

損傷船舶の浸水時安全性評価模型実験法に関する一考察

正員 片山 徹* 学生員 武内 祐二**
正員 池田 良穂*

A Study on Model Test Method to Assess Safety of Damaged Ship with Flooding from Damaged Opening

by Toru Katayama, *Member* Yuji Takeuchi, *Student Member*
Yoshiho Ikeda, *Member*

Summary

In this study, two different scaled models of a Large Passenger Ship (110,000 gross tonnage), which has three decks in water tight compartments, were developed. And the damaged ship's behaviors in intermediate stages of flooding were experimentally investigated. In some cases, large heel angle was measured for both of the models. However, the times to reach to the maximum heel angle for these ships have significantly different from the safety point of view. It was confirmed that the difference is caused by the difference of flooding velocity from damaged opening affected by the size of the opening and air compression in the damaged water tight compartments.

1. 緒 言

衝突や座礁等により浸水した船舶の安全性については、客船「タイタニック」の海難を契機として国際的な法規制定の流れができ、その安全性を担保するための SOLAS 条約が成立した。この条約については、国際海事機関 IMO の復原性・満載喫水線・漁船安全性小委員会 SLF において、船舶の大型化や高性能化に伴う見直しが常に行なわれている。こうした流れの下、近年続々と登場している乗船者 5,000 名以上の巨大クルーズ客船に対してもまた、現行の損傷時復原性規則の妥当性が SLF において検討されている。

著者らはこの SLF での検討作業に貢献するために、日本造船研究協会の RR 研究の一環として、現行規則に従い復原性能（損傷時を含む）に問題の無い船を対象に、

現行規則では考慮されていない浸水中間段階における危険性の有無について水槽試験によって検討してきた。先の論文¹⁾で対象とした船型は、船体内部に多層甲板を持つ巨大客船（11 万総トン数相当）である。縮尺 50 分の 1 の 2 次元模型を作成し、損傷時浸水中間段階の運動計測実験を行った。その結果、浸水中間段階に大横傾斜が発生する可能性があり、損傷破口が高い位置（高い甲板から浸水する位置）にあり、区画内のアレンジメントが複雑もしくは船体の初期横傾斜等により浸水開始直後に損傷破口付近に水が滞留しやすい場合に大横傾斜が発生することを示した。また、その発生原因は、多層の甲板にある程度の流入水が滞留したために、各甲板で自由水による傾斜モーメントが発生したためであることを示すと共に、浸水中間段階での最大横傾斜角を静的な計算によって概略推定できること等を示した。

前述のような浸水中間段階での大横傾斜が発生した場合、たとえその最終釣り合い状態（最終的な横傾斜角および喫水）が現行の安全基準を満足していても、その最大横傾斜角、最大横傾斜角発生時刻、大横傾斜継続時間は、乗客や積み荷の安全性に影響を与えることが考え

* 大阪府立大学大学院工学研究科

** 大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程(現株式会社IHIマリンユナイテッド)

原稿受理 平成17年4月20日

られ、これらを把握するためには、実用上十分な精度での水槽試験や数値実験が実施される必要がある。しかしながら、浸水中間段階での船体の挙動に関する研究¹⁾⁴⁾は必ずしも十分ではなく、水槽試験や数値実験の仕様(例えば、模型船内部区画等の再現精度、模型船の大きさ、数値実験で用いられる各種推定モデルなど)について、検討を進める必要がある。本研究では、先の研究¹⁾と同供試船を対象とし異なる大きさの3次元模型で実験を行い、模型実験法について検討を行うと共に、さらに損傷破口からの浸水流量に着目しその特性を調査し、推定モデルについて検討を行った結果について報告する。

2. 損傷時浸水中間段階の船体運動計測実験

2.1 模型船および実験概要

供試模型は、IMOにおける研究のためにフィンカンテリ造船所が試設計した、架空の11万総トン級大型クルーズ客船の1/125縮尺模型である。その正面線図および主要目をFig.1, Table 1に示す。

同模型船ではFig.2に示すように、その船体中央付近船長方向に5つの水密区画を再現した。鉛直方向には、2重底と3層の甲板(DK1~DK3)があり、第3甲板の上の甲板がBHDである。なお、大横傾斜が発生する場合でもBHD上部へ浸水がないように十分な乾舷を設けている。各甲板は階段室によって鉛直方向に繋がっており、この階段を通して各甲板間を水および空気が行き来できる。さらに、各甲板にはBHD上部に繋がる給排気管等を見立てた小さな空気管(144mm²)を設けた。

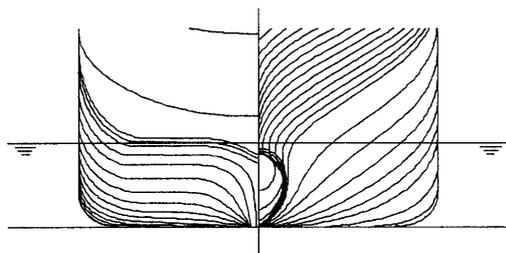


Fig. 1 Body plan of ship.

