

船舶の確率論的安全評価手法

—その2：FSA 実現のためのリスク評価の方法論—

正員 金 湖 富士夫* 正員 太 田 進*
正員 戴 暁 旬** 福 元 正 明*

Probabilistic Safety Assessment Method of Ship (Part 2 : A Risk Evaluation Methodology for FSA)

by Fujio Kaneko, *Member* Susumu Ohta, *Member*
Xiaoxun Dai, *Member* Masaaki Fukumoto

Summary

Formal Safety Assessment (FSA) considered at IMO, is formal methodology for improving the transparency and accountability of decision related to amendment to the regulations. FSA consists of PSA (Probabilistic Safety Assessment) and cost and benefit assessment. Risk assessment is the most important and difficult part to realize FSA. This paper introduces a methodology for risk assessment and a system for risk assessment composed of several programs including disaster development simulation and evacuation simulation. Furthermore, the result of the trial application of the system, in which the effect of sprinkler systems, i.e., one of the Risk Control Options (RCOs), on the risk due to cabin fire is estimated. Though there are many defects and problems in the system and the methodology at present, i.e., discussed in this paper, the methodology is considered to contribute for reducing the arbitrariness at the decision related to rule making process.

1. 結 言

これまでの船舶の安全基準は重大事故を契機に改正がなされ、その都度、船舶には多くの付加的設備の設置、構造の強化がなされてきた。しかしながら、それらの有効性は科学的に立証されているとは言い難く、安全のための過大な投資、あるいは効果のない設備等の搭載がなされている可能性もあり、船舶のコストを増大させているのではないかという危惧が関係者間に存在している。

一方、原子力分野で標準的な安全評価手法とされている確率論的安全評価法（PSA：Probabilistic Safety Assessment、あるいは PRA：Probabilistic Risk Assessment と呼ばれる。）は化学プラントの安全性の評価等、他分野にも応用され始めており、安全を科

学的に評価するための優れた手法とみなされている。

これらの状況等を考慮し、英国は 1993 年に IMO/MSC62 において、船舶の安全性を確率論的安全評価手法を用いて「リスク」という数値で表現し、安全を確保するための種々の基準を設定した場合のコストの評価と共に、その基準の有効性を審議する際に役立てようとの考えを表明した。そのための評価手法を FSA (Formal Safety Assessment) と称している。

その後、IMO/MSC においてそのためのコレスポンデンスグループおよびワーキンググループが構成されて検討が継続され、IMO/MSC 68 において FSA の暫定ガイドライン¹⁾が承認され、それに基づいて各国が FSA の試適用の実施^{2),3),4)}を開始し、現在に至っている。

日本は、これに対応すべく、東京大学の大和教授を

* 運輸省船舶技術研究所

** (株)公共情報システム研究所

原稿受理 平成 11 年 7 月 9 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

委員長とする（社）日本造船研究協会の第42基準研究部会を設置し、船舶技術研究所を中心にFSAを実現する手法の開発を実施するとともに、適宜MSCの審議に参加し、FSA暫定ガイドラインの審議においても日本の意見を反映させてきた。

今後、FSAの試適用が継続されるとともに、FSA暫定ガイドラインの改良、およびIMOにおけるFSA実施手続のガイドラインの作成が行われ、これらの後、IMOにおける基準作成にあたって様々な問題についてFSAが実施されると思われる。

本研究は、FSAの実現を目指し、船舶の確率論的安全評価手法の開発を目的として実施されている。前報⁵⁾では、衝突確率の推定のために必要な遭遇危険の推定方法につき論じ、対象海域に進入する船舶がポアソン分布をするとの仮定のもとに、航行密度が与えられた場合の遭遇確率を理論的に求める手法を示した。

本報では、FSAの実現のため、事故発生からその結果に至る過程の分析に基づいて開発したリスク評価の方法論および、同方法論に基づき開発したリスク評価システムについて略述し、リスク評価の例題として、同システムを適用して実施した火災拡大防止のためのリスク制御手段（以下、RCO: Risk Control Optionと呼ぶ。）であるスプリングラの評価を示す。また、本手法の問題点につき考察する。

2. FSAの概略

FSAは、Table 1に示す5段階の手続きにより構成される、安全基準の審議方法である。FSAとはすなわち、RCOの効果をリスクで定量的に表現し、RCOを設置あるいは実施するために必要となる複数の関係者に付加されるコストを加味して最適なRCOを選定し、基準化するための手続きである。

