二重船殼中型タンカーのスロッシング特性の数値解析

正員 新 開 明 二* 正員 間 野 正 己** 正員 野 中 真 治*** 正員 藤 井 正 実****

Numerical Analysis of Sloshing Problems for the Middle-sized Double Hull Tanker

> by Akiji Shinkai, *Member*, Masami Mano, *Member* Shinji Nonaka, *Member*, Masami Fujii, *Member*

Summary

This paper deals with numerical analysis of sloshing problems for the middle-sized double hull tanker. A numerical simulation method for non-linear liquid sloshing in the cargo oil tank is proposed by making up a new sloshing cord based upon the SOLA-SURF scheme and a simple two-dimensional sloshing cord. The new sloshing cord has many functions for analyzing sloshing liquid violence motions in the octagon-shaped tank fitted with centre girder, deck centre girder, deck side girder, horizontal girder etc. A series of numerical simulations are executed for cargo oil tanks of a middle-sized double hull tanker and of a single hull tanker sailing at forward speed in regular waves, and numerical calculations are executed for four model tanks in order to compare with experimental results too. By numerical simulations, it is confirmed that the sloshing cord is useful for analyzing non-linear sloshing and for estimating sloshing pressure in liquid cargo tanks of a double hull tanker.

1. 緒 言

アラスカ沖における 1989 年のタンカーの座礁事故以来 船体の二重船殼構造化が強化され、米国ではタンカーの二 重船殼構造化が義務化されるとともに、1992 年 IMO では 国際海洋汚染防止条約の新規則が採択され、二重船殼構造 または中間甲板付二重船殼構造の義務化が決定された。

二重船殼中型タンカー(載貨重量約10万トン)の構造は、Fig.1に例示するように、従来の単底構造の中型タンカー、載貨重量20万トンクラスのタンカー等にくらべ、中央荷油タンク幅が広くなりかつ荷油タンク内の内構材の減少による平滑化のため、タンク内のスロッシングの激化と大きなスロッシング圧力の発生が予測される。本報告では、この

ような荷油タンク内液体の流動特性の解明とタンク内に発生する圧力を精度よく推定する方法の開発¹¹ について,数値解析技法の適用の観点から考究するとともにスロッシング数値シミュレーション法の汎用化を計ることを目的としている。

数値解析法は、電子計算機の進歩と数値計算技術の開発にともなって飛躍的な発達をみせ、スロッシングの多くの問題に適用されている^{2/3/3}。数値解析法としては有限要素法^{4/3}、境界要素法^{5/-7/3}、ランダム・チョイス法^{8/3}、差分法^{9/-12/3}等があげられるが、その中でも差分法に関する研究が多数を占める。

差分法は流体領域をメッシュ分割し流体の運動方程式を直接数値的に解く方法であり、例えば、Hirt ら¹³⁾は marker-and-cell 法¹⁴⁾に基づき自由表面流動解析コード (SOLA-SURF)を開発している。Mikelis ら⁵⁾はこの SOLA-SURF を拡張して阻止板・斜壁を有するタンク内のスロッシングを計算している。荒井¹⁰⁾はオリジナルの marker-and-cell 法を用いた解析コードを提示し阻止板付き矩形タンク等の計算を行っている。また、江口¹¹⁾は境界条件を工夫しスロッシング衝撃圧を求めるアルゴリズム

原稿受理 平成6年7月8日 秋季講演会において講演 平成6年11月10,11日

^{*} 九州大学工学部

^{**} 近畿大学工学部

^{*** (}株)大島造船所

^{**** (}株)名村造船所

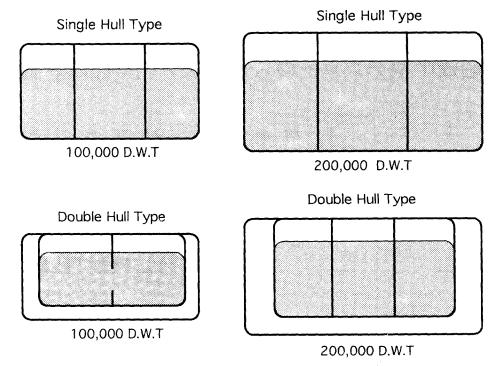


Fig. 1 Rough midship sections for double hull tankers and single hull tankers

を提示しタンカーの荷油タンク内のスロッシングを計算している。著者の一人¹²⁾ は、marker-and-cell 法に類似の方法を適用して、軽目孔を有する阻止板の影響を考慮できるように解析コードを修正している。最近では3次元スロッシング問題の解析例¹⁵⁾¹⁶⁾ も報告されているが、各種のタンク構造への適用にはまだ課題を残しているようである。いずれの解析コードでも、メッシュ分割と時間ステップの設定が境界条件の取り扱いと関連して解の安定性に微妙に影響を与えるなど、公表されている計算技術のみではとらえることができない"know-how"が計算機プログラムの作成に際し存在するようである。

本報告では、二重船殼中型タンカーのスロッシング特性を明らかにする目的でスロッシング解析コードを新たに作成する。計算時間等の制約から問題を2次元スロッシング問題に限定し、二重船殼中型タンカーの中央荷油タンクの構造の特徴である、内構材の減少による平滑化と、種々のタイプのタンク構造いへの適用のために、斜壁、センターガーダー、デッキガーダー、水平ガーダー等の影響を適切に考慮できるように汎用化を考えアルゴリズムの改良を計る。本解析コードは、SOLA-SURF¹³⁾を基礎にしまた簡易化されたスロッシング解析コード¹²⁾の計算技法を取りいれて作成される。また、実船のタンクについて数値シュュレーション計算を実施して二重船殼中型タンカーのスロッシング特性を調査し、別途に実施された模型タンク実験いた対応する数値計算を行って本解析コードの有効性・汎用