Table 1 Principle particulars of model.

| | |
|-----------------|--------------------------|
| scale | 1/125.32 |
| LOA | 2.200 m |
| L _{PP} | 1,933 m |
| Breadth | 0.287 m |
| Draft | 0.067 m |
| Displacement | 24.31 kg |
| GM | 1.642×10 ⁻² m |
| T _S | 1.93 sec |

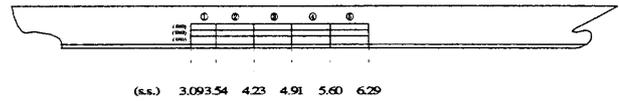


Fig. 2 Schematic view of 3-D model and deck arrangement in compartments.

浸水を仮定した区画内の甲板には、船員室スペース(cc)とボイドスペース(v)を想定している。船員室スペースでは、可能な限り全船員室を再現したため複雑な構造になっている¹⁾。各室のドアと天井および床との間、壁と天井との間には、それぞれ隙間を設け、水が行き来できるようにした。なお、各甲板のアレンジとしては、第1甲板は全てボイドスペース、第3甲板は全て船員室スペースとし、第2甲板はボイドスペースと船員室スペースとの組み合わせを考えた。実験では、2区画浸水を仮定し、Fig.2中の③④区画を対象とした。なお、この2区画が100%水で満たされた場合でも船体は沈没することは無い。

損傷破口(以下、破口と記す)長さは、SOLAS条約の最大長さ(SOLAS条約II-1章8.4; $\min\{0.03L+3.0, 11.0\text{m}\}$)とし、船長方向の前後位置は、浸水区画③④の中央とした。実験では、破口の長さ、破口の鉛直方向位置をFig.3に示すように変化させた。

実験においては、破口をテープで完全に塞いでおき、静水中で静止している船体からテープを静かにかつ素早く剥がし、船体内部へ浸水させた。船体の運動は、上下揺れ、縦揺れ、横揺れを自由とし、浸水最終状態に至るまでのこれらの運動を計測した。

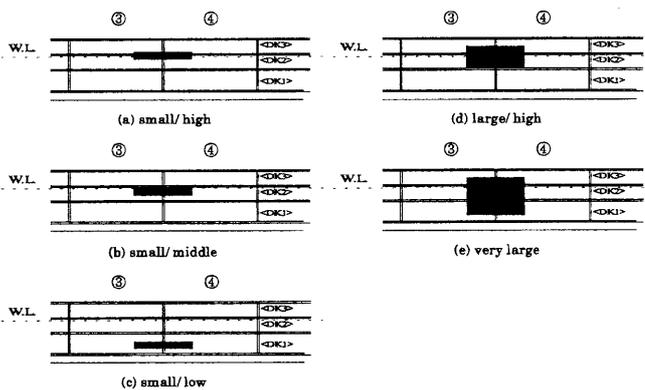


Fig. 3 Location and size of damage openings on side hull.

2.1 実験結果

本研究で実施した実験状態について、大横傾斜発生の有無をTable 2に示す。また、同表には先の論文¹⁾における2次元模型を用いた同実験状態での結果も示している。同表から、模型の大小を問わず同じ実験状態、つまり損傷破口の位置が高く、高い甲板から浸水し、区画内のア

レンジメントが複雑で浸水開始直後に損傷破口付近に水が滞留しやすい場合に、大横傾斜が発生することが確認できる。

Table 2 Experimental conditions and results.

| case | opening size | | internal arrangement on DK2 | air pipe | large rolling | |
|------|--------------|--------|-----------------------------|----------|---------------|----------|
| | | | | | 3D model | 2D model |
| 1 | small | low | cc-v | exist | × | × |
| 4 | small | middle | v-v | no | × | × |
| 6 | small | high | cc-v | no | ○ | ○ |
| 8 | small | high | cc-v | exist | ○ | ○ |
| 9 | large | high | cc-v | exist* | ○ | ○ |
| 12 | large | high | v-v | exist | × | × |
| 15 | very large | | cc-v | exist | × | × |
| 18 | large | high | cc-v | exist | ○ | ○ |

*) case 9: there is only air pipe from DK3

Fig.4 に Table 2 に示す実験状態の中から、一例として Case 18 の横揺れの時系列データを、2次元模型での実験結果と比較して、3次元模型の結果を実線、2次元模型の結果を破線で示す。(図中一点鎖線については後述する。)なお、比較にあたっては、大型の2次元模型の計測結果をフルード相似則に従って小型の3次元模型の縮尺に合わせて示している。両者(実線と破線)の横揺れを比較すると、特に最大横傾斜角発生時刻および大横傾斜継続時間が大きく異なり、小型である3次元模型の結果が大型の2次元模型の結果に比べて短くなっていることがわかる。大型の2次元模型での結果を詳細に見ると浸水開始直後に、一旦船体が5度程度横傾斜した後に3度程度まで横傾斜角が減少していることがわかる。これは、第2甲板上の浸水量の増加によって、浸水が階段室に到達し第1甲板に落ちることにより一時的に復原力が回復したものと考えられる。しかしながら、小型の3次元模型においてはこのような現象は見られなかった。

