# SPH 法による Violent Sloshing 解析

Numerical Simulation of Violent Sloshing Using SPH

陸田秀実\*・清水 雄\*\*・土井康明\*\*\* Hidemi MUTSUDA, Yu Shimizu and Yasuaki DOI

\*博(工) 広島大学大学院准教授,工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1) \*\*修(工) 株式会社トヨタコミュニケーションシステム(〒461-0001 名古屋市東区泉 1-23-22) \*\*\*工博 広島大学大学院教授,工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

A violent sloshing is an important issue for ocean engineering and naval architecture and also causes resonance phenomena with a partially filled tank. The violent sloshing is connected with important water-wall interactions and breaking phenomena. This violent sloshing cannot be predicted by potential flow model. In this study, using SPH method, we applied the violent sloshing in a rectangular tank with the critical filling depth and verified these severe conditions. We also applied to the violent sloshing in an elastic tank and calculated the stress field and deformation when violent water wave acts on the elastic wall.

Key Words: Violent Sloshing, SPH, Particle based simulation, Resonance phenomena キーワード: スロッシング, SPH 法, 粒子法, 共鳴現象

## 1. 緒論

スロッシング現象は、タンク内で発生する強非線形な流 体現象の典型例である. 強制動揺に伴う液面振動によって 発生する Sloshing 現象は,土木工学,船舶工学,海洋工学, 原子力工学に関連した構造物に対して,しばしば致命的な 損傷事故を引き起こす.例えば,航行船舶のローリング運 動による転覆・損傷問題、地震動による原子炉建屋内の使 用済燃料プールの溢水問題、石油タンクのスピルオーバー 問題などの事例が挙げられ、輸送用機器ならびに産業用施 設の設計において、極めて重要な流体現象で、50年以上 に亘って数多くの研究がなされている.特に、ある有限水 深(浅い場合など)を有する LNG タンク内では、船体運 動とスロッシング現象が共鳴干渉し,液面挙動が極めて激 しくなり、タンク側壁に衝撃圧が発生するなど、船体の安 定性やタンク構造自体に致命的なダメージを与える Violent Sloshing 現象が発生することがある. この Violent Sloshing 現象は、タンク側面での水面のrun-upとrun-down、 タンク上面への水面衝突,自由液面の overturning,空気巻 き込みとその振動挙動等が、その大きな特徴として挙げら れる.

このような Violent Sloshing 現象に対する計算力学的ア プローチは2つのカテゴリに大別される.一つは,非粘性, 非回転を仮定したポテンシャル流体ベースの方法である. Faltinsen ら<sup>1)~4)</sup>は,自由表面に特別な境界条件を施すこと によって Multimodal 解析を行い、3 次元矩形タンク内の Resonant Sloshing や Violent Sloshing の再現に成功している. 彼らの方法は、計算効率の面で非常に優れているものの、 ある特定の計算条件、例えば、Sloshing タンク上壁への液 面衝突はしない、砕波や空気混入が発生しないなどの制約 条件の基で、その有用性を発揮するモデルである.

もう一方のカテゴリは、非圧縮性粘性流体を仮定し Navier-Stokes 方程式を直接解く方法である。例えば、SURF やFLOW-3D などの市販コードを利用した研究<sup>5)、7)</sup>や、最 近では粒子法を用いた研究<sup>8)~10)</sup>が数多くなされている。ま た、水面の overturning や強非線形な Violent Sloshing 現象を 対象とした水位・圧力の精度検証ならびに液面挙動が弾性 タンク壁の振動挙動に与える影響などについて研究例 <sup>11,12</sup>はあるものの不明な点も多い。

そこで本研究では、Sloshing 現象の中でも工学的に特に 問題となるタンク固有振動周期付近で発生する Violent Sloshing 現象の再現性および非線形水面波の高次干渉で発 生する液面挙動に対する再現性を明らかにすることを目 的とする.ここでは、ロバスト性・計算安定性に優れた SPH 法<sup>13</sup>を採用する.さらに、剛体・弾性体と流体の相互 作用を計算することが可能なスキームを構築し、弾性タン ク内における Violent Sloshing の挙動および弾性壁に作用 する応力・変位について、その適用性を調べる.

