二重船殻構造モデルタンクよりの油流出—Ⅱ.

— 流出油量の予測 —

山口 勝治*・山之内 博*

Oil Spills from Model Tanks with Double Hull—Ⅱ.

— Prediction of Oil Outflow —

Katsuji YAMAGUCHI and Hiroshi YAMANOUCHI

Abstract

The method to predict an amount of oil outflow from a bottom ruptured ship tank of double hull is presented basing on hydraulic balance of inside and outside of the tank. The amount of oil outflow predicted by the model is shown to be highly sensitive to difference between the oil level and the draft, the cross sectional area of the oil tank, the oil density, the structure of the double bottom and the non-dimensional water layer thickness.

Non-dimensional water layer thickness α in the double hull have been measured for VLCC 1/50 scale model tank with double hull under the following conditions: double bottom heights=double side widths=0.02, 0.04 and 0.06m, oil tank cross sectional areas=0.26 and 0.52m², double bottom cross sectional areas=0.26 and 0.52m², double side cross sectional areas=0.009~0.054m², initial oil levels=0.2~0.5m, draft=0.2~0.45m and simulated puncture size=71mm ϕ .

The empirical correlations of α have been developed.

1. はじめに

1989 年 3 月アラスカ沖で起こったエクソンバルディーズ号の座礁に伴う環境汚染事故が契機となって、事故時に生じる船体破孔からの大量油流出を防止できるような船体構造が注目されるようになってきた。タンカーの大量油流出事故を大幅に減少させるため、1992 年国際海事機関 (IMO) は新造タンカーに対し、ダブルハル船体構造またはミッドデッキ船体構造の採用を義務付けることを決定し、1993 年 7 月より実施されることとなった。今後は海洋汚染を引き起こすようなタンカー事故は減少するものと期待される。しかしダブルハルタンカーでも座礁や衝突によって外板、内板ともに破損し、油流出事故の起こることが懸念されている¹⁾。従って環境保全、海上防災等の面からダブルハルタンカー事故時での漏油防止性能を把握しておくことは必要となる。しかしこれまでのところ、船体の外板と内板それぞれに破孔が生じるような事故時での、ダブルハル船体構造からの油流出現象の詳細が分かっていないため、精度よくダブルハルタンカーの油流出防止性能評価ができない。このため、油流出現象や流出機構に関する基礎情報やダブルハルタンカーからの事故中の油流出量を予測する手法の開発が必要とされている。

本研究では座礁事故時 (タンカーは拘束状態となる) を対象とし、前報²⁾で得られたデータを基に、ダブルハルタンカーの中央部断面を模擬したモデルタンクから静水中への油流出量を予測する方法について検討した。油流出中、ダブルハル内には油層と水層が形成され、破孔でのタンク内外の水頭がバランスして油流出が終了するものとモデル化した。この方法によって油流出量を算出するには、流出終了時のダブルハル内の水層厚さを与えることが必要となるので、この値を求める方法について検討する。

* 正会員 運輸省船舶技術研究所 (〒181 東京都三鷹市新川 6-38-1)

2. 油流出量の予測

ダブルハルトンカーが座礁して外板、内板ともに破損し、油流出の起こる事故を想定する。この座礁ダブルハルトンカーを模擬したモデルタンクから静水中に流出する油量を予測する方法について検討する。

図1はダブルハル部が中央部で仕切られたJタイプ(仕切りのないのはUタイプと呼ぶことにする)に対する油流出事故前、事故終了後のダブルハルモデルタンク内で観察された結果をモデル化したものである。なお、単純なモデル化に対する油流出量の予測法はすでに提案している⁽³⁾。図では初期油位 H_1 からタンク底部の破孔を通して油流出が始まり、荷油タンクから油が Q_T 流出し、その一部はタンク外に Q_S 漏油し、一部はダブルハル内に Q_D だけ油が滞留することを示しており、ダブルハル内には水が Q_W 流入して厚さ t_f の水層となって、破孔でのタンク内外の圧力が液位 H でバランスし、全ての流出入が終了するとしている。この時、