性について考察した結果を報告する。

2. 二重船殼中型タンカーのタンク構造

二重船殻中型タンカーのタンク構造は、船側と船底が二重船殻構造であり中央の荷油タンクは幅広で、内面が平滑となる。種々の形式のタンク構造"があり、中心線位置にSwash 隔壁を有するタイプあるいは、経済的な面から、中心線位置に深いセーターガーダーと深いデッキセンターガーダーを配置しさらに2条のデッキサイドガーダーを付加するタイプ等がある。一般にホッパーとショルダー部に斜壁が存在し広い意味での八角形の横断面形状をしており、また荷油タンクの境を形成する横隔壁には水平ガーダーが配置されている。これらのタンク構造の特徴を盛り込んだスロッシング解析コードの作成が必要となる。

3. スロッシング数値解析法

3.1 基礎方程式

Fig. 2 に示すような 2 次元タンク内の液体 (以下流体)のスロッシング問題を考える。流体領域を V,自由表面を S_F ,タンク内壁を S_W とする。タンクは空間に対して並進運動速度 \vec{U} および角速度 \vec{Q} の運動をしているものとする。ここに,空間に固定された座標系を O-XY,タンクに固定された座標系を O-XY,タンクに固定された座標系を O-XY と定義する。例えば,矩形タンクの場合には,タンク底に一致させて x 軸を,また鉛直上方に y 軸をとる。流体は非圧縮性の 2 次元流れと仮定すれ

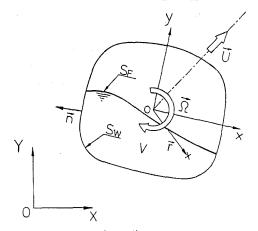


Fig. 2 Co-ordinate systems

ば、流体運動の基礎方程式は以下に示す連続の式と Navier-Stokesの方程式である。

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial x} = \overline{\nu} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial y} = \bar{v} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g_y \quad (3)$$

ここに、u および v はそれぞれ流体の速度の x 方向成分および y 方向成分である。また、p を圧力、 ρ を流体の密度として圧力関数 $\phi=p/\rho$ を定義する。 \overline{v} は動粘性係数である。 g_{x},g_{y} は流体粒子に誘起される加速度成分を意味し、横揺角 θ (座標原点 ρ に関して ρ が作用するときに次式のように与えられる。

$$g_x = q \sin \theta + x\dot{\theta}^2 - y\ddot{\theta} - 2v\dot{\theta} - \ddot{\eta} \tag{4}$$

$$g_y = -g\cos\theta + x\ddot{\theta} + y\dot{\theta}^2 + 2u\dot{\theta} - \ddot{\zeta} \tag{5}$$

ただし、g は重力加速度を、""=d/dt、 $""=d^2/dt^2$ を意味する。

タンク壁面で境界条件は、動粘性係数が0のとき free slip として取り扱いタンク壁面に normal な方向の速度成分を0とし、動粘性係数が非零のとき no-slip として取り扱いタンク壁面に normal な方向の速度成分ならびに平行な方向の速度成分を壁面上で0とする。内構材の面上での条件はタンク壁面と同様にして取り扱う。自由表面に於ける境界条件は、自由表面上で圧力一定(大気圧)とし、運動学的自由表面条件を満足させるものとする。また、初期条件として、流体は静止しているものとし時刻0より所要の加振運動に応じて流動を開始するものと仮定する。

3.2 スロッシング解析コード

タンク内の液体の流動を差分法で解析することを考える。解析のアルゴリズムとして、SOLA-SURF¹³⁾を採用し、スロッシング計算に必要な計算技法は12)より援用する。 ここでは、二重船殻中型タンカーのスロッシング解析のた めに必要な留意点のみを説明する。

SOLA-SURF を用いるために,タンク内部領域をセルに分割してスタッガード格子を採用し,流体運動の物理量即わち圧力関数 ϕ はセルの中心で定義し $\phi_{i,j}$ と表示し,速度 u および v についてセルエッジで定義しそれぞれ $u_{i,j}$ 、 $v_{i,j}$ と表示する。時間に対して前進差分近似,空間に対して中心差分近似と風上差分近似を用いて(1)~(3)を差分表示すれば次のようになる。

$$D_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{\delta x} (u_{i,j}^{n+1} - u_{i-1,j}^{n+1}) + \frac{1}{\delta y} (v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j-1}^{n+1}) \to 0$$

$$(6)$$

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n}}{\delta t} = -\frac{1}{\delta x} \left[\left(\frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2} \right)^{2} + a_{ca} \left| \frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2} \right| \left(\frac{u_{i,j} - u_{i+1,j}}{2} \right) - \left(\frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2} \right)^{2} - a_{ca} \left| \frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2} \right| \left(\frac{u_{i,j} - u_{i,j}}{2} \right) \right] - \frac{1}{\delta y} \left[\left(\frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2} \right) \left(\frac{u_{i,j} - u_{i,j+1}}{2} \right) + a_{ca} \left| \frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2} \right| \left(\frac{u_{i,j} - u_{i,j+1}}{2} \right) - \left(\frac{v_{i,j-1} + v_{i+1,j-1}}{2} \right) \left(\frac{u_{i,j-1} + u_{i,j}}{2} \right) + \bar{v} \left[\frac{(u_{i,j-1} + v_{i+1,j-1})}{\delta x^{2}} \right] - \frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}}{\delta x} + g_{x}$$