#### 2. 数値計算法の概要

## 2.1 支配方程式とその解法

支配方程式は、連続の式と運動方程式である.

$$\frac{D\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u^i}{\partial x^i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{du'}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\prime\prime}}{\partial x^{j}} + g^{i} + F^{i}_{fsi}$$
(2)

ここで、 $\rho$ は密度、 $u^i$ は速度、 $x^j$ は位置ベクトルのj方向成分、 $\sigma^{ij}$ は固体・流体の応力テンソル、 $F_{fsi}$ は固体・流体相互作用項である.

### 2.1.1 固体相の場合

弾性体を含めた固体領域の計算を行う場合,式(2)中の 固体の応力テンソル $\sigma_s^{ij}$ は,以下の通りである.

$$\sigma_{c}^{ij} = -P\delta^{ij} + S^{ij} \tag{3}$$

ここで、 $S^{ij}$ は偏差応力成分、 $\delta^{ij}$ はクロネッカーデルタ、  $P = -\sigma_{kk}/3$ である、弾性体が大変形する場合、物体形状 が時々刻々と変化することを考慮した取り扱いが必要で ある、ここでは、以下の増分型構成式を用いる、

$$\{dS^{ij}\} = [D^e]\{d\varepsilon^{ij}\}$$
(4)

ここで、 $D^e$  は弾性マトリックス、 $d\varepsilon^{ij}$  はひずみの時間 増分、 $dS^{ij}$  は偏差応力の時間増分であり、変形時の固相 の回転運動を考慮するために、本研究では以下の Jaumann 速度を用いる.

$$\frac{dS^{ij}}{dt} = 2\mu \left(\dot{\varepsilon}^{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\dot{\varepsilon}^{ij}\right) + S^{ik}\Omega^{jk} + \Omega^{ik}S^{kj}$$
(5)

固体の支配方程式(2)をSPH法で離散化すると、以下の通りである.

$$\frac{du_a^i}{dt} = \sum_b m_b \left( -\left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2}\right) \delta^{ij} + \frac{S_a^{ij}}{\rho_a^2} + \frac{S_b^{ij}}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \delta^{ij} + R_{ab}^{ij} f_{ab}^n \right) \frac{\partial W_{ab}}{\partial_a x^i} + g^i - \frac{F_{fsi}}{\rho_a}$$
(6)

ここで、 $\Pi_{ab}$ は人工粘性項、 $R_{ab}^{ij} f_{ab}^{n}$ はMonaghan<sup>14)</sup>が提案 した人工応力項を示し、以下の式で表される. ここで、nは 2~6が望ましいとされおり、本研究では n=4 とした.

$$R_{ab}^{ij} = R_a^{ij} + R_b^{ij} \tag{7}$$

$$f_{ab} = \frac{W(r_{ab})}{W(\Delta p)} \tag{8}$$

なお,2次元の場合,

$$R_a^{xx} = \overline{R}_a^{xx} \cos^2 \theta_a + \overline{R}_a^{yy} \sin^2 \theta_a \tag{9}$$

$$R_a^{yy} = \overline{R}_a^{xx} \sin^2 \theta_a + \overline{R}_a^{yy} \cos^2 \theta_a$$
(10)

$$R_a^{xy} = (\overline{R}_a^{xx} - \overline{R}_a^{yy})\sin\theta_a\cos\theta_a \tag{11}$$

$$\overline{R}_{a}^{xx} = \begin{cases} -\varepsilon \frac{\overline{\sigma}_{a}^{xx}}{\rho_{a}^{2}}, & \text{if } \overline{\sigma}_{a}^{xx} > 0 \quad \text{(Tension)} \\ 0, & \text{if } \overline{\sigma}_{a}^{xx} \le 0 \quad \text{(Compression)} \end{cases}$$
(12)