異なる大きさの模型においては、浸水中間段階の横揺れに前述のような差異が見られた。これらの原因としては、浸水中間段階における船体に働く力、つまり復原力、減衰力および慣性力(付加質量を含む)が相似でないことや、浸水によって生じる外力つまり損傷破口からの浸水の流量や各甲板上の水の運動、階段室からの下部甲板への流量などが相似でないことなどが考えられる。Fig.4の計測結果を観ると、小型の3次元模型を用いた場合の最大横傾斜角発生時刻は約13秒であり、この模型船の横揺れ固有周期1.93秒に比べるとゆっくりとした運動

であり、前述の前者が原因であるとは考えにくい。そこで、Fig.4に見られる大小の模型での結果の差異の原因のひとつとして、大型の模型の破口からの流入量が小型の模型の場合に比べて少ないのではないかと考え、浸水開始直後に損傷破口が水面下に下がる実験ケースを対象に、水密区画内の各甲板からBHD上に繋がる排気管を塞ぎ区画内の空気圧縮の影響を利用することで、浸水の流量を減少させることを試みた。その結果をFig.4中に一点鎖線で示す。同図から、排気管を塞いだ結果では、最大横傾斜角発生時刻および大横傾斜継続時間が長くなる結果が得られ、この結果は大型の2次元模型を用いた実験結果に近づく傾向があることがわかる。ただ、最終釣り合い角については、排気管を塞ぐことで、下層の甲板に空気が閉じ込められ、他の2状態とは異なり6度程度の傾斜角が残ってしまった。以上の結果から、模型船の大きさが異なる場合に見られる浸水中間段階での差異の原因のひとつとして、損傷破口からの浸水の流量が相似でない可能性があることがわかった。

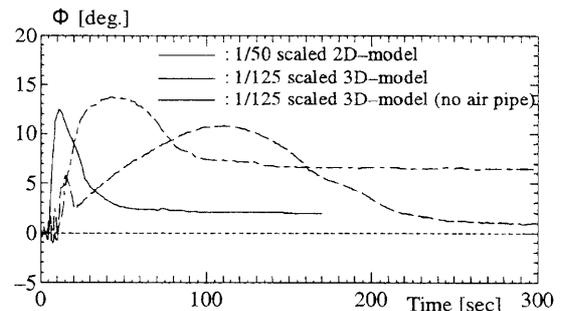


Fig.4 Comparison of the measured results of rolling, for different scaled 3D- and 2D-models at case 18. (The scale of results for 2D-model is modified according to Froude similarity law to adjust to the scale of 3D-model.)

3. 損傷破口からの流量の計測

3.1 実験概要および解析方法

模型船の縮尺が異なると、損傷破口からの浸水の流量や階段室からの下部甲板への浸水の流量などの船体内部での水の運動が相似でない可能性がある。ここでは、いくつか考えられる原因のうち破口からの浸水の流量 $Q(t)$ (m³/sec)に着目し、簡便な模型試験により、その特性について調査すると共に、縮尺の影響について考察を行うこととする。

Fig.5に実験の概略図を示す。側壁に長方形の流入口(以下、破口と呼ぶ)を持つ直方体を透明なアクリル板(厚さ10mm、ただし破口のある面は厚さ1mm)で作成

し、この直方体を検力計で完全に拘束する。あらかじめテープで塞いだ破口から、すばやくテープを剥がして水を流入させ、このとき直方体に働く鉛直方向の力（下向き+）を計測し、この力を用いて内部水面の上昇量および破口からの流量を算出した。

Fig.6 に示すように、大小2種類の相似な直方体を作成した。なお、同図中の寸法は、直方体の内寸であり、黒い部分が破口である。それぞれの破口の大きさは、前章で用いた小型の3次元模型と大型の2次元模型のそれにほぼ等しい。

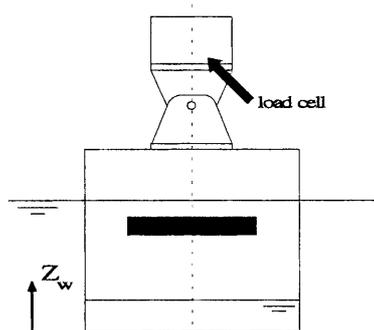


Fig. 5 Schematic view of experiment.

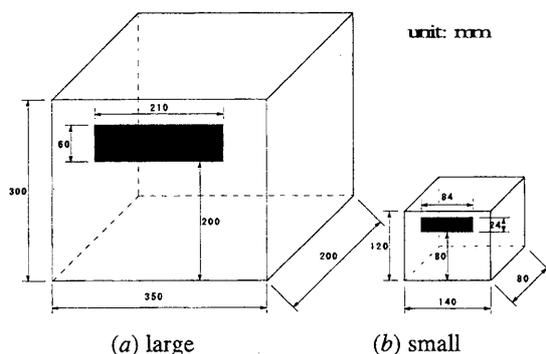


Fig. 6 Models used in experiments.