$$\frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^{n}}{\delta t} = -\frac{1}{\delta x} \left[\left(\frac{u_{i,j} + u_{i,j+1}}{2} \right) \left(\frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2} \right) - \left(\frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2} \right) - \left(\frac{u_{i-1,j} + u_{i,j+1}}{2} \right) \left(\frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2} \right) - \left(\frac{u_{i-1,j} + u_{i-1,j+1}}{2} \right) \left(\frac{v_{i-1,j} + v_{i,j}}{2} \right) - \frac{1}{\delta y} \left[\left(\frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2} \right) \left(\frac{v_{i-1,j} + v_{i,j}}{2} \right) - \frac{1}{\delta y} \left(\frac{v_{i,j} + v_{i,j+1}}{2} \right) - \left(\frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2} \right) - \frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2} \right) - \alpha_{ca} \left| \frac{v_{i,j} - v_{i,j+1}}{2} \right| \left(\frac{v_{i,j-1} - v_{i,j}}{2} \right) - \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\delta x^{2}} + \frac{v_{i,j}}{\delta y^{2}} \right] + \bar{v} \left[\frac{(v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j})}{\delta x^{2}} \right] - \frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}}{\delta y^{2}} + g_{y}$$
(8)

上付き添え字nは時刻 $n\Delta t$ を表わすが、(7)および (8)の右辺の上付き添え字は省略している。下付き添え字i,jは、セルの番号に対応している。 α_{ca} は上流差分の比率を与える重み係数であり $\alpha_{ca}=0$ のとき差分式は中心差分となり、 $\alpha_{ca}=1$ では2次の風上差分となる。

流速は(7)および(8)の差分表示式を解くことにより求められるが、その結果を(6)に代入しても一般に連続の式を満足しない。そこで、各セルにおいて定義される圧力に関する変数 ϕ の値を繰り返し調節することにより、内部領域全体において(6)を満足させる。即わち、(7)および(8)で与えられる流速の値を第1近似として、次式(9)により流速および圧力を境界値等を考慮して計算し $(D_{i,i})$ が許容誤差範囲内に入ったときの流速と圧力を解とする。

$$\phi_{i,j} \rightarrow \phi_{i,j} + \delta \phi_{i,j}, \ \delta \phi_{i,j} = -D_{i,j} / \left[2\delta t \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right) \right]$$

$$u_{i,j} \rightarrow u_{i,j} + \frac{\delta t \delta \phi_{i,j}}{\delta x}, \ u_{i-1,j} \rightarrow u_{i-1,j} - \frac{\delta t \delta \phi_{i,j}}{\delta x}$$

$$v_{i,j} \rightarrow v_{i,j} + \frac{\delta t \delta \phi_{i,j}}{\delta y}, \ v_{i,j-1} \rightarrow v_{i,j-1} - \frac{\delta t \delta \phi_{i,j}}{\delta y}$$

$$(9)$$

なお、実際の演算では、 $\delta\phi_{i,j}$ に加速緩和係数 \bar{a} を乗じて計算を行う。

以上の計算は次節で説明する境界条件を満足させつつ実 行され,時間ステップごとに繰り返すことにより,時々刻々 の圧力分布,速度分布,自由表面形状等が決定される。

3.3 境界条件の取り扱い方

3.3.1 自由表面条件

自由表面条件を満足させるために自由表面を含むセルの 圧力は、そのセルに隣接する流体を含むセルの圧力との線 形補間により、自由表面上の圧力が0となるように設定す る。自由表面形状は、質量を持たない仮想的粒子であるマ ーカーを追跡することにより得られる。マーカーの移動速 度は先に得られた流速の線形内挿によって求められ、これ より時々刻々の自由表面形状が次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = v \tag{10}$$

これを差分表示すると次式のようになる13)。

$$H_{i}^{n+1} = H_{i}$$

$$+ \Delta t \left[-\frac{1}{4\Delta x} \{ (u_{i,JT} + u_{i-1,JT}) (H_{i+1} - H_{i-1}) - \gamma | u_{i,JT} + u_{i-1,JT} | (H_{i+1} - 2H_{i} + H_{i-1}) \} + \bar{h} v_{i,JT} + (1 - \bar{h}) v_{i,JT-1} \right]$$

$$\bar{h} = \frac{H_{i} - (JT - 2) \Delta y}{\Delta y}$$
(11)

ここに、u, v はマーカーの存在する位置における流体粒子の持つ速度成分であり、h は自由表面の降起量である。

3.3.2 タンク壁等境界条件

タンク壁面に対する境界条件は、タンク内部領域のセルを囲む仮想セルにおいて定義する速度成分を free slip に対しては正鏡像をまた no slip に対しては逆鏡像を適切に設定することにより満足させる。タンク壁面に対する境界条件の設定の方法について説明したが、タンクの形状によっては、タンク壁面が斜め(斜め境界)となる場合、内構材が存在する場合等、特殊な境界があり、その場合には境

