

IHI-SPB LNG タンクのスロッシングに対する構造安全性

Structural Safety of IHI-SPB LNG Tank against Sloshing

小早川 広 明 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部
楠 本 裕 己 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部 主幹
豊 田 昌 信 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 基本設計部 主査 博士(工学) 技術士(船舶・海洋部門)

FLNG や LNG 燃料船用の LNG タンクとして、スロッシングに対する高い構造安全性をもつ IHI-SPB タンクが注目されている。IHI-SPB タンクのスロッシングに対する構造安全性を支えるものとして、貨液運動と船体運動の同調回避設計および多くの試験や数値計算に裏付けされた高い信頼性をもつ設計技術が挙げられる。本稿では同調回避設計の必要性と、最新の計算手法である粒子法を用いた貨液運動による荷重の再現について紹介する。

The IHI-SPB tank is an excellent LNG tank for FLNG and LNG fuelled vessels, because it has high structural safety against sloshing. The high structural safety is achieved through a highly reliable design technique, backed up by many experiments and numerical simulations the result of which is the prevention of resonance between liquid motion and ship motion. This paper describes the necessity of avoiding such resonance and describes the numerical simulation of pressure induced by internal liquid motion using the Particle method, which is an advanced calculation technique.

1. 緒 言

近年、地球温暖化対策の一つとして単位発熱量当たりの温室効果ガス排出量の多い石油・石炭から、より温室効果ガス排出量の少ない天然ガスへのエネルギーシフトが進められており、これらによる天然ガス需要の高まりを受けて、各地で海底ガス田の開発が計画されている。海底ガス田開発には洋上で天然ガスの液化・貯蔵・出荷を行う浮体設備 (FLNG) の利用が計画されている。また、天然ガスへのエネルギーシフトの一例として、船舶燃料として液化天然ガス (LNG) を用いる LNG 燃料船の開発も進んでいる。これらの FLNG や LNG 燃料船用の LNG タンクとして、IHI-SPB タンクがその高いスロッシングに対する構造安全性から注目されている。スロッシングとは、船体運動によって生じる貨液運動全般のことであるが、狭義の意味では、船体運動と貨液運動が同調した際に生じる激しい流体運動を意味する。そこで本稿では、船体運動と貨液運動が同調した際に生じる激しい貨液運動を同調によるスロッシングと表現することとする。

FLNG や LNG 燃料船の LNG タンクに求められる機能として、中間液位でのスロッシング対策が挙げられる。LNG 船では LNG タンクを満載または空の状態で運転することで同調によるスロッシングを避けることができたが、LNG の生産・出荷によって液位がつねに変化する

FLNG や、燃料消費に伴い液位が変化する LNG 燃料船では避けることのできない問題となっている。このように LNG タンクはその用途によって求められる耐スロッシング性能が異なるため、各タンクの用途に応じた設計が必要となる。

IHI-SPB タンクは、株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド (IHIMU) が開発した Self-supporting Prismatic-shape IMO type B (自立角型 IMO type B タンク) のことであり、下記特長によって、スロッシングに対する高い構造安全性をもつ。

- (1) タンク内への隔壁設置による任意の液位における船体運動と貨液運動の同調によるスロッシングの発生防止
- (2) 多くの実験および数値計算に裏付けされた高い信頼性をもつ設計技術

IHI-SPB タンクではタンク内に隔壁を設置することで同調によるスロッシングの発生を避け、試験や数値計算に裏付けされた高度な解析技術を用いて、IHI-SPB タンクに生じる荷重を推定することで、スロッシングに対する高い構造安全性を実現している。IHIMU では、LNG 船および FPSO (浮体式生産貯蔵積出設備) に搭載される LPG (液化石油ガス) タンクとして、これまで多数の IHI-SPB タンクを建造しているが、貨液タンクに損傷は全く発生していない。このなかには世界で最も厳しいとき

れるアラスカ航路を、中間液位を避けることなく 18 年間航行している LNG 船も含まれており、IHI-SPB タンクのスロッシングに対する高い構造安全性を証明するものとなっている。本稿では、IHI-SPB タンクのスロッシングに対する構造安全性の源泉となっている同調回避設計の必要性と、最新の計算手法である粒子法を用いた貨液運動による荷重の再現について紹介する。