Fig.7 に示す(a)の破口の高さ中心が水面と一致する場合と、(b)の破口が完全に水面下にある場合の実験を行った。さらに(b)の状態では、直方体に破口以外の空気口（排気口）がある場合と無い場合とで、破口からの流量が異なる可能性がある。そこで、

- (b-1) 破口と同等の大きさの空気口がある状態
- (b-2) 空気口面積が破口面積の 1/25 の場合
- (b-3) 空気口が無い場合

の実験を行った。

計測した力から次式により、流入開始後 t (sec)での内部水面の底面からの高さ $Z_w(t)$ (m)を算出できる。

$$F = \rho g Z_w(t) S + \frac{\rho S Z_w(t)}{t} \sqrt{2g(Z_{w0} - Z_w(t))} \quad (1)$$

ここで、 Z_{w0} は底面から破口の下端までの高さ(m)、 S は

直方体内部の底面積(m²)である。なお、(1)式右辺第1項は直方体内部の水の重量(kgf)を示し、第2項は破口からの水が自由落下し内部水面に衝突したときの反力を示す項であり、内部水面が破口下端に到達するまでは(1)式を、内部水面が破口下端に到達した後は同式の右辺第1項のみを用いて内部水面の高さを算出できる。なお、 $Z_w(t)$ と流量 $Q(t)$ (m³/sec)との関係は次式で表される。

$$Z_w(t) = \frac{\int_0^t Q(\tau) d\tau}{S} \quad (2)$$

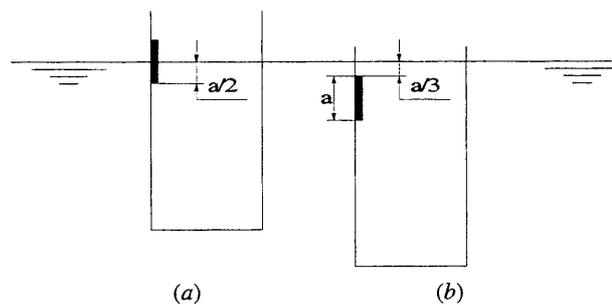


Fig. 7 Experimental conditions.

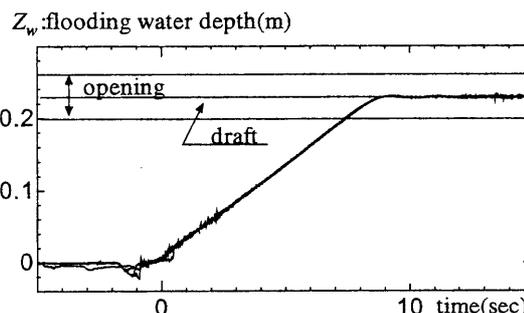


Fig.8 Time history of flooding water depth in large model under condition (a).

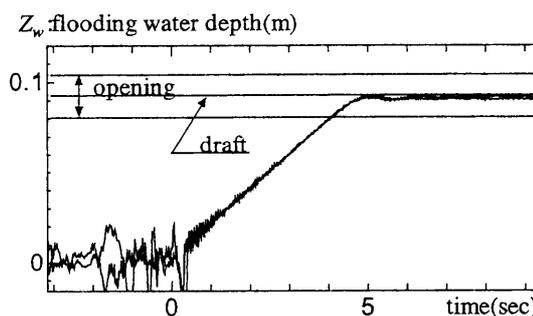


Fig.9 Time history of flooding water depth in small model under condition (a).

3.2 実験結果

3.2.1 破口の高さ中心が水面と一致する場合

大小の直方体での計測結果をそれぞれFig.8, 9に示す。これらの図より、内部水面はそれが破口の下端に到達するまではほぼ一定に上昇し、到達後は上昇速度が減少す

ることがわかる。このことは、(2)式からわかるように内部水面が破口下端に到達するまでは流量 $Q(t)$ は一定であり、到達後は流量が減少することを示している。

3.2.2 破口が完全に水面下にある場合

破口と同等の大きさの空気口があり、直方体内部で空気の圧縮が起こらない場合の大小の直方体での計測結果を Fig.10, 11 にそれぞれ示す。前述の場合と同様に、この場合も内部水面はそれが破口の下端に到達するまではほぼ一定に上昇し、到達後は上昇速度が減少する。つまり、内部水面が破口下端に到達するまでは流量 $Q(t)$ は一定であり、到達後は流量が減少することを示している。

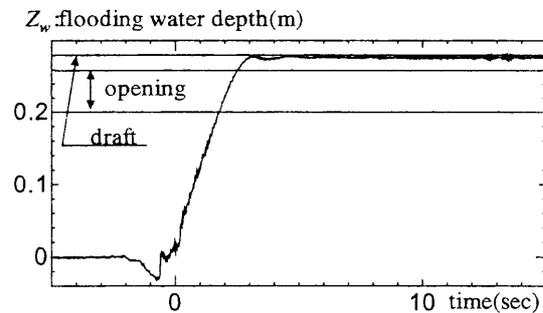


Fig.10 Time history of flooding water depth in large model under condition (b-1).