 $\overline{\sigma}_{a}^{xx} = \sigma_{a}^{xx} \cos\theta_{a} + \sigma_{a}^{xy} \cdot 2\sin\theta_{a} \cos\theta_{a} + \sigma_{a}^{yy} \sin\theta_{a} \quad (14)$ 

$$\overline{\sigma}_{a}^{yy} = \sigma_{a}^{xx} \sin \theta_{a} + \sigma_{a}^{xy} \cdot 2 \sin \theta_{a} \cos \theta_{a} + \sigma_{a}^{yy} \cos \theta_{a}$$
(15)

$$\tan 2\theta_a = \frac{2\sigma_a^{xy}}{\sigma_a^{xx} - \sigma_a^{yy}} \tag{16}$$

となる. ここで、 $\varepsilon$  は人工応力係数であり、 $\varepsilon = 0$ の時は、 人工応力を考慮しないことに相当し、通常の解法と同様で ある. なお、 $\overline{R}_{a}^{\nu\nu}$ についても同様に考えることが出来る. この人工応力係数 $\varepsilon$ が、流力弾性解析に与える影響につい ては、種々の検討を行い、決定した.

## 2.1.2 流体相の場合

非圧縮性流体の場合,式(2)中の流体の応力テンソル  $\sigma_{f}^{ij}$ は,以下の通りである.

$$\sigma_{f}^{ij} = -P\delta^{ij} + \mu \left( \frac{\partial u^{i}}{\partial x^{j}} + \frac{\partial u^{j}}{\partial x^{i}} \right)$$
(17)

ここで $P = -\sigma_{kk}/3$ ,  $\mu$ は粘性係数である.上式を運動 方程式に代入すれば非圧縮粘性流体の Navier-Stokes 方程 式が得られる. SPH 法による支配方程式の離散化は以下の 通りである.

$$\frac{Du_{a}^{i}}{dt} = \sum_{b} m_{b} \left( \frac{\sigma_{a}^{ij} + \sigma_{b}^{ij}}{\rho_{a}\rho_{b}} + \Pi_{ab} \delta^{ij} \right) \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_{a}^{i}} + g^{i} + \frac{F_{fi}}{\rho_{a}}$$
(18)

ここで、 $\Pi_{ab}$ は人工粘性項である.この運動方程式の時間積分には、SMAC アルゴリズムを採用する<sup>15)</sup>.

また,仮の速度 $u_i^*$ を用いて仮の圧力P'は以下のポアソン方程式より求めることにする.

$$\nabla^2 P' = \rho \frac{\nabla \cdot u_i^*}{\Delta t} \tag{19}$$

なお,上式の SPH 法による離散式化は,以下のようになる.

$$\nabla^2 P' = \rho_a \sum_b m_a \left( \frac{u_a^*}{\rho_a^2} + \frac{u_b^*}{\rho_b^2} \right) \nabla W_{ab}$$
(20)

また,粘性項 $\frac{\mu}{\rho}$  $\nabla^2 u_i^n$ については,応力に関する1階微 分であり,応力は変位の1階微分であることを利用して, SPH 理論による定式化<sup>15</sup>を直接用いた.

### 2.2 計算手順

計算手順として、まず連続の式によって、密度の

時間変化率を計算する.固体・流体の運動方程式の 応力項は体粒子と固体粒子を区別することなく計算 する.これによって,固体粒子が液体粒子から受け る力を評価することが可能となるだけでなく,液体 粒子と固体粒子が相互作用する際に,密度が高くな り,粒子の粗密に応じた流体力や応力を評価できる.

次に,ポアソン方程式から液体粒子と固体粒子の 圧力を計算する.求めた圧力と各粒子の速度から運 動方程式によって,各粒子の加速度を計算する.運 動方程式を計算する際,液体については圧力項と粘 性項,固体については圧力項と偏差応力の項に分け て,それぞれ計算を行う.

また、式(6)および(18)中にある相互作用項 $F_{fsi}$ は、以下の通り、液体粒子、固体粒子が持つ圧力を用いて、加速度を算出することで、以下の通り評価する.

$$F_{fsi}(\mathbf{r}_a) = -\frac{1}{\rho(\mathbf{r}_a)} \sum_b m_b \frac{P(\mathbf{r}_b)}{\rho(\mathbf{r}_b)} \nabla_a \cdot W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (21)$$

さらに、粘性項と偏差応力の項は、それぞれ液体 粒子、固体粒子のみの足し合わせを行う. 求めた値 から、各粒子の密度、速度、位置などの物理量を更 新する.

