

渦粘性を考慮した安定化 ISPH 法による流体力評価の精度検証

九州大学大学院	学生会員	○	藤本	啓介
九州大学大学院	正会員		浅井	光輝
九州大学大学院	正会員		園田	佳巨

1. はじめに

世界各地で相次ぐ震災時の津波被害、あるいは地球温暖化に伴い甚大化する高潮・暴波浪などの水害から沿岸地域を守るための防災・減災技術が再検討されている。安全・安心な沿岸地域を形成するには、想定される巨大な津波、高潮・暴波浪などに対し、十分な強度を確保した安全な防潮堤の設計法の確立が求められる。本研究では、沿岸構造物の設計援用を目的とした新規の流体-構造連成シミュレータの開発を進めている。流体解析にはメッシュフリー解析法の一つである SPH 法、構造解析には大変形解析までを対応可能な非線形有限要素法を採用したことが開発シミュレータの特徴である。本報告では特に流体力評価の精度について議論する。

2. 解析手法の概要

SPH 法による流体解析ではメッシュがないことにより碎波・飛沫などを伴う激しい流体挙動の表現をも可能にする一方、圧力評価に対しては不自然な数値振動が発現する等の問題が残されていた。本研究では、非圧縮性流体解析用に開発された Incompressible SPH (ISPH) 法の改良法を提案し、流体力評価の精度向上を試みた。

(1) 安定化 ISPH 法 (改良法)

非圧縮性流体における支配方程式は次式に示す Navier-Stokes 方程式と質量保存式である.

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho^0} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1), \quad \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

ISPH 法の特徴は射影法を用いることで，粒子離散化した Navier-Stokes 方程式の未知量となる速度場と圧力場を分離し，圧力のみを陰的に求める．計算フローをまとめて図 - 1 に示す．ここで圧力については非圧縮性の仮定による質量保存則(2)から導出される圧力ポアソン方程式を用いて評価する．

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle \quad (3)$$

SPH 法では, 評価粒子の物理量を影響半径内の近傍粒子物理量の重みつき平均として補間するため, 密度評価は近傍粒子配置により強く依存するため, 解析中に非圧縮性から与えられる密度一定条件を厳密に満足し続けることは困難である. 従来の圧力ポアソン方程式では, 近傍粒子数が固定され粒子が完全な一様分布を保持した状態でなければ, 密度は一定とはならず安定した圧力

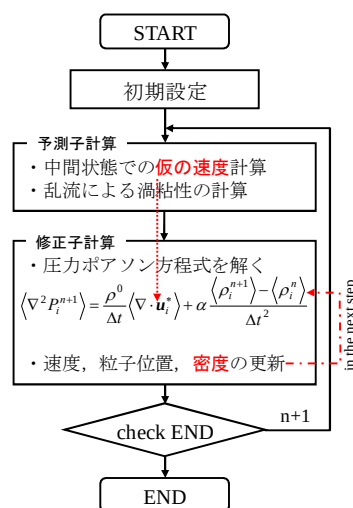


図 - 1 ISPH の計算フロー

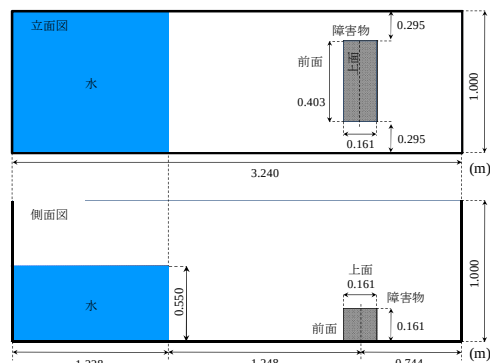


図 - 2 比較検証実験の諸元

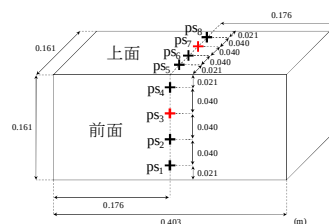


図 - 3 障害物の詳細

キーワード : incompressible SPH, pressure Poisson equation, SPH

連絡先：〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番 九州大学 伊都キャンパス W2 号館 11 階 1102 号室
Tel/Fax 092-802-3370

値が得られない．そこで，瞬間的にはある程度の密度誤差が介入することを許容し，長期的に密度変化が生じないように修正した圧力ポアソン方程式を採用した．

$$\langle \nabla^2 P_i^{n+1} \rangle = \frac{\rho^0}{\Delta t} \langle \nabla \cdot \mathbf{u}_i^* \rangle + \alpha \frac{\langle \rho_i^0 \rangle - \langle \rho_i^n \rangle}{\Delta t^2} \quad (4)$$

ここで，初期密度 $\rho^0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ であり， $\alpha (=0 \sim 1)$ は緩和パラメータである．