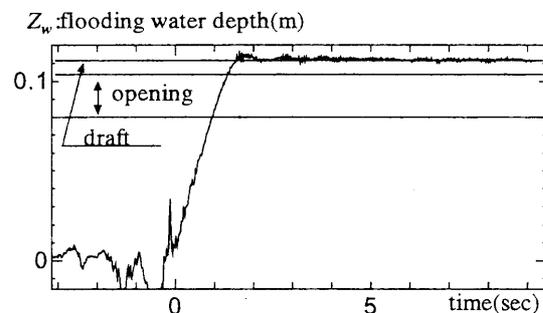


Fig.11 Time history of flooding water depth in small model under condition (b-1).

3.2.3 破口の大きさが流量に与える影響

大小の直方体を用いた、相似な実験状態での結果を、フルード相似則に従って、大きい直方体の内部水面の高さおよび時間を小さい直方体のスケールにあわせて比較したものを Fig.12, 13 に示す。なお、Fig.12 は、Fig.7(a) の状態であり、Fig.13 は Fig.7(b) の (b-1) の状態での結果である。両図共に、直方体の大きさが異なると内部水面の上昇速度が異なり、小さい直方体の結果の方が大きい直方体の結果に比べ流量 $Q(t)$ が大きくなるのがわかる。この結果は、Fig.4 に見られるように、浸水中間段階の船

体の横揺れを大小縮尺の異なる模型で計測した場合に、小さな模型の最大横傾斜角発生時刻が大きな模型の場合に比べて早くなることに符合していると考えられる。つまりこのことは、破口からの流量 $Q(t)$ が相似にならず、縮尺の影響が存在することを示している。

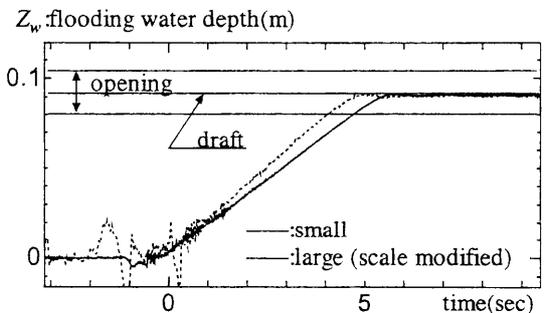


Fig.12 Comparison between small and large models as time history of flooding water depth under condition (a).

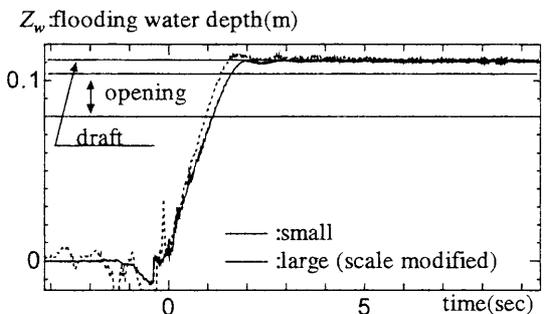


Fig.13 Comparison between small and large models as time history of flooding water depth under condition (b-1).

3.2.4 空気口の大きさが破口からの流量に与える影響

破口が完全に水面下にある Fig.7(b) の場合、空気口が小さいもしくは無いことにより、直方体内部の空気が圧縮されて気圧が高くなり、流量に影響を与える可能性がある。Fig.14 に、小さい直方体について (b-1) 破口と同等の大きさの空気口がある状態、(b-2) 空気孔面積が破口面積の 1/25 の場合、(b-3) 空気口が無い場合の実験結果を比較して示す。同図より、空気口が小さくなるに伴い内部水面の上昇速度が遅くなっており、これは流量 $Q(t)$ が減少していることを示している。なお、(b-3) 空気口が無い場合の実験結果では、内部水面が破口上端に到達後は内部の空気の逃げ場が無くなり、内部水面の上昇が止まっている。以上の結果は、Fig.4 に見られる水密区画内の各甲板から BHD 上に繋がる給排気管の面積を変化させた浸水中間段階での運動計測結果で、給排気管を塞ぐと最大横傾斜角発生時刻ならびに大横傾斜継続時間が長くなることに符合している。

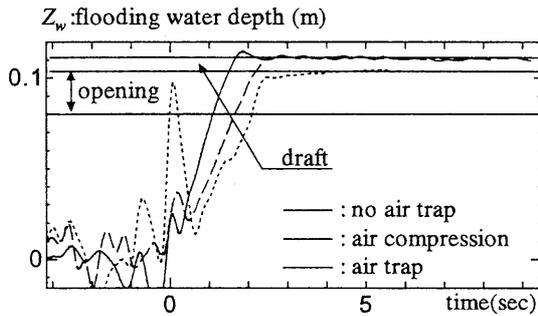


Fig.14 Comparison among three air ventilation conditions in the small model.