界条件の設定のため,修正の必要がある。以下,特殊な境 界の取り扱い方を説明する。

タンク壁面が斜め(斜め境界)の場合には、領域のメッシュ分割のセルエッジは境界と平行でない。その場合には、斜め境界となっているタンク壁に対して垂直方向の流速成分 u_N を近似的に次式で与える¹³⁾。

$$u_{N} = -\frac{1}{4\Delta x} (u_{i,JB} + u_{i-1,JB}) (HB_{i+1} - HB_{i-1}) - \bar{\xi} v_{i,JB} + (1 - \bar{\xi}) v_{i,JB-1}$$
 (12)

ただし,

$$\bar{\zeta} = \{HB_i - (JB - 2)\Delta y\}/\Delta y$$

上式は、各計算ステップで直接算出されるセル辺の中点における速度を用いて近似的にタンク壁に垂直方向の流体の速度成分を与えており、JB はタンク壁の存在するセルの y 方向の番号、HB はタンク壁の y 座標を示している。この式において u_N が 0 となるように φ を調節することによりタンク壁(斜め境界)の境界条件を付与している。

タンク上部の壁面(天板または甲板)の境界条件はタンク壁の境界条件と同じであるが、スロッシングが緩やかである場合には、流体は天板に接しておらず境界条件を付与する必要がない。スロッシングが激しくなり流体の自由表面が天板に接触すると流体に浸っている壁面にはタンク壁の境界条件を付与する必要がある。このような現象(衝撃的)は、極短時間の間に起きまた短時間の内に流体の自由表面は天板から離れて壁面は空中に曝される。即わち、自由表面がタンク上部の壁面に衝突する場合について自由表面条件からタンク壁面条件への境界条件の変化を取り扱うために、壁際にある厚さ(たとえば格子間隔の1/2)のバッファーをもうけその厚さ以内に壁面に水面が近接したときに、タンク壁面に垂直な速度を零とする条件と自由表面で大気圧を与える条件を重み係数で補間して与える方法¹¹⁾を採用する。

内構材の境界条件もタンク壁面の境界条件と本質的に同等である。内構材はセルとセルの間に設定する。内構材の近傍のセルにおいて定義される速度および圧力関数を計算する際に、内構材が設定された位置に対して鏡像あるいは逆鏡像をとる。以下、T形内構材を例にとり説明する。Fig. 3 には x 方向の速度成分 u を差分演算により計算する際に用いる関数値の一群を示している。なお、内構材の形状が平板、逆付き山形材等である場合、内構材に軽目孔がある場合の取り扱いも上述と同様な方法により境界条件を付与することができる¹²。

水平ガーダーの境界条件もタンク壁面の境界条件と同じであるが、自由表面が水平ガーダーに接触、非接触を繰り返す場合に少しアルゴリズムの修正が必要となる。即わち、流体が水平ガーダーに接触すると同時に機械的にタンク壁条件を水平ガーダーの浸水面に付加する。また、水平ガーダーの先端において自由表面隆起が水平ガーダーより上昇

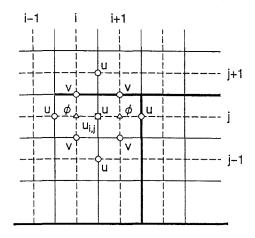


Fig. 3 Finite difference variables used in calculating x-directional velocity u

するときにある高さまで達すれば水平ガーダーの下面で上 昇が止っている仮想的粒子を水平ガーダーの上面に再配置 する。自由表面隆起が下降するときも水平ガーダーの周り の流体の挙動に合わせてアルゴリズムに小修正を施してい る。

デッキガーダーの境界条件は、流体がデッキガーダーと 接触すると同時に機械的にタンク壁境界条件をデッキガー ダーの浸水面に付加する。

3.4 数値解の安定化

タンク内の流体がある程度激しいスロッシング流動を呈する場合には、本解析コードを用いても、計算シミュレーションは数値的不安定により突然止る場合がある。例えば、自由表面が天板に衝突した場合、第1の衝撃の後の流速ベクトルが非常に大きな値として得られ、数値解として不安定となり衝撃の第2ピークが得られなくなる。数値解が不安定となるパターンを分析すると、i)流体が運動している時に流体から見て相対的に、剛な境界(タンク内壁、内構材の存在、天板の存在等)の形状が突然変化する場合、ii)流動が激しく自由表面の傾きが大となる場合、に分けられる。

i)の場合に数値解を安定化するための処方として、剛な境界条件をできるだけ忠実に付与するためにメッシュ分割を密にするとともに、適切な時間キザミの大きさを選定することが基本であるが、SOLA-SURFが、Cartesian座標系を前提として構築されていること、また座標系に対して斜めの境界の取り扱いが近似法に依っていること等の原因により、メッシュ分割を密にする処方にも限界がある。本解析コードでは、スロッシング現象に合わせてメッシュ分割を選択し、計算時間との関連から制約があるが、選択されたメッシュ分割に対して、時間キザミを自動的に、数値解が安定化するまで(安定化を達成できないケースも有る)、小さくするルーチンを組込んでいる。ii)の場合の数

値解の不安定の原因は、自由表面の運動が激しく自由表面 の運動速度が非常に大きくなる(物理現象としてスプレー 等に対応) ことと、運動速度が大きくなることにより自由 表面の傾きがある大きさを越えることに基づくと思われ る。3.3.1 で説明した自由表面条件の差分表示式は近似法 に依っているので、理論的には、自由表面の傾きが約45度 を越えると適用できないことになるが、実際には多くの場 合に自由表面の運動がさほど大きくない範囲では自由表面 の傾きが45度を越えても十分に安定な数値解が得られる。 しかし, i)の原因と競合して自由表面近傍の流速ベクトル が非常に大きくなりそのために自由表面の傾きが過大とな って自由表面の大きな傾斜が復元しなくなる場合に数値解 が不安定となる。そこで,自由表面の傾斜がある大きさの 角度(例えば,75度)を越える個所については、自由表面 条件の中の $\partial h/\partial x$ の差分を取るときに、隣接するメッシュ 間で自由表面隆起量に重みをつけて自由表面隆起の x 軸 方向の微分を緩和して演算を行うように修正した。このよ うな修正を行うことにより、自由表面の傾きが大きすぎる 場合でも、自由表面の傾きが多くの場合において復元され ることになり安定した数値解が得られる。