(2) 乱流による渦粘性の導入

乱流状態では，通常の粘性とは別に速度を均一化して安定しようとする働きが生ずる．この渦粘性を表現するため，本研究では Large Eddy Simulation の基本的なモデルである Smagorinsky モデルを導入した．すなわち，渦粘性係数 ν_t を次式により評価した．

$$\nu_{t,i} = C_s^2 L_m^2 S \quad (5)$$

ここで， C_s は理論的な考察から約 0.2 程度とされる Smagorinsky 定数である．また L_m は混合距離と呼ばれ，SPH 法においては粒子間距離が採用されることが多い． S は次式で定義される歪み率である．

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6), \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

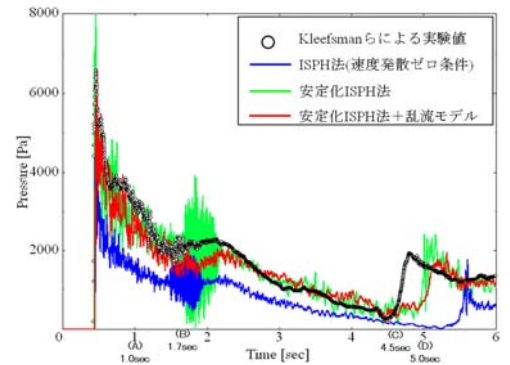
3. 解析例（3次元水柱崩壊）

上記の安定化 ISPH 法の精度検証例題として，Kleefsman らによって行われた実験結果を採りあげた．この実験の諸元を図 - 2 に示す．障害物には，図 - 3 に示す 8 か所の圧力センサが設置されている．図 - 4 では，側面と上面に設置した 2 つのセンサの出力値の比較結果を示す．また，図 - 5 では，各時刻における圧力コンタ図を示す．ここで，同図中に示した A,B,C,D の時刻は図 - 4 の記号と対応している．障害物に衝突し，跳ね上がった流体と障害物側面の流路を通過した流体が，右壁に衝突したのちに再び結合する際（図 - 4 の B 点付近），乱流を考慮していない安定化 ISPH 法では不自然な圧力数値振動が生じたが，乱流モデルの導入により安定した結果を得ることができた．

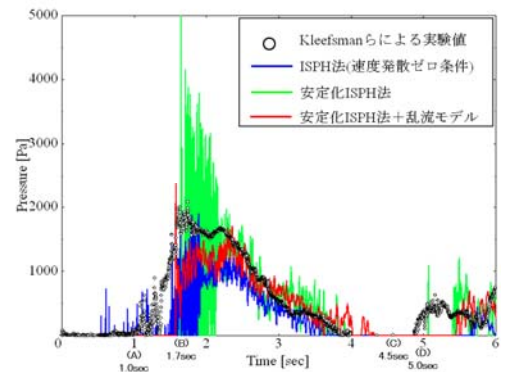
4. おわりに

実験結果との比較を通し，開発した安定化 ISPH 法は精度のよい圧力分布，時間変化を与えること可能であることを確認した．今回の数値実験によれば，ポアソン方程式のソース項に導入した緩和パラメータと渦粘性の併用した際に，最も精度のよい圧力を与えた．今後，安定化した ISPH 法を用いた流体構造連成シミュレータへと発展させる予定である．

参考文献 1) 酒井 譲，ほか 2 名：SPH 法による非圧縮性粘性流体解析手法の研究，日本機械学会論文集 B 編，70 巻 666 号，pp.47-54, 2004



(a) ps_3 における出力値



(b) ps_5 における出力値

図 - 4 各センサ位置における圧力値の比較

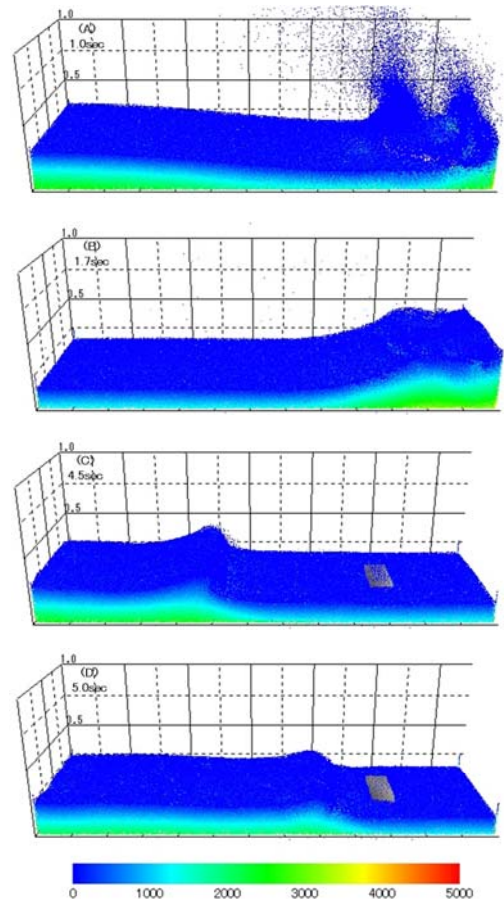


図 - 5 3次元水柱崩壊解析結果