALE)の手法もある。分子動力学やDSMCなど、分子運動のシミュレーション手法はここでは対象にしないことにする。ただしこうしたミクロな手法でも、統計的に十分な数の粒子を用いて連続体のシミュレーションをおこなう方法が研究されている。

粒子法の利点は、他のメッシュレス法と同様に煩雑なメッシュ生成の必要が無いことに加えて、界面の大変形や連続体の分裂・合体が容易に扱えることである。これは、完全ラグランジアン-オイリアンの利点を、メッシュ生成という制約を受けずに発揮できることによる。

本論文では、粒子法の手法に関する研究および粒子法を用いた解析の現状について概説する。粒子法は流体と構造のどちらの分野でも研究され、互いに影響を与えているので、ここではまとめて扱う。さらに、3次元シミュレーションの例を著者らのものを中心に紹介する。

2. 粒子法の研究の現状

最初の粒子法は流体解析のためのParticle-and-Force (PAF)であろう[1]。その後、主に天体物理への適用を目的とした圧縮性流れの解析手法であるSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH)が開発された[2]。SPHはMonaghanらによって大いに発展し[3]、一般的な圧縮性流れ[4]、非圧縮性流れ[5]、構造の解析[6]にも用いられるようになった。SPHでは粒子が持つ物理量をカーネル関数によって空間中に広げ、その重ね合わせとして物理量分布を導く。SPHで用いられている人口粘性のテクニックはPAFに由来している。また、流体の圧力項に対しては、やや特殊な変形を施す。

越塚は非圧縮性流れの解析のための粒子法としてMoving Particle Semi-implicit (MPS)法を提案した[7,8]。MPSでは、勾配やラプラシアンといった微分演算子に対して、等価な粒子間相互作用モデルをそれぞれ用意している。これらのモデルを用いて、連続体の微分方程式を粒子の運動方程式に変換する。MPSは弾性体の運動方程式にも適用され、大変形を伴う構造解析がおこなわれた[9]。

粒子法に属さないメッシュレス法には、最小二乗法を利用するElement-Free Galerkin (EFG)法[10]、局所一時メッシュを用いるFree Mesh法[11]、Cubic Interpolation with

Volume/Area Coordinate (CIVA) [12,13]、Meshless Advection Using Flow-directional Local Grid (MAFL)[14,15]がある。CIVAとMAFLでは任意ラグランジアン-オイレリアン(ALE)の流体解析が可能である。

ところで、SPHでは圧力項に特殊な変形を施すことが特徴であるが、犬塚はこの変形によってハミルトンの原理に従う粒子の運動方程式が得られることを示した[16]。これは、SPHがMPSと同様に粒子間相互作用としても記述できることを意味している。一方、田中は非圧縮性流れにハミルトンの原理を適用した粒子法を提案した[17]。さらに越塚らは構造解析のためのMPSとして、正準方程式に従うモデルを提案した[18]。正準方程式で記述できるということは、その粒子法が仮想仕事の原理に従うことを意味する。また、構造解析のためのMPSでは、粒子同士が垂直方向と回転方向のバネで互いにつながっているというモデルになっており、粉体の粒子法であるDistinct Element Method (DEM) [19]とも良く似ている。

粒子法の応用に関しては、流体解析の分野では海岸工学が挙げられる。海岸での碎波や越波は海岸構造物の設計上重要な現象であるが、従来の差分法などでは解析が難しく、粒子法が適用されている[20,21]。また、原子力工学に関連して、気液二相流[22]や沸騰の詳細解析[23]、苛酷事故の詳細解析[24,25]にも適用されている。こうした多相・多成分の熱流動解析では、これまでの差分法などでは移流項の離散化に伴う数値拡散が大きな問題であったが、粒子法ではこの問題が生じない。

構造解析では、主に衝突による大変形や破壊の問題に粒子法が適用されている[6,26,27]。さらにMPSを用いて静的な弾性問題の解析手法も開発され[28]、流体と構造を同時にMPSで計算することもおこなわれている[29]。

粒子法では初期の粒子配置が従来の手法のメッシュ生成に対応する。こうした粒子配置の方法に関する研究も発表されている[30]。

3. 粒子法による3次元シミュレーション

粒子法では、SPHでもMPSでも、粒子間距離の関数として粒子間相互作用が記述されている。そのため、2次元と3次元でコーディングに殆ど違いがない。従って、粒子法ではこれまで多くの3次元計算がおこなわれてきた。