2. 貨液運動と船体運動の同調回避の必要性

2.1 貨液運動と船体運動の関係

タンク内貨液運動の固有周期は (1) 式で表されるように、液深さと動揺方向のタンク幅の関数となっている。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{\pi g \tanh(\pi h/l)}} \dots\dots\dots (1)$$

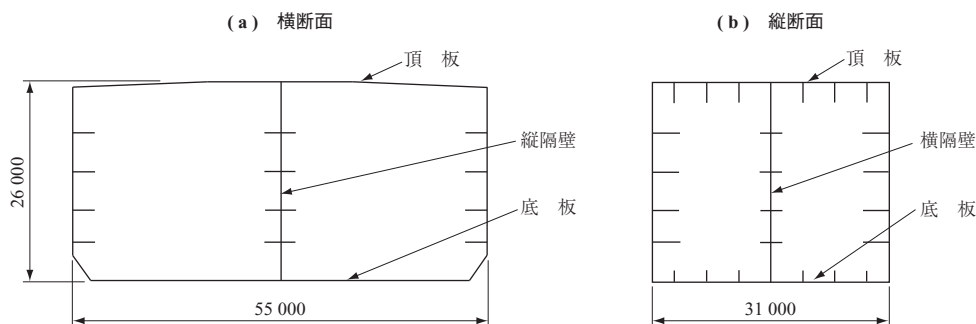
T : 固有周期 (s)

h : 液深さ (m)

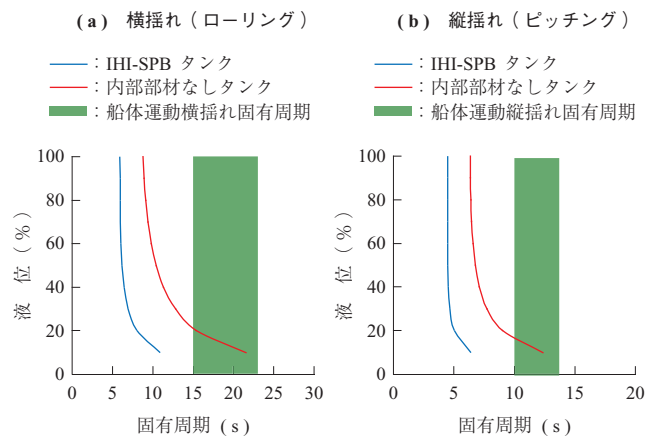
l : 動揺方向のタンク幅 (m)

g : 重力加速度 (m/s^2)

ここで一般的な大きさの FLNG 用 IHI-SPB タンク (長さ×幅×深さ (m) : 31×55×26) の隔壁配置を第 1 図に示す。長さ方向、幅方向の中心にそれぞれ横隔壁と縦隔壁を設けて、タンクを 4 分割している。第 2 図に貨液運動固有周期と船体運動固有周期を示す。本タンクの貨液運動固有周期と液位の関係を青線で示す。また、参考として隔壁なしの場合 (内部部材なし) の液位と貨液運動固有周期の関係を赤線で、一般的な FLNG の船体運動固有周期を緑領域で示す。第 2 図から、IHI-SPB タンクでは、すべての液位に対し貨液運動固有周期と船体運動固有周期が十分に離れているのに対し、内部部材なしタンクの場合、液位 10% から 20% の間で、貨液運動固有周期と船体運動固有周期が一致していることが確認できる。



第 1 図 IHI-SPB タンクの隔壁配置 (単位: mm)
Fig. 1 Bulkhead arrangement of IHI-SPB tank (unit:mm)