演算のための諸係数 $(\alpha_{ca}, \tilde{\omega})$ も数値解の安定化に影響するが、文献 13) で推奨されている値を採用し変化させていない。

4. 数値計算例と考察

3.で示したスロッシング解析コードを用いて,二重船殻中型タンカーのタンク (模型タンクと実船タンク) 内の流体のスロッシングを解析し,タンク形状の影響,内構材の影響等を調査した。流体は、 15° Cの清水 (動粘性係数 $\bar{\nu}=1.14\times10^{-6}$) として計算を行った。

4.1 実船における規則波中数値解析結果

実船タンクの内部領域をセル分割した。二重船殼タンカーについては $(Nx \times Ny)$ =(38×19),シングルハルタンカーについては $(Nx \times Ny)$ =(42×20)を採用している。実船タンクの寸法を Fig. 4 に示す。

規則波中を航行する実船のカーゴタンク内のスロッシングの計算を実施した。船は上下揺,縦揺,左右揺,船首揺および横揺の5自由度(前後揺は小さいとして無視する)の運動を伴い,一定の平均速度と一定の平均進行方向を保って規則波中を前進するものと仮定し,船体運動とタンク内液体流動との間の連成の影響は小さいと仮定して無視すれば,規則波中の船体運動方程式はストリップ法に基づいて与えられる。得られた連立微分方程式を解けば5自由度の運動の周期解が求められる。

スロッシング解析を2次元問題として取り扱うために, 船体運動を縦運動系(上下揺,縦揺)および横運動系(左 右揺(船首揺に基づく成分を含む),上下揺(縦揺に基づく 成分を含む),横揺)に分けてそれぞれの運動系が同時に矩

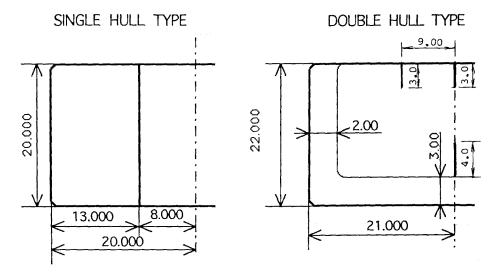


Fig. 4 Dimensions of cargo oil tanks for a double hull tanker and a single hull tanker

形タンク(2次元即わちタンク中心位置の横断面あるいは中心線縦断面内のスロッシングを考える)に作用する場合を考える。スロッシング解析は初期値・境界値問題として取り扱うので,初期条件として,波の谷が船体中央に来た時を時刻0として、時刻0以前ではタンク内液体は静止しており、船体運動はそれぞれの位相差を持たせて順次加振することとした。

計算対象船 D 船 (船長 233.3 m, 幅 42.0 m, 深さ 22.0 m, 吃水 15.0 m) のカーゴタンク¹⁾ についてスロッシングの計算を行った。カーゴタンクは No.2 Tank (タンクの長さ 24.15 m, 幅 38 m, 高さ 18.65 m, Midship よりタンク中心までの水平距離 68.64 m) である。また,船体運動としては,波との出会角 $\chi=90^\circ$,波長/船長比 $\lambda/L=1.0$ および波振幅 $h_0=5$ m について線形ストリップ法に基づいて計算された応答関数を用い,液深率 75%の場合の数値計算例を Fig.5 に示す。図には対応するシングルハルタンカーの計算結果を合わせ示している。スロッシングに対して従来のタンカーの 2 条の縦通隔壁が有効な阻止効果を与えていることがわかる。

Fig. 6 には流速ベクトルと流体圧力分布を比較して示している。船体運動が大きく計算条件がかなり厳しいが,自由表面がデッキサイドガーダーを通過しても安定な解が得られており,二重船殻中型タンカーのデッキサイドガーダーと甲板の隅所に大きな圧力が発生している様子がわかる。

4.2 模型タンクについての数値解析結果

模型実験"で採用されたタンクの中より4つのタンクモデル (R1モデル, R3モデル, R5モデルおよびP2モデル)を選定し、計算対象のタンクとした。各タンクの形状, 内構材等の諸寸法をFig.7に示している。図には実験の圧

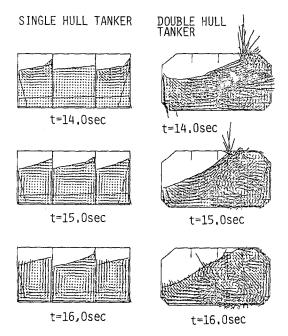
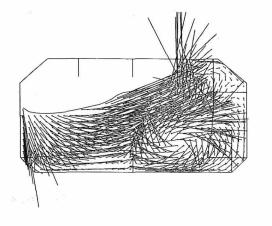


Fig. 5 Numerical simulation of liquid sloshing in No. 2 cargo oil tank in regular waves