MPS法による3次元の流体解析と流体-構造相互作用の計算例をそれぞれ図1と2に示す。図1は、フロリナート(比重1.88)のプールに水ジェットを貫入させており、日本原子力研究所でおこなわれた可視化実験を解析したものである[31]。ジェットの衝突により、プールにポケット状

の孔が生じており、これは実験でも観測されている。また、ジェットの潜り込み深さについても実験と定量的に良く一致している。

図2は円筒水槽内の液面振動を解析したものである[32]。直線上の往復運動として強制振動を与えているにもかかわらず、時間が経過すると液面振動は回転するようになり、これに合わせて円筒水槽も大きく変形している。なお、この計算では水槽壁を薄肉弾性体として粒子法を適用し、流体との相互作用は圧力を介して陽的に計算している。

MPSの3次元解析は他にも、円管内の気液二相流解析[22]、ナトリウム漏洩燃焼事故解析[33]がおこなわれている。

SPHによる3次元構造解析では、固体同士の衝突による大変形の解析がおこなわれている[6,26,27]。こうした解析では弾性だけでなく塑性も扱われている。

4. おわりに

粒子法は現在急速に発展しており、従来の手法では解けないような大変形問題や、分裂・合体を伴う問題を扱うことができる。また、流体と構造に関する様々な応用も進んでいる。

参考文献

- [1] B.J. Daly et al., LA-3144 (1965)
- [2] L.B. Lucy, Astron. J. **82**, 1013 (1977)
- [3] J.J. Monaghan, Comput. Phys. Comm. **48**, 89 (1988)
- [4] J.J. Monaghan and R.A. Gingold, J. Comput. Phys. **52**, 374 (1983)
- [5] S.J. Cummins and M.J. Rudman, FEDSM'98-4923 (1998)
- [6] L.D. Libersky et al., J. Comput. Phys. **109**, 67 (1993)
- [7] S. Koshizuka et al., Comput. Fluid Dynamics J. **4**, 29 (1995)
- [8] S. Koshizuka and Y. Oka, Nucl. Sci. Eng. **123**, 421 (1996)
- [9] 越塚誠一ら, 計算工学講演会論文集 **4**, 1999, p.33
- [10] B. Nayroles et al., Comput. Mech. **10**, 307 (1992)
- [11] G. Yagawa and T. Yamada, Comput. Mech. **18**, 383 (1996)
- [12] N. Tanaka, Comput. Fluid Dynamics J. **8**, 121 (1999)
- [13] 田中伸厚, 機論(B) **65**, 25 (1999)
- [14] H.Y. Yoon et al., Int. J. Numer. Methods in Fluids **30**, 407 (1999)
- [15] H.Y. Yoon et al., Nucl. Sci. Eng. **133**, 192 (1999)
- [16] A. Inutsuka, Numerical Astrophysics, p.367, Kluwer Academic Publishers (1999)
- [17] 田中伸厚, 日本機械学会年次大会講演会論文集 (1999)
- [18] 越塚誠一, 岡芳明, 日本機械学会第12回計算力学講演会論文集, 1999, p.725
- [19] P.A. Cundall and O.D.L. Strach, Géotechnique **29**, 47 (1979)
- [20] S. Koshizuka et al., Int. J. Numer. Meth. Fluids **26**, 751 (1998)
- [21] 後藤仁志ら, 海岸工学論文集 **46**, 46 (1999)
- [22] N. Shirakawa et al., ICONE-7278, 1999
- [23] H.Y. Yoon et al., Int. J. Multiphase Flow (to be published)
- [24] S. Koshizuka et al., Nucl. Eng. Des. **189**, 423 (1999)
- [25] S. Koshizuka et al., SARJ-99, 1999
- [26] 酒井諒, UTNL-R-0392, 2000, p.80
- [27] 赤星保浩, 渡辺大剛, 第42回構造強度に関する講演会論文集, 2000
- [28] 近澤佳隆ら, 計算工学講演会論文集 **4**, 1999, p.37
- [29] 近澤佳隆ら, 第12回計算力学講演会論文集, 1999, p.723
- [30] 永野勝尋, 村上弘幸, 第12回計算力学講演会論文集, 1999, p.243
- [31] H. Ikeda et al., ICONE-7113, 1999
- [32] 近澤佳隆ら, 第11回計算流体シンボ講演論文集, 2000
- [33] M. Iida, ICONE-7202, 1999

図1 水ジェットの貫入の3次元シミュレーション

図2 円筒水槽内の液面振動と水槽壁変形の3次元シミュレーション