第 2 図 貨液運動固有周期と船体運動固有周期
Fig. 2 Natural period of liquid motion and ship motion

2.2 同調時と非同調時の貨液運動

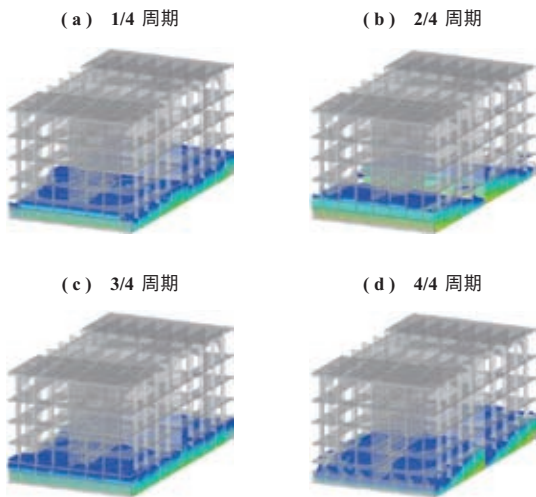
第 1 図に示した IHI-SPB タンクとその内部部材なしモデルを用いて、第 1 表に示す条件でタンクを動揺させたときの貨液運動のようすを数値流体解析 (FLOW-3D : 市販の CFD ソフトウェア) で再現した。数値計算では気体部分はモデル化せず流体部分のみをモデル化し、タンク内部は平均 1 辺 300 mm の立方体で離散化を行った。第 3 図に IHI-SPB タンク内の貨液運動のようすを示す。IHI-SPB タンクでは同調によるスロッシングが起こっておらず、貨液運動が穏やかであることが確認できる。

第 4 図に内部部材なしモデルの貨液運動のようすを示す。内部部材なしモデルでは、同調によるスロッシングが

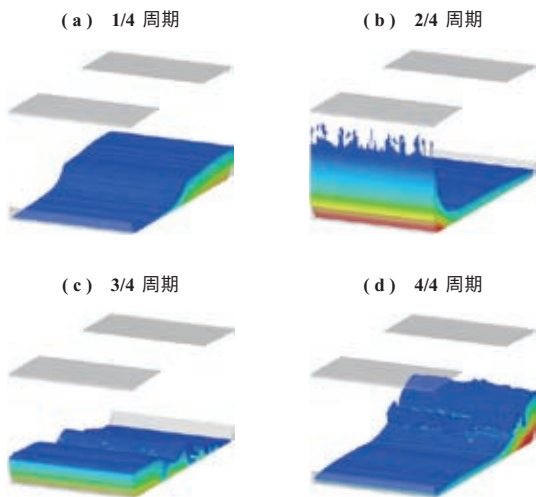
第 1 表 計算条件

Table 1 Computational conditions		
項目	単位	条件
動揺	-	横揺れ
振幅	度	10
周期	s	18
液位	%	15 (4)*1

(注) *1 : 15%時の液位 (m) を示す。



第3図 IHI-SPB タンクモデルにおける貨液運動
Fig. 3 Liquid movement in IHI-SPB tank



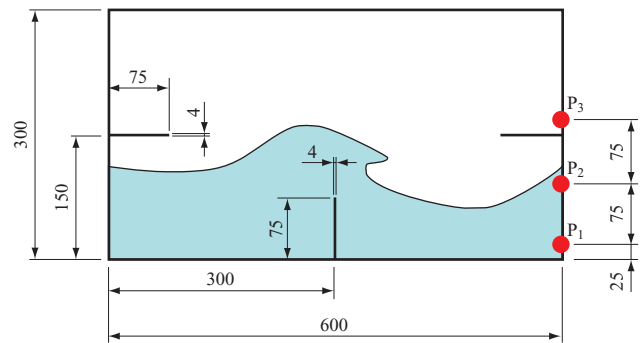
第4図 内部部材なしモデルにおける貨液運動
Fig. 4 Liquid movement in the tank without internal structure

発生し、自由表面の碎波やタンク側面への貨液の高速衝突、噴流といった強い非線形現象が起こっていることが確認できる。このように激しい貨液運動が発生した場合、スロッシング荷重を推定するには、これら強い非線形現象を考慮するとともに、LNG が壁に衝突する際の急騰による影響、構造-流体相互作用などを考慮する必要があると考

えられている⁽¹⁾。同調時のスロッシング荷重の推定に関しては、数多くの試験や数値計算による取り組みがなされているが⁽²⁾、⁽³⁾、現在のところ決定的な解決策は得られていない。

2.3 同調時と非同調時の内部部材に発生する荷重

第5図に示す二次元模型を用いたスロッシング試験結果から、同調時と非同調時の内部部材に発生する荷重について比較を行った。第2表に示す2ケースは、代表的な同調条件と非同調条件であり、周期以外のパラメータは同じ値となっている。同調条件、非同調条件の貨液運動のようすを第6図に、圧力算出点 P_2 における圧力時刻歴を第7図に示す。第7図から、非同調時の最大圧力は約450 Pa、同調時の最大圧力は約1740 Paであり、同調時の最大圧力は非同調時の最大圧力と比べ約4倍となっていることが分かる。