力計測位置(計算出力位置)が付記されている。ただし、数値解析では2次元タンクを想定しているので各タンクの寸法は模型タンクの幅と高さの内寸を示しており、奥行はない。内構材の寸法はできるだけ模型の内構材寸法に一致させているが厚さは0として内構材の位置のみを合わせている。

タンク内部領域をセルに分割する。主として, セル分割



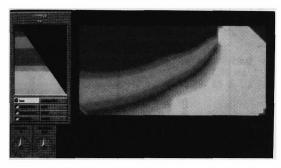


Fig. 6 Velocity vectors and pressure distribution in liquid domain of double hull tanker's cargo oil tank at time $t=14.20\,\mathrm{sec}$

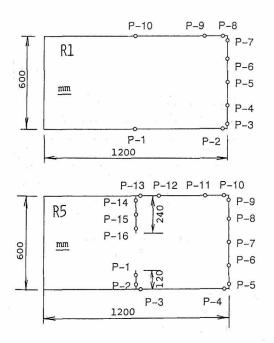
数 (幅方向の分割数 Nx×高さ方向分割数 Ny)= (40×20) を採用した。解の精度が満足されるときには計算時間を節約するために (20×10) 等を用い,内構材を表示し易いようにするためにこれらと異なるセル分割を採用した例もある。

初期条件として、流体は静止しているものとして時刻 0 より所要の加振運動を作用させることとした。並進運動および角運動を時刻 0 より余弦波状に規則的な加振運動としてまた位相差があればそれを考慮して与えている。並進運動速度、角速度、角加速度等は並進運動および角運動から計算されるそれぞれの値をもって時刻 0 から開始して与えている。

シリーズ計算によるスロッシングの数値シミュレーション解析例を Fig. 8~12 に示している。

Fig. 8 には、R 3 タンクモデルについて液深 60%の場合に横揺(振幅 20°、加振周期 1.45 秒)を与えた時の自由表面の変動の様子とショルダー部の P-6 の位置の圧力変動の時刻歴の例を示している。自由表面がその位置に接触することによる衝撃的な圧力変動が明示されている。

Fig. 9 には、R 5 タンクモデルについて液深 85%の場合に左右揺 (振幅 50 mm、加振周期 1.33 秒)を与えた時の自由表面の変動の様子とデッキセンターガーダーの甲板よりの位置 P-14 の両サイドにおける圧力変動の時刻歴の例を示している。自由表面がガーダーと甲板の隅部に達することによる衝撃的な圧力変動が明示されており、同時刻における流速ベクトルを Fig. 10 に示している。



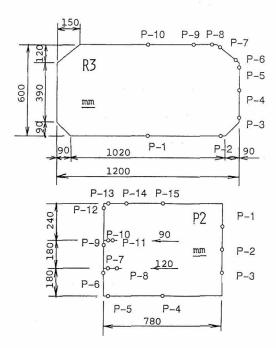
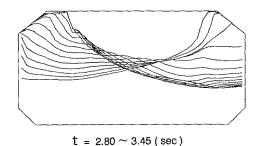


Fig. 7 Dimensions and calculating points for model tanks (R 1, R 3, R 4, R 5 model)



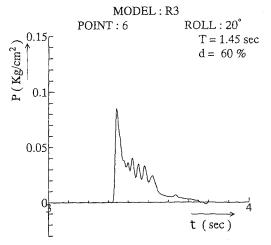


Fig. 8 Time history of sloshing pressure induced at the point 6 of R3 model tank and free surface configurations

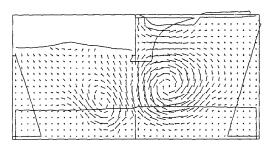
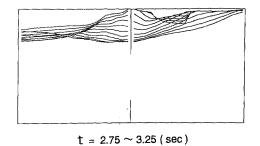


Fig. 10 Velocity vectors in R 5 model tank at time 3.14 sec (85% filled)

Fig. 11 には、P2 タンクモデルについて液深 75%の場合で縦揺(振幅 10° 、加振周期/タンクの 1 次固有周期= T/T_r =1.0) を与えたときの流速ベクトルを示しており、水平ガーダーが流場におよぼす様子がよく示されている。

Fig. 12 には、4 つのタンクモデル(R1モデル、R3モデル、R5モデルおよびP2モデル)についてタンク内壁、内構材表面等の数個所の位置に誘起される圧力変動の時刻歴を比較して例示している。各場合とも衝撃的な圧力変動が



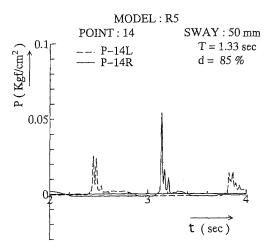


Fig. 9 Time histories of sloshing pressure induced at both sides of the point 14 of R 5 model tank and free surface configurations

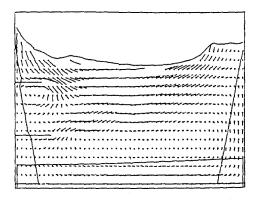


Fig. 11 Velocity vectors in P2 model tank at time 2.40 sec (75% filled)

認められる時刻の前後の極短い時間の変動の様子を示している。衝撃が発生する位置は、甲板とタンク壁の結合部、ショルダー部、デッキセンターガーダー、デッキサイドガーダー、水平ガーダー等である。衝撃的圧力変動のピーク値は容易にタンク底の静圧と同じオーダーとなることが示

