MPS 法を用いたタンクのスロッシング解析

三重県庁　○正会員　須川智史
香川大学工学部　フェロー会員　野田　茂
香川大学工学部　正会員　吉田秀典

1. まえがき

2007 年 7 月 16 日，新潟県中越沖で M6.8 の強震動が観測され，地震波に共振して激しく液体が揺れる「スロッシング（液面揺動）」現象が確認された．そこで本研究では，粒子法（MPS 法）を用いてタンクと内容液をモデル化し，流体と構造体の連成解析を実施することにより，タンクの形状条件などがスロッシングに及ぼす影響を検討した．圧倒的に多い小型タンクのスロッシングを分析することにより，MPS 法の有効性を明らかにした．

2. MPS 法

粒子法は従来の差分法や有限要素法では困難であった複雑現象をシミュレートできる．中でもMPS (Moving Particle Semi-implicit)法では，連続体をメッシュ（計算格子）分割するのではなく，自由に動く粒子の集まりとして表現する[1)]．同法は非圧縮性粘性解析に適した計算アルゴリズムであり，砕波などの非線形現象を再現可能な解析手法として注目を集めている．

MPS法では連続体の運動を有限数の粒子運動として離散化すると，粒子の挙動が解明される．各粒子が持つ速度などの状態変化は粒子間相互作用に基づいて計算される．連続体を有限個の粒子で表すことが空間の離散化に相当するとともに，支配方程式を粒子間相互作用に置換することが偏微分方程式の離散化に相当する．

従来手法である有限要素法や差分法と比較すると，1)完全ラグランジュ法であるので，2)メッシュ生成が不必要などの特徴がある．この利点より，移流項に起因する数値拡散が生じず，自由液面の境界を特別なスキームなしに追跡できる．このため，安定した流体－構造物連成解析を実現できるようになった．しかしながら，MPS法の歴史は浅く，土木・防災分野への適用例は極めて少ない．

3. 数値解析結果および考察

解析モデルとしては直方体プールと円筒形タンクを対象とした．2007年新潟県中越沖地震時の東京電力柏崎刈羽原子力発電所3号機建屋2階の地震応答記録を用いて，直方体プールのスロッシング挙動を調べる．浮屋根のない円筒形タンクのスロッシング特性の分析に当たっては同一地震波入力に対する挙動を比較検討する．MPS法の解析には計算時間を要するため，ここでは15秒間の加振を対象にした．

本研究では，流体と構造物を3次元粒子でモデル化し，MPS法を用いてスロッシングに伴う液位・圧力変化などをミクロに分析することにより，非圧縮性流体と構造物の連成挙動を解明する．円筒形タンク（内径・高さ各10m，液深9m）に消防法を適用すると，最上端までの空間余裕高さは0.86mになる．標準的なケースでは溢流を生じない液面高さである．

図－1 には東京電力柏崎刈羽原子力発電所 3 号機プールと同形モデルの,図－2 には円筒形タンクのスロッシングと断面圧力を示す．加振後における自由液面の様子より，内溶液はプールならびにタンクから溢流しており，高次モードが付加したスロッシング挙動がよく再現できていることがわかる．

直方体プールのスロッシングは北西－南東方向（直方体の対角線上）に卓越した動きを呈す．液面から側壁上端までの空間余裕高さは 0.4m しかない．最大スロッシング波高は約 1.7m にも達するため，溢流することになる．図－1(b)より，スロッシングが卓越すると，水中では大きな圧力が発生していることがわかる．スロッシングモードに応じ，圧力にもモードが生じる．場所によっては圧力が 120,000kgf/m²ほどにもなっている．スロッシングに応じて飛沫が顕著になり，流体粒子の溢流状況が理解できる．こうした粒子の動きを表現できることが粒子法解析の大きな特徴である．

キーワード　粒子法，MPS 法，連成解析，タンク，スロッシング
連絡先　〒761-0396 香川県高松市林町 2217－20，Tel & Fax：087-864-2153

図－2 より，液深 9m タンクのスロッシング挙動も直方体プールと同様であることがわかる．スロッシングの成長により，加振後 13.7 秒ではスロッシング波高が最大 2.15m となる．タンクの余裕高さよりも大きなスロッシングが生じたため，タンクからの溢流が見られる．

3 次元的なスワール現象は加振後 8.1～9.6 秒において特に顕著であった．高次のスロッシングモードが発現した同時間帯における断面圧力を示すと，図－2(b)のようになる．スロッシングが卓越し始めると，スロッシング波高の上昇側の水中圧力が大きくなり，タンク側壁に強い圧力を生じている．

スワール現象は液面の動きが空間的に一定でないために生じる．地震波は3次元的な動きを示すので，スロッシングはある卓越方向に単一モードでシーソーのように単純に揺れるわけでない．ここで見られたスワール現象は2003年十勝沖地震時と同じように右回りであった．

