損傷浸水した船舶の経時変化シミュレーション

海上安全研究領域 *石田 茂資

1.はじめに

海上人命安全条約第 -1 章等の損傷時復原性基準では、損傷浸水して十分時間が経過した後の最終平衡状態について規定されており、また浸水途中の中間段階についても一部規定がある。一方、大型旅客船については、多数の乗員・乗客の安全な避難・救助を勘案し、損傷浸水後の経時変化(time-to-flood)を考慮して安全性を評価することが IMO(国際海事機関)で検討されている。

昨年9月のSLF46(第46回復原性・満載喫水線・漁船安全小委員会)では、オランダ MARIN によるシミュレーション結果 ¹⁾とそれに考察を加えた文書 ²⁾が提出され、水密扉の開閉等オペレーションの重要性が指摘された。また、我国からは大阪府立大学で実施された模型実験結果 ³⁾が紹介され、浸水の中間段階で大きく傾斜する等、経時変化の特徴が示された。しかし、それぞれ1隻の結果であり、また計算方法にも改良の余地があることから、さらに検討を継続することとなった。

本報告では、当所で行った経時変化シミュレーションと大阪府立大学の実験結果を比較し、計算 と実験の対応や経時変化に影響を与える要素について検討した結果を報告する。

2.計算方法

本シミュレーションプログラムは、破口からの 海水流入量、区画間の滞留水の移動量、空気抜け 量、閉じこめられた空気圧の上昇による浸水速度 の低下などを時々刻々計算する。そして、船内各 区画の滞留水量を求め、釣り合い計算によって破 口を生じてからの船体の姿勢(沈下、縦傾斜、横 傾斜)を逐次計算するものである。

具体的な計算方法や仮定を以下に述べる。

(1) 破口等

破口は長方形とするが、中心点 + 面積の形で表現することもできる。破口は一瞬にして生じ、そ

の後拡大しないものとする。扉等の船内の開口も 同様である。ただし、耐圧を設定できるため、圧 力上昇によって水密性を失う場合も近似的に扱う ことができる。

(2) 浸水速度および空気抜け速度

内外の静圧力の差から、ベルヌーイの定理により海水の流入・流出速度を計算する。空気抜け速度も圧力差から計算するが、圧縮性を考慮して断熱膨張過程を仮定した式(後述)を用いる。

(3) 釣合計算

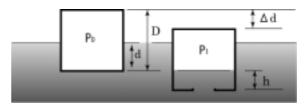
本プログラムでは、船内滞留水は直ちに区画内に広がり、常に水平面を形成すると仮定して、重量付加法による静的な釣合計算を行う。船体姿勢が変化すれば滞留水の重心も移動するため、収束計算によって釣合状態を求める。静的な計算のため、船が傾斜するのは、滞留水によって復原力曲線が変化し、静的な釣合角がゼロから移動する場合である。

(4) 風と波の影響

定常風による傾斜偶力を考慮している。波と波による船体動揺については、現在プログラム内部で処理しておらず、別途求めた破口位置の相対位置変動だけを入力として扱っている。

3.空気圧縮を伴う場合の尺度影響

検討結果を示す前に、空気圧縮を伴う場合の尺度影響について確認する。図-1のような区画のない箱船を仮定する。空気抜けはないものとする。



損傷前 損傷後 図-1 区画のない箱船の損傷

ここに、D は深さ、d は喫水、 Δd は損傷による沈下量、h は滞留水深さ、 P_0 は大気圧、 P_1 は損傷後の倉内空気圧である。また、船の重量をW、底面積をA、水の密度を ρ 、重力加速度をg とする。途中の過程は省略するが、損傷前後の釣り合いから次式が導かれる。

$$\frac{\Delta d}{D} = \frac{h}{D} = \frac{W}{W + AP_0} = 1/\left(1 + \frac{P_0}{\rho g d}\right) \quad \cdots (1)$$

この式からわかるように、大気圧 P_0 が縮尺倍にならないため、 $\Delta d/D$ は模型船と実船で同一にならない。大気圧下で、D=15m、d=11.5m の実船の 1/185 の模型実験を考えた場合には、 $\Delta d/D=0.535$ (実船) 0.006(模型船)となる。

この実船の結果は甲板の没水を意味しており、 甲板上面に大気圧のみがかかるという図-1 右図の 仮定が崩れ、船は沈没することになる。一方、模 型船の喫水はほとんど変化しない結果となる。