Table 1 Procedures of FSA

段階	段階名	概要
Step 1	ハザード同定 Identification of Hazards	事故に至る考慮すべき種々の危険性（ハザード）を特定する。
Step 2	リスク評価 Risk Assessment	ハザードから、事故の生じる確率、事故後の災害進展の推定、およびそれらの災害進展が生じる確率、各災害進展が生じた場合の結果の重大性（人命損失数、環境汚染、財産の喪失等）を求めることにより、船舶に種々の形態の事故が生じた場合のリスクを求める。
Step 3	リスク制御オプション Risk Control Options	船舶のリスクを減少させる種々の手段（リスク制御オプション）を考慮し、それらを導入した場合のリスクの減少を推定する。
Step 4	費用対効果の評価 Cost Benefit Assessment	種々のリスク制御オプションを実現するためのコストを評価し、ステップ3と合わせてリスク制御手段の妥当性を評価する。
Step 5	意思決定のための勧告 Recommendations for Decision Making	ステップ4までの結果から、有効と思われる基準案の絞り込みを行い、審議のための勧告を行う。

これらの内、FSAにおいて困難かつ重要な段階はStep 3のRCOによるリスクの変化を含むStep 2のリスク評価である。リスクは、事故発生確率と、その後の結果の重大性との積の概念であり、それを求めるには、事故に繋がる危険性から事故に至る確率を求め、次に、事故発生後に生じる種々の災害の進展過程、およびそれらの確率、さらに避難・救助による救出過程を推定して結果の重大性を評価することにより推定される。すなわち、Step 2では、事故に至る過程を示すフォールトツリー、事故発生から最終結果（人命損失、

環境汚染、財産の喪失等）までのイベントツリー、およびイベントツリーの各最終端が示す結果の定量化を行うことにより、リスクを定量化する。現状のリスクは、既に使用可能な事故統計があるため、それらの解析により得られる。RCOは、危険な状況の発生から事故発生に至る過程、さらに、事故発生から最終状態に至る過程における種々の部分に影響を与えることによりリスクを変化させる。その効果は、実施する前の段階では事故統計に現れないため、それ以外の何らかの方法で予測しなければならない。

英国によるFSAの試適用²⁾では、RCOの効果の推定に専門家判断のみを用いており、専門家判断からリスクの変化を求める図（Regulatory Impact Diagram）を作成し実施している。この方法は簡便であり、広範な分野のRCOに適用可能であるが、恣意的であり不確実性が高いとの指摘がIMOにおいてもなされている。本研究では、人間の判断のみに依存せず、恣意性の少ないリスク評価手法を開発することが目標である。

3. リスク評価の方法論

この章では、本研究で開発中のリスク評価の方法論につき論じる。以下、事故発生直後から被災船舶の最終状態までの船舶状態（傾き、船体各部の煙濃度等）の時間変化を災害進展シナリオ、また、避難者の状況の時間変化を避難シナリオと呼ぶことにする。

Fig.1は、RCOが船舶の事故発生、ないしは災害進展、避難に与える物理的な過程、およびその効果の評価過程を示している。Fig.1内の船舶の構造、運航に関連する種々の要素のうち、ハードウェアに分類される要素では、設計図面あるいは性能にRCOが反映され、それが、運動、破口生成、浸水、火災、避難等のシミュレーションにより解析され、事故の状況、人命損失数等が推定される。同様に、ヒューマンファクターに分類される要素は、ヒューマンファクターのモデル化を通して同モデルを用いたシミュレーション（操船、火災、避難等のシミュレーション）により解析され、事故の発生、および、人命損失数が推定される。物理的過程のシミュレーションは基礎となる方程式が既に明らかであり、そのようなシミュレーションプログラムとして、既存のものがあるか、なければ、作成することが可能である。しかし、ヒューマンファクターをモデル化することは、今のところほとんどなされておらず、今後の研究が最も必要とされる分野である。その方法については、現在検討中である。このような、シミュレーションによるリスク評価を特徴とするFSAをSBFSA（Simulation Based FSA）と呼ぶこととする。

なお、事故による被害の主要なものとして、人命損失、環境汚染、財産の喪失が上げられるが、本研究では、そのうち人命損失を取り上げる。他の二つは、同様の方法でリスク評価を行うことができる。