3.3 破口からの流量の推定

3.3.1 推定式

近年、損傷船舶の浸水中間段階における船体運動をシミュレーションする際に用いられる流量推定モデルには、次式（以下、1係数モデルと呼ぶ）がある⁴⁾。

$$Q(t) = C_0 \cdot A \sqrt{2gH} \quad (A: \text{破口面積}) \quad (3)$$

ここで、 H は外部水面から破口の中心高さまでの距離もしくは外部水面から内部水面までの距離の小さい方である。なお、式中の C は、流量係数と呼ばれ、破口における摩擦抵抗や流水断面積が拡大するときに発生するエネルギー損失を考慮するための係数である。一般に、この1係数モデルでは、内部水面が破口下端よりもある場合と下にある場合とで、同じ流量係数 C を用いるが、本研究における流量計測実験でも、内部水面が破口下端に到達する前後で流量 $Q(t)$ が変化しており、必ずしも唯一の流量係数を用いる1係数モデルでは、この流量の変化を表現できない可能性がある。一方、このような流量の変化をモデル化したものに、(4)~(8)式（以下、2係数モデルと呼ぶ）がある⁵⁾。（なお、このモデルの補足説明を Appendix に示す。）この2係数モデルでは、破口、直方体の外部水面、内部水面の位置関係を5つに整理して定式化しており、その位置関係を文章中の記号（例えば(a)(i)など）に対応させて Fig.15 に示す。

(a)破口の高さ中心が水面と一致する場合

(i) $0 \leq Z_w \leq H - h$

$$Q_1 = C_1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b h^2 \quad (4)$$

(ii) $H - h \leq Z_w \leq H$

$$Q_2 = C_{21} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (H - Z_w)^{\frac{3}{2}} + C_{22} \cdot b (h - (H - Z_w)) \sqrt{2g(H - Z_w)} \quad (5)$$

(b)破口が完全に水面下にある場合

(i) $0 \leq Z_w \leq H - h$

$$Q_1 = C_1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (h^2 - h'^2) \quad (6)$$

(ii) $H - h \leq Z_w \leq H - h'$

$$Q_2 = C_{21} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b \{ (H - Z_w)^{\frac{3}{2}} - h'^{\frac{3}{2}} \} + C_{22} \cdot b (h - (H - Z_w)) \sqrt{2g(H - Z_w)} \quad (7)$$

(iii) $H - h' \leq Z_w \leq H$

$$Q_3 = C_3 \cdot b (h - h') \sqrt{2g(H - Z_w)} \quad (8)$$

(4)~(8)式の流量係数 C においては、一般に $C_1=C_{21}$ 、 $C_{22}=C_3$ の関係が成り立つ。また、破口位置が破口高さに比べて十分深い位置にある場合は $C_0=C_1$ となる。さらに、破口が十分に大きな場合には C_0, C_1, C_{21} および C_{22}, C_3 は、それぞれ約0.62および0.53に収束すること⁵⁾を付記する。

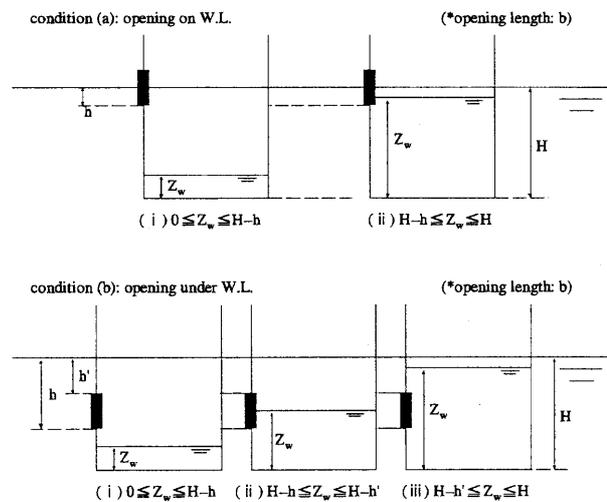


Fig.15 Location of opening and flooding water depth.

3.3.2 流量係数の算出

実験結果をもとに、大小の直方体について各流量係数 C を求めた結果を Table 3 に示す。なお、各係数の算出においては、1係数モデルでは Fig.15 に示す状態(a)(i)および(b)(i)を、2係数モデルでは(a)(i)、(a)(ii)、(b)(i)および(a)(iii)での実験データを用いた。同表より、大小直方体の流量係数は異なり、小さな直方体の方が大きな場合に比べて、流量係数が大きくなるのがわかる。また、破口が完全に外部水面の下である場合の(b)と無い場合の(a)で、流量係数が異なる結果が得られた。さらに、同表中の流量係数 C_{22}, C_3 が流量係数 C_1, C_{21} に比べて小さく、これは内部水面が破口下端に到達すると流量が減少することを示しており、参考文献5)に見られる記述に符合する。

以上の結果から、2章で述べた2隻の模型サイズにおいては、損傷破口からの浸水の流量係数に縮尺の影響が見られ、小さな模型の流量係数が大きい模型のものよりも大きくなること、大きな模型においてもその流量係数

