# 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<sup>1)</sup>とそれに考察を加えた 文書<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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 図-1 区画のない箱船の損傷

ここに、D は深さ、d は喫水、 $\Delta d$  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 $\rho$ 、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<sub>0</sub>が縮尺倍に ならないため、Δd/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、Δd/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。

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

ここに、ρ<sub>A</sub>は空気の密度、γ=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<sub>0</sub>、P<sub>1</sub>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 <b>m</b>
排水量	13.5kg	85,477ton
GM	0.029m	5.37m







図-3 破口(塗りつぶし部)<sup>4)</sup>

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 7m<sup>2</sup> 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。



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 タ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
- 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
- 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