(注) P_1 , P_2 , P_3 : 圧力算出点

第5図 二次元模型試験横断面 (単位: mm)
Fig. 5 Section view of 2-dimensional model tank (unit: mm)

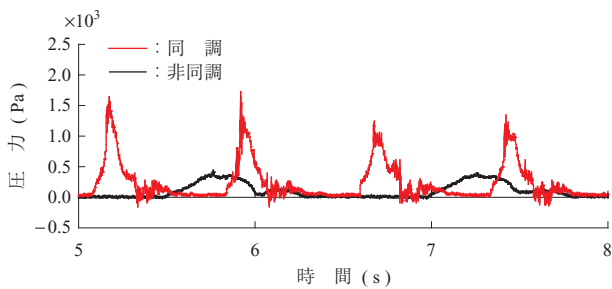
第2表 試験条件

Table 2 Experimental conditions

項目	単位	条件	
		同調	非同調
振幅	mm	50	50
周期	s	0.75	1.5
液位	mm	100	100



第6図 同調時と非同調時の貨液運動
Fig. 6 Liquid movement in resonance and non-resonance condition



第7図 同調時と非同調時の側壁 (P₂) に発生する圧力
Fig. 7 Pressure time history at P₂ in resonance and non-resonance condition

3. 粒子法を用いた貨液運動による荷重の再現

船体運動と貨液運動が同調した際に生じるスロッシング荷重の推定は難しく、また荷重そのものも非同調時と比べ非常に大きいことから、IHI-SPB タンクでは同調回避設計を行っていることを 2 章で説明した。そこで 3 章では、IHI-SPB タンク内で発生している穏やかな貨液運動による荷重の再現について、最新の計算手法である粒子法を適用した例を紹介する。

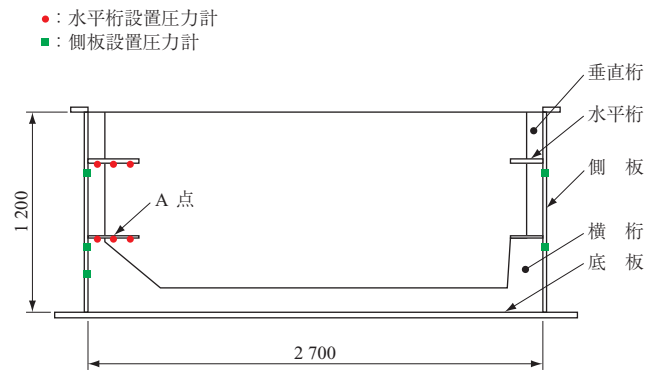
従来 IHI-SPB タンクに加わる貨液運動による荷重の再現方法として、格子法による数値計算 (FLOW-3D) を用いていた。しかし、水平桁や側面に流体が衝突する際に発生する衝撃圧を計算する場合に、不自然なパルス状の圧力が発生するなど、非現実的な解になってしまうという問題⁽³⁾があった。そこで自由表面の追跡を容易に行うことができ、スロッシング問題への適用も試みられている粒子法⁽⁴⁾を用いて、大規模模型試験との比較を行ったのでその結果を報告する。粒子法の計算ツールとしては、市販の粒子法ソフトウェアである Particle Works を用いることとした。

3.1 大規模模型試験

IHI-SPB タンクの 1/10 スケールモデルを用いてスロッシング試験を行った。ただしモデル化範囲は、縦隔壁と横隔壁によって区切られた 1/4 区画を高さ方向にも半分に区切った 1/8 区画とした。第 8 図に示すように、模型タンクの寸法は長さ 1 600 mm、幅 2 700 mm、深さ 1 200 mm であり、内部部材としては水平桁、横桁、垂直桁のみモデル化されている。小部材である防撓材や支持部材はモデル化されていない。圧力計は貨液運動による衝撃圧が発生しやすい水平桁の下面および側壁に取り付けられている。

3.2 粒子法計算結果と大規模模型試験結果の比較

第 3 表に示す条件で、水平桁下面 A 点 (第 8 図参



(注) タンク長さ: 1 600

第 8 図 大規模模型横断面 (単位: mm)
Fig. 8 Section view of large-scale model tank (unit: mm)