$$Q_T = Q_S + Q_D \quad (1)$$

$$Q_D = H D_s \ell + (L_D + D_s)(1 - \alpha) \ell D_B \quad (2)$$

$$Q_T = (H_1 - H) S_o \quad (3)$$

$$Q_W = \alpha D_B \ell (D_s + L_D) \quad (4)$$

$$H = \gamma_w (d - \alpha D_B) / \gamma_o - (1 - \alpha) D_B \quad (5)$$

の関係が成立する。ただし

$$\alpha = t_f / D_B \quad (6)$$

であるので、タンク外への流出油量 Q_S に対し、次の関係が得られる。

$$Q_S = S_o H_1 - \gamma_w S_o (d - \alpha D_B) / \gamma_o + S_o (1 - \alpha) D_B - Q_D \quad (7)$$

タンクの寸法、流体の密度および流出終了時のダブルハル内水層厚さの無次元数 α が与えられれば、ダブルハル部の滞留油量 Q_D は式(2)(5)より求まる。従って、ダブルハルトンカーの構造、寸法、積み荷条件および流体の密度は予め与えられているので、 α が与えられればタンク外への流出油量 Q_S は求められることになる。

Q_S の各変数に対する感度を、前報⁽³⁾で用いた実験装置を対象として調べた。 α を変えて、 $D_B = D_s = 0.04\text{m}$, $L_D = 0.5\text{m}$, $\ell = 0.45\text{m}$, $\gamma_o = 860\text{Kg/m}^3$, および $\gamma_w = 1000\text{Kg/m}^3$ について計算した結果を図2に示す。図3は $\alpha = 0.1$ における Q_S の計算結果である。流出油量は H_1 と d の差の増加や α の増加とともに増加し、 α が一定値の場合には、ダブルボトム高さ、荷油タンク断面積や荷油密度が増加するほど、またJタイプの方がUタイプより油流出量は増加するという計算結果が得られる。これらの計算結果は前報⁽³⁾で示した実験

図1 油流出のモデル化(Jタイプの場合)

図2 α に対する予測流出油量の変化

結果の傾向をよく表している。

ダブルボトム高さが大きくなるほど Q_s が増加するのは次の理由による。 d が一定の場合、 D_B が増加す

(a) パラメータ：ダブルボトム高さ

(b) パラメータ：荷油タンク分割数

(c) パラメータ：油密度

(d) パラメータ：ダブルボトム構造

図3 予測流出油量の変化 ($\alpha=0.1$ の場合)

ると Q_D も増加するが、 Q_T は Q_D が増加する以上に増加するため、 $Q_S = Q_T - Q_D$ なる関係から、 Q_S も増加することになる。

なお、更に詳しい計算例は文献(4)に示されている。

3. 無次元水層厚さ α の実験値

前報⁽²⁾で述べた実験装置(タンク模型はダブルハルモデルタンク、タンク寸法はVLCCの1/50)、実験方法により、 $D_B = D_S = 0.02, 0.04, 0.06\text{m}$ $H_1 = 0.2 \sim 0.5\text{m}$ $d = 0.2 \sim 0.45\text{m}$ $S_0 = 0.26, 0.52\text{m}^2$ $S_D = 0.26, 0.54\text{m}^2$ $S_S = 0.009 \sim 0.054\text{m}^2$ $D_i = D_o = 71\text{mm}\phi$ の実験条件、実験範囲で水層厚さを測定し、無次元水層厚さ α を求めた。パラメータごとに α におよぼす影響を検討する。

3.1 初期油位と水位の影響

図4は荷油タンク初期油位 H_1 を一定にし、水位 d を変えたときの α の測定例を示す。また、 d を一定にし、 H_1 を変えたときの α を図5に示す。 H_1 と d の差が大きい時は激しい油流出が起こり、ダブルハル内への水の流入量が少ないため α は小さく、横軸の値に対して α の変化は少ない。 H_1 と d の差が小さくなるとともに油流出量も少なくなり、ダブルハル内への水の流入量が増加し、 α は急激に増加する。