なお、固体-流体連成問題を取り扱うために、流体計算 と固体計算の時間刻みを変える必要がある.ここでは、下 式に示すように、流体ルーチン1回に付き、固体ルーチ ンは N回ステップ行うことにした.

$$\Delta t_f = N \times \Delta t_s \tag{22}$$

ここで、 $\Delta t_f$  は流体ルーチンの時間刻み、 $\Delta t_s$  は固体ルーチンの時間刻みを表す.

#### 3. 計算結果

#### 3.1 圧力の精度検証

Violent Sloshing 現象の液面挙動特性を調べる前に、壁 面に作用する圧力について精度検証する. ここでは、Hu ら<sup>16</sup>が行った Sloshing 問題を用いて, 圧力の精度検証を 行う. 幅 0.6m×高さ 0.3m のタンク内に水深 0.12m の水 を入れる. 振幅 0.05m, 周期 1.5s で強制的に横揺れ振動 を与える. ここでは、左側壁下から 0.16m の高さに作用 する圧力を検証することにした. 図-1は、瞬間的な水面変 動のスナップショットである. また, 図-2は, 壁面に作用 する圧力の時系列変化について比較検証したものである. 上段はHuら<sup>10</sup>の実験結果、下段は本計算結果である。ま た、初期粒子間隔が圧力変動に与える影響を調べるため、 5mm, 10mm, 20mm のケースについて検証した. この図 は, 5mm のケースを示すが, いずれのケースも概ね圧力 の変動傾向は一致していた. 但し、粒子数が疎となる時刻 において圧力振動の傾向が現れており、細分化技法などを 導入する必要があると言える.

次いで、3次元ダム崩壊した水塊が剛体に衝突する際に 発生する水面衝撃圧について本数値計算の検証を行った. ここでは、Kleefsmanら<sup>17</sup>の行った実験と比較検証を行う. 本実験は、幅3.22m×奥行き1.0m×高さ1.0mの3次元計 算領域内に、右側領域より高さ0.55mの水柱(ゲートなし) および長幅0.15m×奥行き0.4m×高さ0.15mの剛体が設 置されており、この剛体に衝突する水塊によって発生する 水面衝撃圧の計測値を比較に用いた.その他、詳しい実験 条件はKleefsmanら<sup>17</sup>を参照されたい.図-3は剛体に作用 する圧力変動の時系列変化について比較したものである. なお、この結果は、初期粒子間隔1cmの場合のものであ り、圧力値は種々の検討結果から適当な時間間隔及び空間 領域で平滑化を行っている.図より、衝突時の最大衝撃圧、 衝撃圧の増減傾向を概ね計算可能であることが分かる.な お、その他複数の測点でも比較を行ったが、概ね良い傾向 が得られた.











図-3 剛体に作用する水面衝撃圧の時系列変化の比較.実 験および VOF 計算の結果は、Kleefsman ら<sup>15)</sup>のもの.

## 3.2 Violent Sloshing 現象の発生と精度検証

図-4 は、Colagrossi ら<sup>9</sup>が行った 2 次元 Violent Sloshing 実験のタンク概要である. 幅(L)1.0m×高さ(H)1.0m×奥行 (B)0.1m のタンク内に水深 0.35m の水が入れてある. この 水深は、Faltinsen ら<sup>18)</sup>が Multidimensional modal 解析を行っ た結果得られた Critical filling depth = 0.337 に近い値である. なお、タンク側壁から 5cm のところに波高計を設置し、 ここで水位計測した結果について、本計算結果と比較検証

ここで小位計例した結果について、本計算結果と比較快証 した.