消防法に規制する以上の余裕高さを有する円筒形タンク（液面高さ 7.5m）では，スロッシング波高が最大 2.47m であったが，内容液の溢流は生じなかった．内容液が少ないため，タンク内の流体に生じる圧力は小さい．このように，MPS 法では実際の挙動を的確に表現しており，MPS 法の有効性が理解できる．

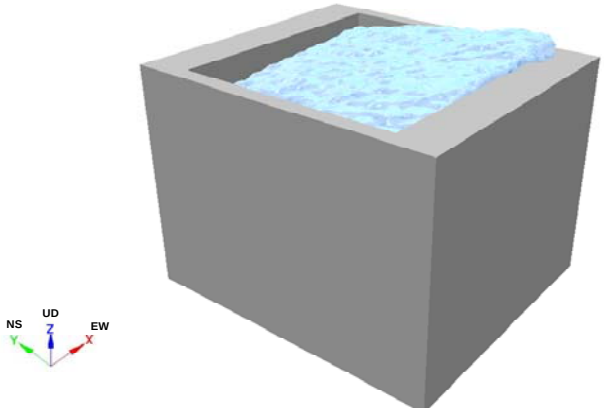
4. あとがき

直方体プールと円筒形タンクの流体－構造連成解析を行った結果，明確なスロッシング挙動が観察された．飛沫を再現できるとともに，スロッシングが構造物に及ぼす影響が明らかになり，MPS 法の有効性を示すことができた．今後は浮屋根付円筒形タンクの解析を実施する予定である．

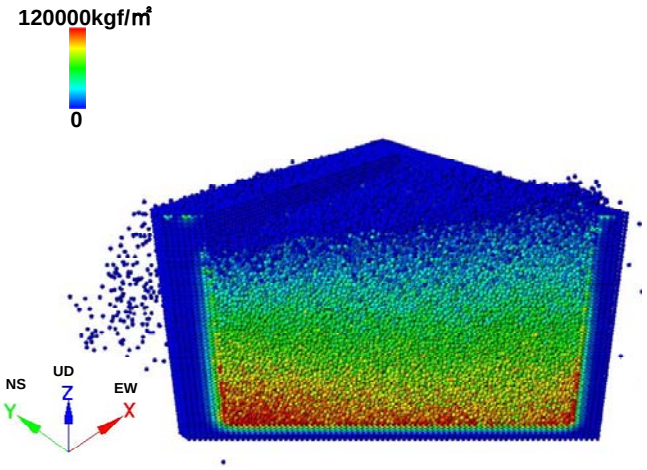
計算に当たっては，2007 年新潟県中越沖地震時における東京電力柏崎刈羽原子力発電所 3 号機 2 階応答記録を使用した．ここに関係各位に謝意を表する．

参考文献

1)越塚誠一：粒子法，丸善，2005 年 2 月．

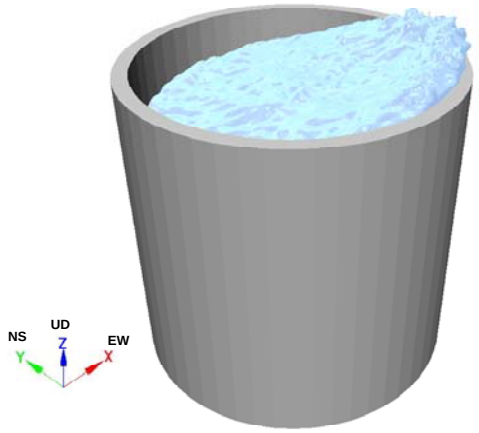


(a) 加振後 14.8 秒でのスロッシング

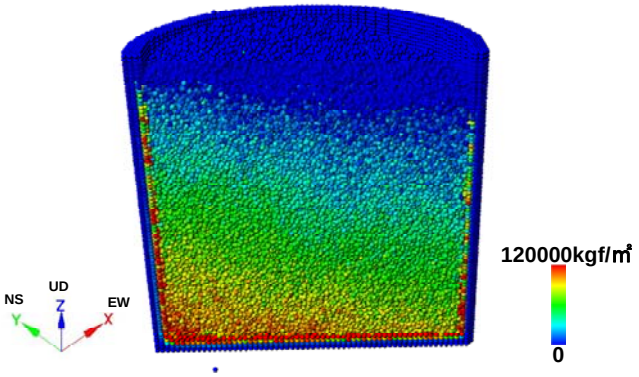


(b) 加振後 14.8 秒での断面圧力

図 1　直方体プールの解析結果



(a) 加振後 13.7 秒でのスロッシング



(b) 加振後 8.7 秒での断面圧力

図 2　円筒形タンク（液面高さ 9m）の解析結果