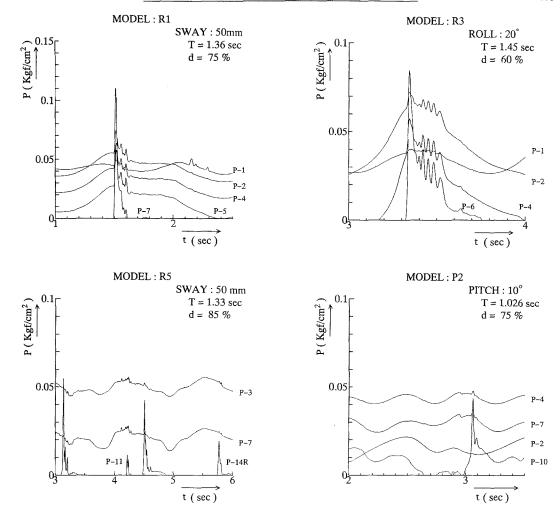


Fig. 12 Time histories of sloshing pressure

されている。一般に、衝撃が発生した位置から離れた位置 でも圧力変動の衝撃的徴候が確認されるがその影響は位置 が離れるにしたがい減少する。その減少の度合は内構材が ある場合は大きい。

4.3 スロッシング特性と解析コードの適用範囲

本スロッシング数値解析コードによりどの程度までスロッシング特性の解析が可能であるかを明示するために、スロッシング模型実験の結果"を参照しながら、スロッシング現象の分類を試みる。

模型タンク内の液体の流動は、タンクの寸法、液深、加 振運動の振幅、加振運動の周期、天板の有無、内構材の有 無等の各組合わせによって種々の様相を呈するが、実験の ビデオカメラによる撮影結果を画像処理し分析しスロッシ ング現象として特性を列記すれば、次のような現象が観察 される。

[自由表面微小振幅揺動 (Sine wave), 駆け上がり (Run

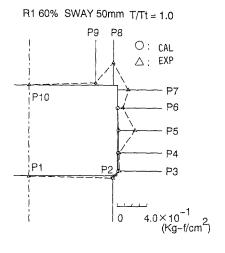
up),波崩れ (Breaking),飛沫 (Spray),泡 (Foam),気泡 (Bubble),内構材影響 (Buffle plate effect),天板影響 (Ceiling effect),渦 (Vortex) 等]

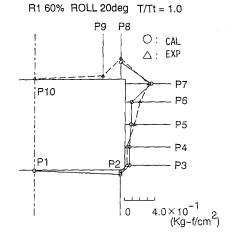
これらの特性は、次の3つに分けて考えることができる。

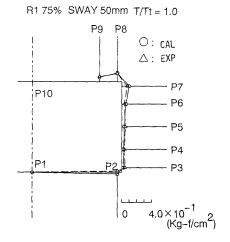
- (i) 線形現象 (Linear) [L]
- (ii) 非線形現象 (Non-linear) [NL]
- (iii) 超非線形現象 (Super-non-linear) [SNL]

即わち、線形の境界値問題で、流体の運動ならびに自由表面の隆起が小さい場合にその現象(微小振幅揺動等)を線形現象(Linear)と称し、流体の運動の基礎方程式が非線形でありこれらの基礎方程式を用いなければ解明できない現象(駆け上がり、内構材影響、天板影響、渦等)を非線形現象(Non-linear)と称し、また、一般に解析が困難であると思われる現象(波崩れ、飛沫、泡、気泡等)をまとめて超非線形現象(Super-non-linear)と称する。

本解析コードでは、(i)と(ii)の現象の解析は十分に可







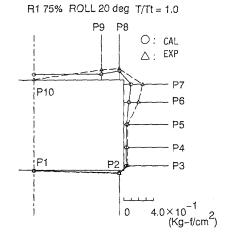


Fig. 13 Pressure distributions induced on the tank wall (R 1)

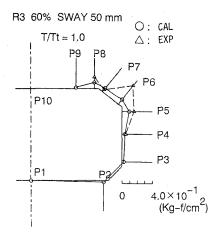
能であり、また(iii)の現象もその現象の発現直前まで解析可能である。(iii)の現象の発現後も数値シミュレーション計算は見掛け上継続するが、少し長い時間計算を続けると質量保存則の維持等で実際の物理現象との差異が大きくなる。解析コードの中に、(iii)の現象の発生を緩和するアルゴリズムを導入することにより物理現象との整合性を保たせることは、自由表面条件の取り扱いの処で説明したように、可能であるが、このような処方を多用するとアルゴリズムの基本を問う問題になるので、アルゴリズムの改良は3.で説明した程度に止めた。

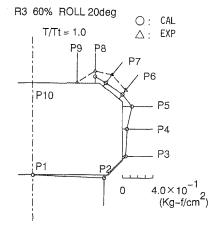
本解析コードの適用範囲を示すために、数値シミュレーション結果と模型実験の結果を比較して Fig. 13 および 14 に示す。R 1 タンクと R 3 タンクについて、それぞれ左右揺あるいは横揺の加振を受けるときのタンク内壁に誘起される圧力ピーク値の空間分布を示している。実験の結果では圧力の時刻歴を統計解析し 1/10 最大平均値が求められて

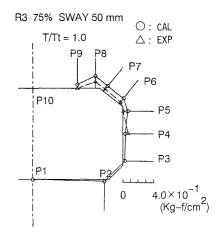
いる¹⁾。いずれもタンク内の流体は激しいスロッシングを繰り返しており(iii)の現象が発生している。数値シミュレーション結果では計算で求められた圧力の時刻歴の中で第2番目のピーク値即わち一回目の衝撃が発生し辛うじて(iii)の現象の発生が許容範囲にあり続いて二回目の衝撃が発生したときの圧力の値を示している。図によれば、圧力の空間分布について定性的に両者の傾向の一致度は良好である。