タンクは以下に示すように水平方向にのみ強制振動 (Surge motion) させる.

$$x = A\sin(2\pi t / T) \tag{23}$$

ここで、 x は水平変位、 A は振幅、 T は振動周期を表し ている. 表-1 は、2 次元 Violent Sloshing の計算条件を示し ている. 振幅 A=0.03m~0.1m の間で4 ケース, 振動周期 T=1.0~1.8sの間で6ケースとし、合計20ケースの数値 実験を実施した.時間積分は、300s(5分間)とし、長周 期の非線形振動モードを考慮することとした. ここで, T は線形1次モードの固有周期である.本研究では,Faltinsen ら<sup>18)</sup>の研究で示された特有の Violent Sloshing 現象が発生 するケースにしぼって計算することにする. ここで言う特 有の Violent Sloshing 現象とは、タンク固有周期付近の振動 周期において、左右非対称な水面挙動となったり、水面変 動の周期性にいくつかのモードが重なっていたり,砕波現 象が発生したりしなかったり、タンク上面に衝撃圧を作用 させるような現象が非周期的に発生する Sloshing 現象のこ とであり、これらの発生条件や再現性について検討を行っ た. 表中の3桁のケース番号に付した(I)~(IV)は, Colagrossi ら<sup>9</sup>が Sloshing 現象のタイプ別分類を行ったもの である. それぞれ(I)砕波が発生しないケース, (II) 砕波が繰り返し発生ケース, (Ⅲ)長時間にわたって不規 則な非対称 Sloshing 現象が発生するケース, (IV) 局所的 なスプラッシュが発生するケースを示している.

![](_page_3_Figure_6.jpeg)

図4 2次元 Violent Sloshing 現象のタンク諸元. 高次非線 形干渉によって非対称な Sloshing が発生する計算条件<sup>9</sup>.

計算時間刻みは 0.01s とし,流体粒子 858 個,壁粒子 624 個,初期粒子間隔 2cm とした.また,流体粒子密度 1g/cm<sup>3</sup>,壁粒子密度 7.5g/cm<sup>3</sup> とした.なお,初期粒子間 隔は,予め 1cm, 2cm, 4cm の条件で計算し,本研究の 水面変動を捉える上で十分と判断された 2cm 間隔を採用 することにした.

図-5 は、Type I~IV の典型的なケースについて、左側壁 付近(壁から 5cm)の水面変動の時系列変化を示したもの である.いずれのケースも Surge 周期がタンクの固有周期 近くにあるため、高次モードの非線形干渉によって、左右 非対称の水面挙動が出現しており、包絡波形となっている ことが分かる.なお、Type I を除く全てのケースにおいて、 砕波が発生していることを確認している.

図-6 は、典型的な水面挙動のスナップショットについて、 を実験結果<sup>9</sup>と比較したものであり、白抜きは背景画であ る.非常に激しい Violent sloshing 現象であっても、飛沫を 含めて水面形状の概略はよく一致している.しかしながら、 図-6(c)に見られる局所的なチューブ状の砕波現象を正確 に再現するには粒子解像度を上げる必要があろう.

表-1 Violent Sloshing 計算条件<sup>9)</sup>

T(sec)	T/T1	A/L (L=1.0m)							
		0.03		0.05		0.07		0.10	
1.00	0.79	183	(I)	174	(I)	206	(II)	414	(III)
1.10	0.87	484	(  )	175	(II)	207	(IV)	415	(IV)
1.20	0.95	186	(IV)	176	(II)	208	(II)	416	(IV)
1.30	1.03	189	(II)	178	(II)	210	(IV)	418	(IV)
1.60	1.27			179	(II)			419	(IV)
1.80	1.43			180	(II)			420	(IV)

![](_page_3_Figure_13.jpeg)

図-5 水面変動の時系列変化(左壁から 5cm の水位). 上から順に, Type I (Run 174), Type II (Run 179), Type III (Run 414), Type IV(Run 419)のケースを示す.