実際の浸水では、閉じ込められる空気量は船全体の容積に比べて小さいため、このような極端な差は生じないと考えられるが、模型実験を行う場合には注意すべき点である。

以上は最終状態の比較であるが、経時変化を考える場合、重要な要素は空気が抜ける速度である。本計算法では、空気の流出速度 v が次のツォイナーの公式に従うと仮定している。

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{P_1}{\rho_A}} \left\{ 1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right\} \qquad \cdots (2)$$

ここに、 ρ_A は空気の密度、 $\gamma=1.4$ (定数)である。 簡単のため、実船と模型船で浸水深さ h/D 及び 空気の圧縮率が一致する瞬間を考える。この場合、 (2)式内の圧力 P_0 、 P_1 に尺度影響はない。従って、 流出速度 v も実船と模型船で同一となるため、経 時変化は模型船の方が速いものと考えられる。

4.供試船および損傷ケース

大阪府立大学で実施された大型クルーズ客船の模型実験について、経時変化シミュレーションを行った。対象船の主要目を表-1 に、区画配置を図-2 に、計算対象とした破口を図-3 にそれぞれ示す。

表-1 供試船の主要目

	模型船(1/185)	実船
全長	1.580m	292.3 m
型幅	0.268m	49.58m
型深さ	0.085 m	15.73 m
喫水	0.062 m	11.47 m
排水量	13.5kg	85,477ton
GM	0.029m	5.37m

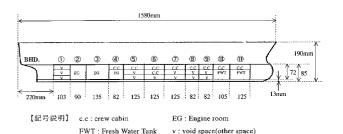


図-2 区画配置 4)



図-3 破口(塗りつぶし部)4)

甲板を下から DK1、DK2、DK3 と呼ぶことにする。破口から浸水するのは DK1 と DK2 で、ともに void space である。各 crew cabin (図-2 の c.c.)は 44 の部屋と廊下に区切られているが、現在のプログラムでは十分に対応できないため、今回はこのケースについて計算を行った。なお、各甲板は面積約 7m² の階段室によってつながっており、DK2 が満水になると DK3 にも浸水する。

5.模型実験結果との比較

シミュレーション計算を実船スケールと模型スケールで行い、模型実験結果(傾斜と上下揺のみ)と比較した。実船スケールで統一した結果を図-4に示す。

図-4 の上の 2 つの図から、最終状態における傾斜角と沈下量は実験と計算で概ね一致していることがわかる。

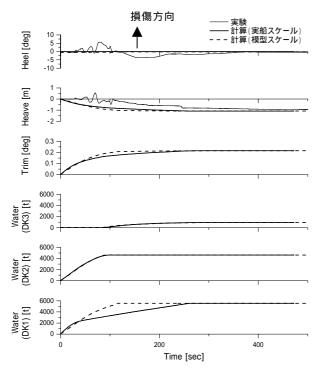


図-4 実験と計算の経時変化比較

上下揺の変化を見ると実験よりも計算の方が変化が早いが、これは両者の初期条件の違いが主因と考えられる。実験では破口を塞いだテープを人間が剥がすという方法を採っているが、流入速度が一定となるまでの時間遅れや、時間のゼロが正確でないことが考えられる。一方計算では、流入速度が直ちに一定になると仮定している。これらを考慮し、時間軸をずらして比較すると、上下揺の経時変化は実験と計算でかなり一致してくる。

さらに、波上側に船が傾斜すると損傷口が水面上に出るため、DK2 への浸水が一時的に止まることから、約80秒の時点で船が傾斜したことも関係すると考えられる。

次に傾斜角の経時変化であるが、計算値はほぼゼロになっている。実験で上下揺が一瞬プラスになり船が浮上していることを考えれば、実験において見られた傾斜角は、テープをはがす際にかかった力の影響が大きいと考えられる。このように、実験と計算の一致度は必ずしも十分ではないが、双方の誤差要因を考えれば説明がつくものと言える。

最後に、実船スケールと模型スケールで行った計算値を比較すると、DK1 において明らかな

差が見られ、模型スケールの方が変化が早い。これは、DK2 にも同時に浸水するため階段室からの空気抜けが阻害され、空気圧の上昇が起こるためである。その場合に模型スケールの方が変化が早いことは、前節に述べたとおりである。

6.GM の影響

上述のケースでは船は傾斜しないという計算結果になった。試みに重心高さを上げ、GM = 3.68m、2.00m とした場合についても計算を行った。実験状態(GM=5.37m)と合わせて結果を図-5に示す。なお、区画が対称な場合には、GM が負になっても計算機上では傾斜しないため、微小な傾斜モーメント(15ton-m)を作用させている。