第 3 表 数値計算と大規模模型試験の比較条件
Table 3 Experimental and computational conditions

項目	単位	条件
動揺	-	横揺れ
振幅	度	1.5
周期	s	2.82
液位	mm	400

照) の圧力時刻歴について粒子法計算結果と大規模模型試験結果との比較を行った。また、粒子法と比較するために格子法 (FLOW-3D) でも同様の計算を行った。粒子法、格子法ともに気体部分はモデル化せず、流体部分のみモデル化している。粒子法では粒子直径を 20 mm として流体領域を離散化し、格子法では平均 1 辺 20 mm の立方体でタンク内部の空間を離散化した。

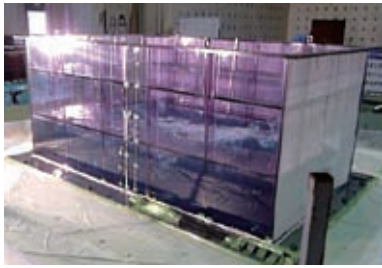
試験の静止画と粒子法計算による静止画を第 9 図に示す。本条件は振幅が小さく、穏やかな貨液運動であるが、自由表面の上下運動によって水平桁に衝撃圧が発生している。粒子法と格子法による計算結果と、大規模模型試験による A 点 (第 8 図参照) の圧力時刻歴を第 10 図と第 11 図に示す。

第 10 図、第 11 図から粒子法では衝撃圧のピーク値、作用時間、力積ともに試験結果と良い一致を示していることが確認できる。一方、格子法では試験結果にはみられない不自然なパルス状の圧力が発生しており、衝撃圧を精度良く再現できていないことが確認できる。

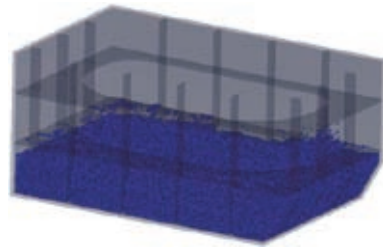
4. 結 言

IHI-SPB タンクのスロッシングに対する構造安全性の源泉となっている同調回避設計の必要性和、粒子法を用いた貨液運動による荷重の再現について紹介を行った。結論を以下に示す。