- 92 -

![](_page_4_Picture_0.jpeg)

# (d) Type III (Run 414)

## 図-6 典型的な水面挙動のスナップショットの比較 (左図:実験結果<sup>9)</sup>,右図:本計算結果)

次いで,波高の精度検証を行う. 図-7 は, 側壁近傍の波 高について, Faltinsen ら<sup>19,20</sup>, Olsen ら<sup>21)</sup>の実験および計 算結果と比較したものであり,点線は,タンクの上面高さ を示している. なお, Violent Sloshing の計算条件の場合, 波高が一定ではないため平均化した値 (50s~250s の平均) を用いることとした. ここで,  $\Delta$ 印(最大値) および▲印 (平均値) が粒子法による本数値計算結果,〇印は,陸田 ら<sup>22)</sup>の計算法による結果,その他は Faltinsen ら<sup>19,20)</sup>および Olsen ら<sup>21)</sup>らによる理論,計算,実験による結果である. 両振幅 A/L のケースともに、1 次モードおよび2 次モード 付近ともに、概ね良い一致を示しており、水面変動はかな り良い精度で計算可能であることが分かる. なお、先にも 示したが、初期粒子間隔 1cm および 4cm の場合も行って いるが、本計算条件下では 2cm 程度の初期粒子間隔で十 分であることが確認された.

## 3.3 弾性壁内の sloshing 問題への適用

まず始めに, 2.1.1 節で詳述した Monaghan<sup>14)</sup>の提案した 人工応力項 *R<sup>ij</sup><sub>ab</sub> f<sup>n</sup>* の精度検証を行うために, 片持ち梁に よる振動解析を行い, Gray ら<sup>23)</sup>の結果と比較検証を行う. 片持ち梁の計算条件は, 長さ *L*=20cm, 高さ *H*=1cm,

![](_page_5_Figure_0.jpeg)

(a) 人工応力係数( $\varepsilon = 0.6$ ) (b) 人工応力係数( $\varepsilon = 0.0$ ) 図-8 片持ち梁の変位挙動.人工応力係数 $\varepsilon = 0.0$ のケース で曲げ引っ張りの場所で亀裂が発生してしまっている.

![](_page_5_Figure_2.jpeg)

図-9 最大変位発生時の弾性体位置の比較.上段は Gray ら<sup>21)</sup>の結果,黒実線は解析解,下段は本計算結 果.

せん断弾性率 $\mu$ =0.6,変位速度 $V_f$ =0.05 である. その他, 詳しい諸条件はGray ら<sup>23)</sup>の論文を参照されたい.

図-8 は、片持ち梁の振動挙動を示したものであり、人工 応力係数  $\varepsilon = 0.6$  の場合の計算結果である. なお、人工応 力項を入れなかった場合(すなわち人工応力係数  $\varepsilon = 0$ 、 オリジナルの SPH 固体解析)についても同時に示す. な お、人工応力係数に関するパラメータの感度分析を行った 結果、0.4~0.6 程度が望ましいことを予め確認している. 図より、人工応力係数を考慮しなかった場合( $\varepsilon = 0$ )、 弾性体の引っ張り側で不自然な亀裂が入り、その後の変形 プロセスに大きな影響を及ぼすことが分かる. 一方、人工 応力係数を考慮した場合は、不自然な亀裂の発生は抑えら れ、安定に計算が続けられており、人工応力係数の有用性 が確認できる.

このように時間積分を安定に進める上で、人工応力係数 の有用性は確認できたが、その数値精度については不明の ままである.そこで、曲げ変形の精度検証を行うことにし た.図-9は、最大変位となる時刻における弾性体の位置に ついて、Gray ら<sup>23)</sup>の結果と比較検証したものである.上 段はGray ら<sup>23)</sup>の結果であり、解析解も黒実線で同時に示 している.下段は本計算結果である.図より、本計算結果 はGray ら<sup>23)</sup>の結果や解析解と極めて良く一致した曲げ変 形となっている.なお、このケースは人工応力係数が0.6

![](_page_5_Figure_7.jpeg)

(a) 人工応力係数(ε = 0.6)
 (b) 人工応力係数(ε = 0.0)
 図-10 2 つの弾性リングの正面衝突シミュレーション.
 時系列は上から下で、両ケースとも同一時刻のもの.