3.1 リスク評価過程

2章で触れたように、リスクは、事故が生じる確率、そして、その結果の重大性の推定により求められる。

また、RCO は、事故発生、災害進展、避難・救出の各過程に影響を与えることになる。以下に、リスクの導出方法を式にて示す。

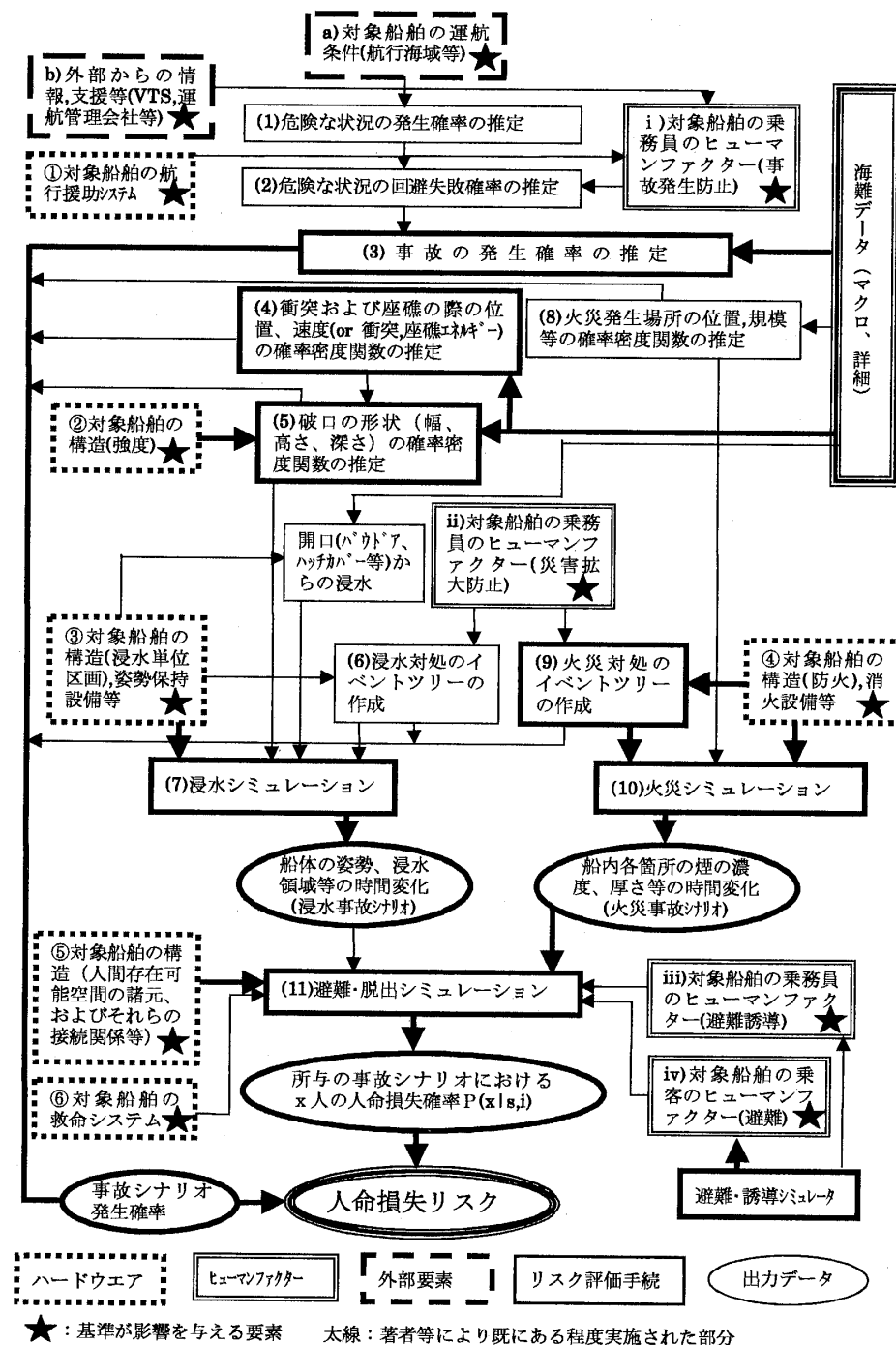


Fig. 1 Risk Evaluation Procedure for Ships

$S(s)$: 事故 s の発生頻度

$\eta(F|s)$: 事故 s が発生し火災災害が生じる確率

$\eta(W|s)$: 事故 s が発生し浸水災害が生じる確率

$\eta(O|s)$: 事故 s が発生し他の災害が生じる確率

$\eta(i|F,s)$: 事故 s が発生し火災災害が生じた場合の i 番目の火災災害進展シナリオが発生する確率

$\eta(i|W,s)$: 事故 s が発生し浸水災害が生じた場合の i 番目の浸水災害進展シナリオが発生する確率

目の火災災害進展シナリオが発生する確率

$\eta(i|O,s)$: 事故 s が発生し他の災害が生じた場合の i 番目の他の災害進展シナリオが発生する確率

$P(x|i,F,s)$: 事故 s が発生し火災災害が生じた場合の i 番目の火災災害進展シナリオが発生した場合に、 x 人が死ぬ確率

$P(x|i,W,s)$: 事故 s が発生し浸水災害が生じた場合の i 番目の浸水災害進展シナリオが発生した場合に、 x 人が死ぬ確率

番目の浸水災害進展シナリオが発生した場合に、 x 人が死ぬ確率

$P(x|i, O, s)$: 事故 s が発生し、他の災害が生じた場合の i 番目のその他災害進展シナリオが発生した場合に、 x 人が死ぬ確率

K : 対象船舶の乗客、乗員の最大数

n : 考慮する事故の種類

$n(j, s)$: 事故 s 、災害 j における災害進展シナリオの数とすると、この船のリスクを、以下のように求める。

$$Risk = \sum_{s=1}^n S(s) \sum_{j=F, W, O} \eta(j|s) \sum_{i=1}^{n(j, s)} \eta(i|j, s) \sum_{x=0}^K P(x|i, j, s) \cdot x$$

ここで、

$$P(x) = \sum_{s=1}^n S(s) \sum_{j=F, W, O} \eta(j|s) \sum_{i=1}^{n(j, s)} \eta(i|j, s) \cdot P(x|i, j, s)$$

$$F(x) = \sum_{i=x}^K P(i)$$

とおき、横軸に x 、縦軸に $F(x)$ をとり、 $(x, F(x))$ をプロットすると、いわゆる $F-N$ (Frequency-Number of Fatality) 曲線ができる。

また、

$$\sum_{x=0}^K F(x) = \sum_{x=0}^K P(x) \cdot x = Risk$$

である。すなわち、最初の式で定義した値は、 $F-N$ 曲線の積分値である。また、この値は、英国の FSA の試適用にある PLL (Potential Loss of Life) と同じ意味を持つものである。