は参考文献 5)で示された数値には十分には収束していない可能性があることなどがわかった。

最後に、1 係数モデルおよび 2 係数モデルを用いて大小の直方体での流量計測実験をシミュレーションし比較した結果を Fig.16~19 に示す。それぞれの係数には、Table 3 の値を用いている。なお、内部水面が破口下端に到達するまでの両モデルの結果は、当然の事ながら実験結果とも一致するため、特に内部水面が破口下端に到達後の結果のみを拡大して示している。2 係数モデルの結果は当然のことながら実験結果と良く一致している。一方、1 係数モデルもまた、実験結果とよく一致するが、このモデルでは、内部水面が破口の下端到達後の流量の減少を十分には考慮できていないため、このような状況では流量を過大評価する傾向にあることがわかった。

Table 3 Coefficients of discharge.

| Experimental condition | C_0 | $C_1=C_{21}$ | $C_{22}=C_3$ |
|------------------------|-------|--------------|--------------|
| small & a | 0.64 | 0.630 | 0.60 |
| small & b-1 | 0.74 | 0.698 | 0.60 |
| large & a | 0.55 | 0.541 | 0.53 |
| large & b-1 | 0.62 | 0.584 | 0.53 |

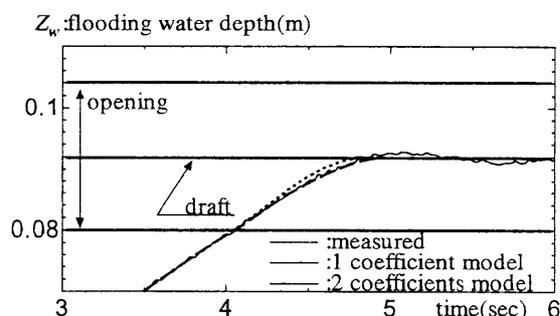


Fig.16 Time histories of calculated and measured flooding water depth in small model under condition (a).

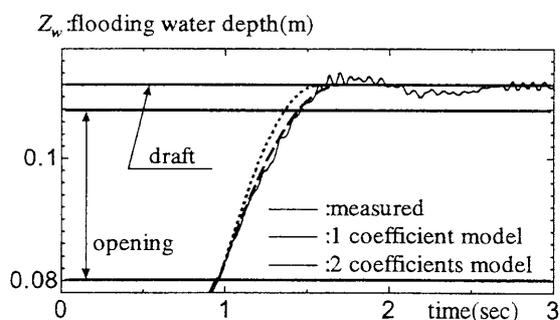


Fig.17 Time histories of calculated and measured flooding water depth in small model under condition (b-1).

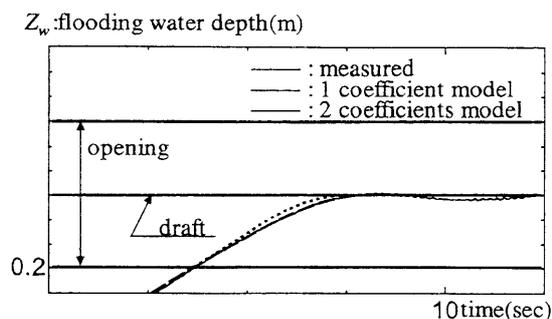


Fig.18 Time histories of calculated and measured flooding water depth in large model under condition (a).

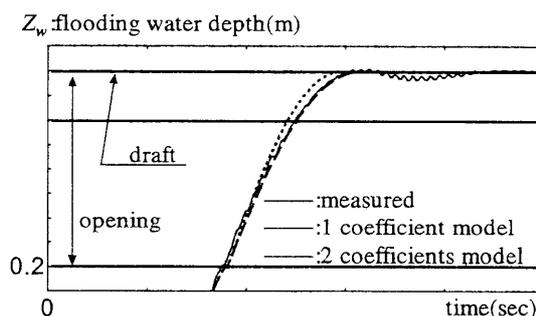


Fig.19 Time histories of calculated and measured flooding water depth in large model under condition (b-1).

4. 結 言

大小縮尺の異なる模型での浸水中間段階における船体の挙動についての実験結果から、

1. 模型の大小を問わず同じ実験状態（損傷破口の位置が高く、高い甲板から浸水し、区画内のアレンジメントが複雑で浸水開始直後に損傷破口付近に水が滞留しやすい場合）では、浸水中間段階で大横傾斜が発生すること、
 2. 一方、模型船の大きさが異なると浸水中間段階での運動速度は異なり、最大横傾斜角発生時刻および大横傾斜継続時間が異なること、
- がわかった。この実験結果の差異の原因として、考えられる幾つかの項目の中から破口からの浸水の流量に着目し、その特性（縮尺の影響を含む）について調査した結果、以下の結論が得られた。
3. 内部の水面が破口下端より下方にある状態ではその内部水面位置によらず流量は一定となる。そのときの流量係数は定数となるが、本研究で対象とした破口サイズでは、その大きさによって値が異なる。
 4. 内部水面が破口下端よりも上方にある場合、その流量は内部水面の上昇に伴い減少する。この場合もまた、流量係数は定数となるが、内部水面が破口下端にある場合に比べて小さな値となる。なお、この場合においても流量係数は、本研究で対象とした破口サイズでは、その大きさによって値が異なる。