## の場合である.

その他,図-10に示すように2つの弾性リングが高速で 正面衝突し,反対方向へ跳ね返っていく計算へも適用を行った.詳しい計算条件は,Gray 6<sup>23)</sup>の論文を参照されたい.人工応力係数 $\varepsilon = 0.0$ の場合,衝突後の大変形過程において,不自然な亀裂が数ヶ所で発生し,弾性リングは跳ね返ることはなく,破壊してしまう.一方,人工応力係数  $\varepsilon = 0.6$ とした場合,衝突後の大変形,その後の弾性リングの扁平化,さらには反対向きに弾性リングが跳ね返っていく一連の過程が再現されていることが分かる.なお,その他の人工応力係数についても検証し, $\varepsilon = 0.6$ 程度が望ましいことが分かった.

次いで、このような引っ張り領域に人工的な応力を作用 させる人工応力項を導入し、矩形弾性壁内の Sloshing 計算 に適用した.ここでは、図-1 と同様のタンク諸元のもと、 振幅 A=0.05m、周期 T=1.5s で強制的に横揺れ振動を与え、 Sloshing 現象を発生させた.ここで、タンク下面の部材の みを剛体として扱い、その他の上面および左右の部材は弾 性体とした.初期粒子間隔を 5mm として、流体は粒子数 2856 個、密度 1g/cm<sup>3</sup>、弾性体は粒子数 4400 個、密度 2.7g/cm<sup>3</sup> とし、ヤング係数 10000Mpa、ポアソン比 0.34 とした.ま た、時間刻みは流体ルーチンで 10<sup>3</sup>s とする一方で、弾性 体の振動を考慮して固体ルーチンでは 10<sup>5</sup>s とした.本ケ ースでは、人工応力係数は 0.6 に設定した.

![](_page_6_Figure_0.jpeg)

![](_page_6_Figure_1.jpeg)

図-11は、弾性タンク内の Sloshing 挙動のスナップショ ットおよび同時刻における弾性タンクの応力分布 $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ を示したものである. 種々の条件下で同様に計算を行 った結果、同一サイズの剛体壁内の Sloshing 現象とは異 なる液面挙動や砕波特性が確認された. これは、内部流体 の液面振動と弾性壁の振動との相互作用により、剛体壁と は異なる複雑な条件下で砕波やスプラッシュ現象が発生 するためであると考えられる. また、剛体壁内の Sloshing 現象よりも、若干スプラッシュが抑制される傾向にあるが、 逆に、砕波を頻発させる動揺条件も確認されたため、今後、 数多くの数値実験を実施し、その特性を検証していく予定 である.

## 4. 計算結果

本研究では、SPH 法に基づく固体・流体連成スキームを 構築し、タンクの固有振動周期付近で発生する Violent Sloshing 現象の再現性および精度検証について考究した. また、弾性タンク内の Sloshing 現象への適用性についても 検討した.以下に主要な結論をまとめる.

- Colagrossi, ら<sup>9</sup>が分類した Type I ~IV の Sloshing 現 象について, 水面挙動の精度検証を行った結果, 既往 の実験・理論結果と良好な一致が得られた.
- 2. 高次モードの非線形干渉が卓越する Violent Sloshing 現象の再現性を確認し,既往の実験結果と良好な一致 が得られた. 但し,もう少し長い周期のモード間干渉 を考慮するには,さらに長時間積分と検証が必要であ る.
- 3. タンク壁や剛体に作用する圧力・衝撃圧の精度検証を 行った結果,既往の実験結果と良好な一致が見られた. また,粒子法による計算結果は,水面変動よりも圧力 変動に対して,初期粒子間隔の影響が出やすいことが 分かった.

- 4. 弾性体を計算するために, Monaghan<sup>14</sup> が提案した 人工応力項を導入した. その結果, 材料の引っ張り側 に対して有効に作用し, 不自然な亀裂を抑制できるこ とが分かった.
- 5. 弾性タンク内の Sloshing 現象に適用し、流体と弾性 体の相互作用計算を実施した. その結果、弾性壁が破 壊することなく、安定に計算可能であることが確認さ れた. 今後は、衝撃圧による弾性壁の局所的変形や振 動応答について、定量的な検証を行う予定である.