3.2 荷油タンク断面積とダブルボトム構造の影響

図6は荷油タンク断面積とダブルボトム構造の影響を調べたもので、 S_0 を変えても、またダブルボトム構造を変えダブルボトム容積を変えても、 α の横軸に対する傾向の変化は見られない。 α のこれらのパラメータに対する明瞭な影響は見られない。

3.3 ダブルボトム高さの影響

図7はダブルボトム高さ D_B が α におよぼす影響を見たものである。 D_B が大きいと横軸に対する α の変化が小さい範囲では α は大きく、顕著な変化を示す範囲では α は小さい。

4. α の整理

α のデータを整理する方法として、次の2つについて検討した。

4.1 水と油の水頭比による整理

実験結果によると α は荷油タンク初期油位 H_1 と水位 d に最も影響を受けているので、外板破孔での水の水頭と油の水頭によってデータの整理を試みる。

図4 α におよぼす水位と油位の影響
(パラメータ：油位)

図5 α におよぼす水位と油位の影響
(パラメータ：水位)

図6 α におよぼす水位の影響
(パラメータ：荷油タンク断面積、ダブルボトム構造)

ダブルボトム高さ D_B 、荷油タンク断面積 S_o およびダブルボトム断面積 S_D をパラメータにして、横軸に外板破孔での水の水頭と油の水頭の比に相当する無次元数 $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ をとり、縦軸に α をプロットしたものを図8に示す。 $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ が小さいほど水に比べて油の水頭が大きく、油流出が激しく起こる。この時、ダブルハル内への水の流入量が少なくなるため、 α も小さい。 $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ が大きくなると破孔での水と油の水頭が接近して油流出が起こり難くなり、ダブルハル内への水の流入が容易となるため α は大きくなる。どの D_B 、 S_o および S_D に対しても同じような変化を示しており、 $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ が大きくなるほど α は大きくなる。しかし $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ に対して、 α の変化の少ない領域と急激に変化の起こる領域に別れており、傾向の異なる2つの領域のあることが分かる。

図7 α におよぼす水位の影響
(パラメータ：ダブルボトム高さ)

図8 水頭比による α の整理

それぞれの領域の α の値および領域の遷移境界は D_B 、 S_D および S_o によっても変わっており、 α は $\gamma_w d / \gamma_o (D_B + H_1)$ のみによって整理できていないことが分かる。このことは、水と油の水頭に加え、 S_D 、 S_o および S_s の変数をも含んだ無次元数による整理が必要なることを示唆している。

4.2 ダブルハル容積と荷油タンク流出油容積との比による整理

実験結果を整理するため、 α に影響している変数を含んだダブルハル容積と荷油タンク流出油容積との比を用いた整理法を試みた。

図1を参照すると、ダブルハル内への水の流入がないとき、 $H = \gamma_w d / \gamma_o - D_B$ となるので、荷油タンク流出油量は $(H_1 - H) S_o = (H_1 - \gamma_w d / \gamma_o + D_B) S_o$ となり、ダブルハル内に滞留する油量は $H S_s + D_B S_D = \gamma_w d S_s / \gamma_o - D_B S_s + D_B S_D$ となる。この条件でのダブルハル内に滞留する油容積と荷油タンク流出油容積との比 β は

$$\beta = (\gamma_w d S_s / \gamma_o - D_B S_s + D_B S_D) / (H_1 - \gamma_w d / \gamma_o + D_B) S_o$$

と表せる。この無次元数は D_B 、 S_o 、 S_D 、 S_s 、 d 、 H_1 、 γ_w および γ_o で表示されており、タンクの寸法、構造、積荷条件と流体の密度が含まれたものになっている。 β が大きくなるほど荷油タンクからの油流出容積に比してダブルハル容積が大きくなり、水の流入量も多くなるので α は大きくなる。一方、 β が小さく