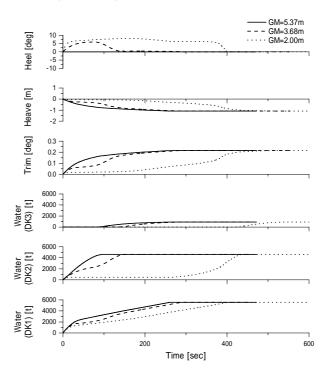


図-5 GM の影響

図を見ると、最終状態は同一であるが経時変化はそれぞれ異なっており、GM の小さい方が最終状態になるまで長時間かかることがわかる。

重心の高い2状態では、自由水影響により船は一度傾斜する。その後、DK1 と DK2 の区画が満水になって自由水影響がなくなり、同時に重心が低下し、さらにフレアと船尾張り出し部の着水によって水線面二次モーメントが増加するため、船は直立状態に戻るという経過になっている。

また、各区画の浸水量変化も、特に上部の DK2、

DK3 において、GM による差が大きい。そして、この浸水速度の差が船体の沈下とトリムの経時変化に影響を与えている。特に、GM=2m においてDK2 の区画は 260 秒程度浸水が止まっているが、これは船が傾斜して破口が水面上に出るからである。その後船が沈下して破口が再び没水すると、浸水が再開して最終状態に達する。

このように、本計算によって船体の姿勢変化と 浸水との関係を明確にとらえることができる。

7.流量係数の影響

ここまで示した計算では、破口と階段室の流量係数 Q をすべて 0.6 (面積の 60%が有効)としている。この値は標準的なものと考えられるが、破口の形状等によって変化する可能性があるため、Q=0.4、0.8 とした場合の計算も行った。結果を図-6 に示すが、流量係数を変化させても経時変化に大きな差は見られなかった。その理由は、最も容積の大きい DK1 における差が小さいからである。

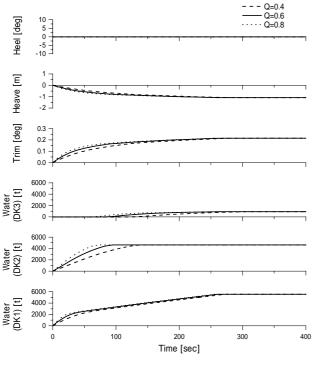


図-6 流量係数の影響

DK1 の区画は、空気抜けが小さい点で他と異なっている。空気圧縮を伴う場合には、浸水が急激であると空気圧が上がって浸水が抑制され、浸水が遅い場合はその逆になる。すなわち、浸水速度を調整する作用が働くため、流量係数の影響が小

さかったと考えられる。

図-6 の DK2 を見るとわかるように、空気が抜けやすい区画では流量係数の影響が大きい。従って、このような区画だけに浸水する損傷ケースでは、流量係数の正確な設定が必要である。

8.まとめ

損傷した大型クルーズ客船について経時変化解析を行った結果、模型実験と矛盾しない時系列を得ることができた。また、パラメータを変えた計算を行った結果、 GM の小さい方が最終状態になるまで長時間かかること、 流量係数の影響は小さいこと、等が明らかとなり、また船体の姿勢変化と浸水との関係を把握することができた。

しかし、これらは船型、区画配置、損傷位置、 海象等によって変化すると考えられる。たとえば では、風圧力等によって損傷方向に傾斜する場 合には、破口が常に没水するため、GM が変化し ても浸水速度はあまり変化しない可能性が高い。 また では、空気が抜けやすい区画だけに浸水す る場合には、流量係数の影響が大きくなる。

このように多くの要素が関係するため、実船が 実海域にある時の避難可能時間の一般的評価は難 しく、安全性評価のための枠組み・モデル化を今 後十分に検討することが必要と考えられる。

最後に、本研究は(社)日本造船研究協会 RR-S2 基準部会(日本財団助成事業、平成 15 年度)との 共同研究として実施したことを付記し、実験デー 夕をご提供いただいた池田良穂委員長(大阪府立 大学)をはじめ、関係各位に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Time-to-flood simulations for a large passenger ship – initial study, Submitted by the United States, SLF46/INF.3, IMO, 2003
- 2) Review of MARIN Study on Time-to-Flood Simulations, Submitted by Italy. Japan and the United States on behalf of the SDS correspondence group, SLF46/8, IMO, 2003
- Experimental study on flooding of a large passenger ship model, Submitted by. Japan, SLF46/INF.14, IMO, 2003
- 4) 日本造船研究協会: RR-S2 船舶の性能基準に 関する調査研究(平成 14 年度報告書)、2003