## 参考文献

- Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F., Timokha, A. N. : Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin, Journal of Fluid Mechanics, Vol.487, pp.1-42, 2003.
- Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F., Timokha, A. N. : Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin. Part.2. Effect of higher modes, Journal of Fluid Mechanics, Vol.523, pp.199-218, 2005.
- 3) Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F. and Timokha, A. : Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin. Part.3. Base ration Perturbations, Journal Fluid Mechanics, Vol.551, pp.93-116, 2006.
- 4) Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F. and Timokha, A. N. : Classification of three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base tank with finite depth, Journal of Fluids and Structures, Vol.20, pp.81-103, 2005.
- Kim Y., Shin, Y. S., Lee, K, H. : Numerical study on slosh-induced impact pressures on thee-dimensional prismatic tanks, Applied Ocean Research, Vol.26, pp.213-226, 2004.
- 6) Wemmenhove, R., Lotts, E., Luppes, R., Veldman, A. E. P., Modeling two-phase flow with offshore applications, Proc. of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and

Arctic Engineering, 2005.

- Lee, D. H., Kim, M. H., Kwon, S. H., Kim J. W., Lee, Y. B.: A parametric sensitivity study on LNG tank sloshing loads by numerical simulations, Ocean Engineering, Vol.34, pp.3-9, 2007.
- Landrini, M., Colagrossi, A., Faltinsen, O. M. : Sloshing in 2D flows by the SPH method, Proc. of the 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, 2003.
- Colagrossi, A., Lugni, C., Greco, M., Faltinsen, O. M. : Experimental and numerical investigation of 2D sloshing with slamming, Proc. of the 19th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 2004.
- 10) Iglesias, A. S, Rojas, L. P. and Rodriguez, R. Z. : Simulation of anti-roll tanks and sloshing type problems with smoothed particle hydrodynamics, Ocean Engineering, Vol.31, pp.1169-1192, 2004.
- 11)近澤佳隆,越塚誠一,岡芳明: MPS法を用いた液面と 構造物の大変形を伴うスロッシングの数値解析,機械 学会論文集, B編, 65巻, 637号, pp.2954-2960, 1999.
- 12)近澤佳隆,越塚誠一,岡芳明:粒子法による構造物の 解析手法の開発とその沿岸構造物への適用,海岸工学 論文集,第47巻, pp.41-45, 2000.
- 13)Gingold R.A., Monaghan J.J. : Smoothed particle hydrodynamics, theory and application to non-spherical stars, Mon. Not. Roy. Astr. Soc. Vol.181, pp.375-389, 1977.
- 14)Monaghan, J. J.: SPH without a Tensile Instability, *Journal of Comutational Physics*, 159, pp.290-311, 2000.
- 15) 酒井 譲, 揚 宗億, 丁 泳鑵: 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, 696 号, pp.1949-1956, 2004.

- 16)Hu, C. and M. Kashiwagi : A CIP-based method for numerical simulations of violent free surface flows, Journal of Marine Science and Technology, Vol.9, No.4, pp.143-157, 2004.
- 17) Kleefsman, K. M. T., G. Fekken, A.E.P. Veldman, B. Wwanowski and B. Buchner : A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems, In : *Journal of Computational Physics*, 206, pp.363-393, 2005.
- 18) Faltinsen, O., O.R.I.Lukovskyand and A. Timokha : Multidimensional modal analysis of nonlinear sloshing in a rectangular tank with finite water depth, Journal Fluid Mech., Vol.407, pp.201-234, 2000.
- 19) Fantinsen, O. M. : A nonlinear theory of sloshing in rectangular tanks, J. Ship Res., Vol.18, pp.224-241, 1974.
- 20)Faltinsen O. M., Timokha, A. N. : An adaptive multimodal approach to nonlinear sloshing in a rectangular tank, J. Fluid Mech., Vol.432, pp.167-200, 2001.
- 21)Olsen, H. and Johnsen, K. R. : Nonlinear sloshing in rectangular tanks, A pilot study on the applicability of analytical models, Rep. 74-72-S, Vol.2, Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 1975.
- 22)陸田秀実: Particle CIP 法による水面衝撃問題の数値解 析,応用力学論文集, Vol.10, pp.121-130, 2007.
- 23) Gray, J. P., J. J. Monaghan and R. P. Swift : SPH elastic dynamics, *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190, pp.6641-6662, 2001.

(2008年4月14日 受付)