(b) 大規模模型試験



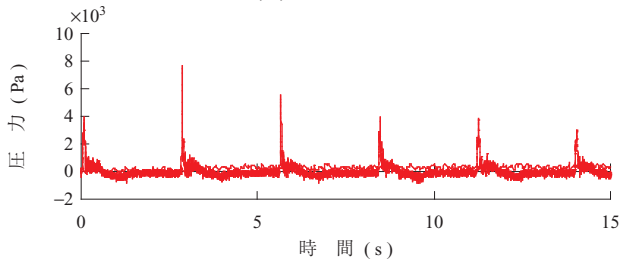
(b) 粒子法



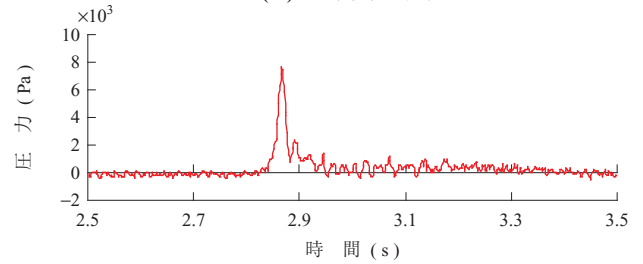
第 9 図 大規模模型試験と粒子法計算による貨液運動

Fig. 9 Liquid movement of large-scale model test and computation

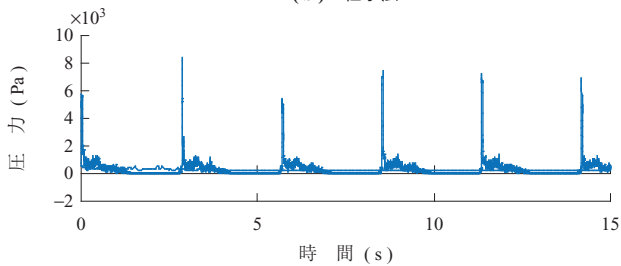
(a) 大規模模型試験



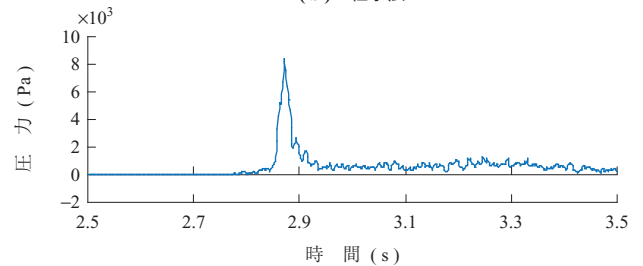
(a) 大規模模型試験



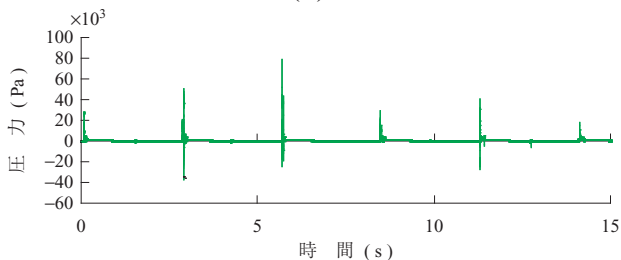
(b) 粒子法



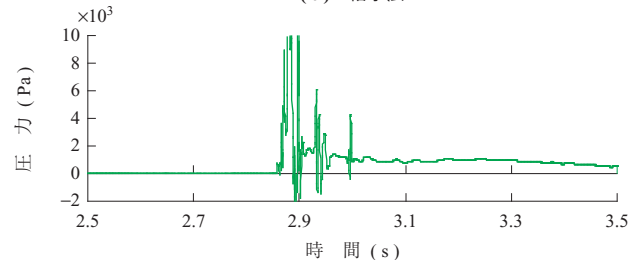
(b) 粒子法



(c) 格子法



(c) 格子法



第 10 図 試験結果と数値計算による圧力時刻歴

Fig. 10 Pressure time history derived from large-scale model test and computations

第 11 図 試験結果と数値計算による詳細な圧力形状

Fig. 11 Detailed pressure shape derived from large-scale model test and computations

- (1) IHI-SPB タンクは内部隔壁によって、同調によるスロッシングの発生を回避することができる。
- (2) 船体運動と貨液運動の同調は、激しい貨液運動を引き起こす。この際に発生するスロッシング荷重は非同調時の数倍と大きな値であり、荷重の推定が重要となる。しかし、このようなスロッシング荷重を推定するには、複雑な非線形現象などを考慮する必要があり、試験や数値計算による推定は現状では難しいと考えられる。
- (3) 船体運動と貨液運動が同調していない条件では、

貨液運動は穏やかで複雑な非線形現象は発生しない。またこの際に生じる穏やかな貨液運動による荷重は、同調時のスロッシング荷重と比べて十分に小さい。

- (4) 粒子法は穏やかな貨液運動の際に生じる衝撃圧を精度良く再現することができる。粒子法計算結果には格子法にみられる不自然なパルス状の圧力は発生しておらず、ピーク値、作用時間、力積ともに試験結果と良い一致を示す。

IHI-SPB タンクではタンク内に隔壁を設置することで同調によるスロッシングの発生を避け、試験や数値計算に

裏付けされた高度な解析技術を用いて貨液運動による荷重を高い精度で推定することで、設計における不確定要素を可能な限り排除した高い構造信頼性を実現している。

— 謝 辞 —

FLOW-3D でスロッシング計算を実施、ご助言とご協力いただいた株式会社 IHI 検査計測の蒲谷達雄氏に感謝の意を表します。また、大規模模型試験に多大なご協力をいただいた株式会社 IHI 技術開発本部 管理部の豊田真氏ならびに関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

(1) O. M. Faltinsen and A. N. Timokha : Sloshing

Cambridge University Press (2009) pp. 548 - 552

(2) H. Ito et al. : A Direct Assessment Approach for Structural Strength Evaluation of Cargo Containment System under Sloshing inside LNGC Tanks based on Fluid Structure Interaction OMAE (2008) Vol. 5 pp. 835 - 845

(3) H. Kobayakawa et al. : Dynamic Pressure Induced by Internal Liquid Motion in SPB Tank TEAM (2009) pp. 383 - 390

(4) C. Hu et al. : A Validation Study of Applying the CIP Method and the MPS Method to 2-D Tank Sloshing ISOPE (2009) pp. 198 - 204