5. 流量係数は、区画からの排気量の大小による空気圧縮の影響を受けることがわかった。しかしながら、空気圧縮の影響を考慮した流量推定モデルの検討は十分に行うことができなかった。
6. 内部水面と破口との位置関係によって生じる流量係数の変化を考慮していない流量推定モデルでは、内部水面が破口下端到達後の流量を過大評価する傾向にあるが、例えば2係数モデル等によりこの効果を考慮することによって推定精度が改善される。
- 最後に、本文中にも示したが、破口からの流量同様、模型船内部の各甲板上での水の運動および階段室等の穴からの流量についても縮尺の影響があることが考えられる。それら特性についても必ずしも十分には把握されておらず、今後検討すべき課題であると考えている。

謝 辞

本研究は、日本財団の助成による日本造船研究協会のRR-SP2(平成16年度)の研究として実施したものであることを記し、関係各位に御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 片山徹, 武内祐二, 池田良穂: 巨大客船の損傷時浸水中間段階における挙動に関する実験的研究, 関西造船協会論文集, 第243号, 2004, pp.23-30.
- 2) R. v. Veer, W. Peters, A. Rimpela and J. d. Kat: Exploring the influence of Different Arrangements of Semi-Watertight Spaces on Survivability of a Damaged Large Passenger Ships, Proc. of 7th International Ship Stability Workshop, pp.30, Shanghai, 2004.
- 3) L. Palazzi and J. d. Kat: Model Experiments and Simulations of a Damaged Ship With Air Flow Taken Into Account, Marine Technology, Vol.41, No. 1, 2004.
- 4) D. Vassalos and L. Letizia: Characterization of the Flooding Process of Damaged Ro-Ro Vessel, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.8, No.3, 1998, pp.11-18.
- 5) 永井莊七郎: 水理学, コロナ社, 昭和32年, pp.118-124.

Appendix

A.1 模型内水面が流入口下端より低い場合

ここでは簡単のために模型内での空気圧縮が無い場合を扱う。Torricelliの定理より、深さ H にある孔から流出する流速は次式となる。

$$v_H = \sqrt{2gH} \quad (\text{A.1})$$

ここでは、大きな流出孔(破口)を扱うため、Fig.A-1の帯状部分の流速が(A.1)式で表されると仮定する。Fig.A-1の帯状部分の流量を dQ_0 とすると、

$$dQ_0 = b \cdot dH \cdot \sqrt{2gH} \quad (\text{A.2})$$

ここで、 b は破口の幅である。破口からの流量 Q_0 は(A.2)式を破口高さについて積分すると次式となる。

$$Q_0 = \int_{H_1}^{H_2} dQ_0 = \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}) \quad (\text{A.3})$$

しかしながら、実際には破口における摩擦抵抗や流水断面面積が拡大するときに発生するエネルギー損失により Q_0 よりも小さな値となり(A.3)式に流量係数 C を掛けて次式で表される。

$$Q = C \cdot Q_0 = C \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}) \quad (\text{A.4})$$

A.2 模型内水面が流入口上端より高い場合

Fig.A-2 中深さ Z_1 での流速は次式で表される。

$$v = \sqrt{2g(Z_1 - Z_2)} = \sqrt{2gH} \quad (\text{A.5})$$

すなわち、流入口内の流入速度は高さ方向に全ての点で等しく、破口高さについて積分すると流量 Q は次式となる。

$$Q = C \cdot b (H_2 - H_1) \cdot \sqrt{2gH} \quad (\text{A.6})$$

A.3 模型内水面が流入口の上端と下端の間にある場合

模型内水面が流入口の上端と下端の間にあるとき、その流量は近似的に、模型内水面以下は(A.6)、それ以上は(A.4)と考慮して、両流量の和とする。

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2g} b (H_2^{3/2} - H_1^{3/2}) + C_2 \cdot b (H_2 - H_1) \sqrt{2gH} \quad (\text{A.7})$$

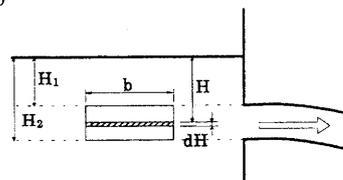


Fig.A-1 Sketch of a flow from an orifice.

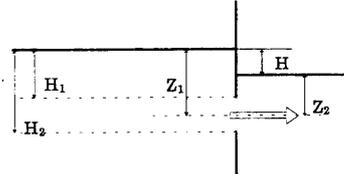


Fig.A-2 Sketch of a flow from a submerged orifice.

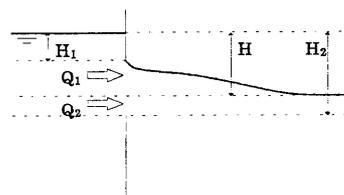


Fig.A-3 Sketch of a flow from a partially submerged orifice.