なるほど初期油位と水位の差は大きくなり、ダブルハル内への水の流入が困難となるので α は小さくなる。従って、 β はダブルハル内への水の流入の可能性の大きさを表す無次元数と考えることができる。図9は β に対する α の実験値を示す。 α は β の増加とともに増加し、 β が小さい時は α も小さく、 β が大きくなると α は大きくなっている。 β に対して傾向の異なる2つの領域に別れ、 $\beta < 1$ では α は小さく、 β に対して α の変化は少ない。データは比較的良好にまとまっており、実線で表される関係によって整理できる。 $\beta > 1$ では α は大きな値となり、 β に対して α は急激に変化する。データのばらつきは大きく、 α は β によって整理できていないことが分かる。そこで $\beta > 1$ での流出率 $\eta (= Q_s / S_o H_1)$ を見たのが図10である。 $\beta < 1$ では十分な大きさの流出率を示すが、 $\beta > 1$ では η は0付近の小さな値となっており、油流出はほとんど起こっていないことを示している。

図9 容積比による α の整理 図10 流出率 η と無次元数 β の関係

4.3 $\beta > 1$ での α の値

実験結果の整理より、 $\beta > 1$ では $Q_s = 0$ が成立すると考えることができる。この時、式(2)(5)(7)から α は

$$\alpha = \{ Q_s - S_o(D_B + H_1) + \gamma_w d(S_o + D_s \ell) / \gamma_o + L_D D_B \ell \} / \{ -S_o D_B + \gamma_w D_B(S_o + D_s \ell) / \gamma_o + L_D D_B \ell \} \quad (8)$$

となる。式(8)より求まる α の計算結果と $\beta > 1$ の範囲での実験値との比較を図11に示す。 d , H_1 , D_B , S_D , S_o や S_s に対し α の計算値はデータとよく一致しているのが分かる。

(a)

(b)

(c)

(d)

5. まとめ

座礁ダブルハルタンカーの1タンクを模擬したモデルタンクから、静水中に流出する油量を予測する方法について検討した。観察に基づき、流出終了後、破孔でのタンク内外の水頭はバランスし、ダブルハル内には水の層が形成されるとモデル化した。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 流出油量はタンク構造、寸法、水と油の密度および無次元水層厚さ α が与えられると求めることができる。他のパラメータが一定の時、 α が増加すると流出油量も増加する。
- (2) 初期油位と水位の差、荷油タンク断面積、荷油密度およびダブルボトム高さは予測流出油量に大きく影響する。

(e)

図 11 $\beta > 1$ での予測値と実験値の比較

- (3) α は初期油位と水位の差が大きくなるとともに徐々に減少し、差が小さくなるとともに急激に増加する。またダブルボトム高さ、ダブルボトム構造、荷油タンク寸法によっても影響を受ける。
- (4) 実験値を整理した結果、無次元水層厚さ α は2つの領域に別れ、各領域での α の整理法を明らかにした。
- (5) 今後、モデルタンクの寸法、破孔の寸法、形状および試験流体の物性値が α に及ぼす影響の大きさを調査する必要がある。

記号

d : 外板から測った水面高さ	D_B : ダブルボトム高さ
D_i : 内板破孔直径	D_o : 外板破孔直径
D_s : ダブルサイド幅	H : 流出終了時の油面高さ
H_1 : 内板から測った初期油面高さ	L_D : ダブルボトム幅
Q_D : ダブルハル内滞留油量	Q_s : タンク外流出油量
Q_T : 荷油タンクからの流出油量	Q_w : ダブルハル内への流入水量
S_D : ダブルボトム断面積	S_o : 荷油タンク断面積
S_s : ダブルサイド断面積	t_f : 流出終了時のダブルハル内水層厚さ
α : t_f/D_B	γ_w : 水の密度
η : 流出率 ($=Q_s/S_o H_1$)	γ_o : 油の密度
l : タンク奥行き	

参考文献

- (1) DNVC Report 90-0074 (1990)
- (2) 山口勝治, 山之内 博 日本航海学会論文集 88号, 117 (1993)
- (3) K. Arita, O. Nagata, K. Yamaguchi and G. Aoki, Proc. TDG11, p.255, Nov.1992, Tokyo
- (4) K. Yamaguchi and H. Yamanouchi, Papers of Ship Research Institute, Vol.29, No.5, Sept.1992