5. 結 言

二重船殻中型タンカーのスロッシング問題を解析するために、スロッシング解析コードを新たに作成した。解析コードは SOLA-SURF スキームを基礎にして、二重船殼中型タンカーの荷油タンクの特徴である、深いセンターガーダー、深いデッキセンターガーダー等の内構材の影響を考慮できるようにアルゴリズムの改良を行った。規則波中を







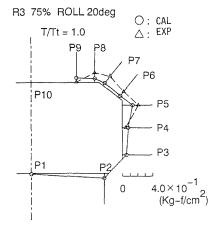


Fig. 14 Pressure distributions induced on the tank wall (R 3)

航行する実船の荷油タンク,各種の形状を有する模型タンクについて数値シミュレーション計算を実施した。得られた主要な結論は次の通りである。

- (i) 本解析コードにより、二重船殼中型タンカー特有 の構造を有する荷油タンクについては、汎用的に2次元ス ロッシムグ解析が可能である。
- (ii) 非線形性がかなり大きい場合にもスロッシングの 安定した解が得られる。数値計算結果と実験結果との一致 度はかなり良好である。
- (iii) 二重船殻中型タンカーの荷油タンクの特徴である,深いデッキセンターガーダー,デッキサイドガーダー,水平ガーダー等に衝撃的圧力変動が誘起され、そのピーク値は容易にタンク底の静圧と同レベルに達する。
- (iv) 本解析コードを利用する場合には,スロッシング 特性を分類し適用範囲を見極めることにより,より有効利 用が可能である。

本研究は日本造船研究協会第 215 部会の課題研究の一つ

として実施された。研究の遂行にあたり多大の御配慮を頂いた部会代表幹事西村弘道氏(常石造船(株)),第2分科会主査杉山和雄氏((株)名村造船)をはじめ有益な御討論と御教示を頂いた委員各位に心より感謝申し上げます。また,解析コード作成に助言を頂いた山口 悟氏(現在,九州大学応用力学研究所),数値計算に精力的に協力された玉井秀一郎氏,大石桂三氏,下元英司氏に謝意を表します。本計算は,九州大学大型計算機センターにFACOM M1800/20,OS:MSP-EX ならびにワークステーション(mips RS 3330)を用いて実行されたことを付記し関係各位に感謝します。

参考文献

- 二重船殻中型タンカーの荷重・応力に関する研究, 第215 研究部会(第三年度報告書)(第2分冊)(第 2分科会スロッシング),(社)日本造船研究協会 (1994)
- 2) C. von Kerczek: Numerical Solution of Naval

- Free-Surface Hydrodynamics Problems, Proceedings, First International Conference on Numerical Ship Hydro-dynamics (1975)
- 3) 瀬戸秀幸:非線形スロッシングの数値計算,船舶数 値流体力学フォーラム,船舶数値流体力学フォーラ ム,船舶数値流体力学研究会(1987)
- T. Nakayama and K. Washizu: Nonlinear Analysis of Liquid Motion in a Container Subjected to Forced Pitching Oscillation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15 (1980)
- 5) 新開明二, 野津康生, 山口賢二, 福田淳一: 3次元スロッシング問題の数値解析, 西部造船会々報, 第64号 (1982), 第66号 (1983)
- 6) 井関俊夫, 新開明二:高次要素を用いた境界要素法 による非線形スロッシング問題の解析, 日本造船学 会論文集, 第 163 号 (1988)
- 7) 井関俊夫, 新開明二, 中武一明: 高次要素を用いた 3次元スロッシング問題の境界要素解析, 日本造船 学会論文集, 第166号 (1989)
- 8) 新開明二,井関俊夫:浅水タンク内スロッシング問題の数値解析ーランダム・チョイス法の応用例と二, 三の考察一,西部造船会々報,第76号(1988)
- 9) N. E. Mikelis, D. W. Robinson: Sloshing in Arbitrary Shaped Tanks, 日本造船学会論文集, 第 158 号 (1985)

- 10) 荒井 誠:液体貨物スロッシング圧の実験と数値解 析,日本造船学会論文集,第155号(1984)
- T. Eguchi and O. Niho: A Numerical and experimental study of sloshing problem, Proceeding, Second International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Marine and Offshore Industries (CADMO 88) [Marine and Offshore Applications], Southampton (1988)
- 12) 新開明二, 井関俊夫, 山口 悟, 新宅英司, 岩本才次: 阻止板付きタンク内の液体スロッシングの解析, 西部造船会々報, 第78号 (1989), 第79号 (1990)
- 13) C. W. Hirt, B. D. Nichols and N. C. Romero: SOLA—A Numerical solution algorithm for transient fluid flows, Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-5852 (1975)
- 14) F. H. Harlow and J. E. Welch: Numerical Study of Large-Amplitude Free-Surface Motions, The Physics of Fluids, Vol. 9, No. 5 (1966)
- 15) M. Arai, L. Y. Cheng and Y. Inoue: Numerical Simulation of Impact Load due to Liquid Cargo Sloshing, 日本造船学会論文集, 第 171 号 (1992)
- 16) 長浜光泰, 永浜信一, 根角幸明, 山森隆江, 堀 徹: タンク壁適合座標系による3次元スロッシングの数 値解析, 日本造船学会論文集, 第172号 (1992)