3.2 事故発生確率の推定

Fig.1 に示すように、事故は、そのまま放置すると何らかの事故に繋がる危険な状況の発生と、その状況の回避失敗が同時に生じた場合に発生する。すなわち、事故発生確率は、危険な状況の発生とその状況の回避失敗確率との積で求められる。事故発生確率は、対象海域の事故統計データおよび航行船舶のデータから得られるが、 RCO によりどれほど事故発生確率が抑えられるかはわからない。これを求める方法として、事故が発生するまでの過程をフォールトツリーで記述し、それを定量化する方法⁶⁾がある。この場合、 RCO の効果は、ハードウェアの信頼性の向上、または、ヒューマンエラーを抑える効果の定量化により求められるが、これらは困難である。

ここで、衝突、座礁を考慮する。現実の船舶の運航は、多くの船舶によるモンテカルロシミュレーションとみなすことができる。これまでの運航結果、すなわちモンテカルロシミュレーションの結果として、種々の状況における多数の事故例が積み重ねられ、ある程度信頼性のある事故発生確率を得ることができるようになった。Fig.1 に示すハードウェア、外部影響、さらにヒューマンファクターの妥当なモデル化がなされ

ば、それらをシミュレーションプログラムに組入れ、評価対象船舶の運航条件のもとで、事故発生までモンテカルロシミュレーションを実施することにより、事故発生確率が求められると考えられる。衝突、座礁に関しては、これまでの事故の詳細データから損傷あるいは破口の位置および大きさの確率密度関数を得ることができる^{7), 8), 9)}。しかし、使用できるデータ数がそれほど多くないため、それらの信頼性には難がある。衝突あるいは座礁においては事故時の衝突位置、衝突エネルギー、および船体構造が与えられれば計算で破口を求めることも可能である。また、上述したように、航行シミュレーションから衝突位置の分布を求めることも可能であろう。

3.3 災害進展シナリオおよびその発生確率の推定

事故が発生すると、船舶の場合、浸水、火災等の避難の時間余裕がある災害、および転覆、大規模爆発等の避難の時間余裕のない瞬時の災害が生じる。災害進展シナリオは発生場所毎に原理的に無限に存在する。災害進展をイベントツリーで記述することを考慮すると、消火、扉閉鎖等のイベントの数は有限であるが、それらのイベントの生じる順序は一定ではなく、発生する時刻は原理的に無限であるため、無限の災害進展シナリオがあることがわかる。したがって、シミュレーションで人命損失数を求めることが可能であるためには、それらを結果が同じである範囲でグループ化し、その中から代表災害進展シナリオを求めることが必要となる。また、各グループに所属する災害進展シナリオが判明すれば、そのグループの発生確率を求めることができる。しかしこの方法は、まず無限にある災害進展シナリオを求めることが前提であるため、実施困難である。とりあえず、5章におけるリスク評価の試行では、専門家により、結果が相似とみなされるイベントシーケンスをグループ化して代表イベントシーケンスを求め、イベントの発生時刻を仮定して煙流動シミュレーションを実施することにより火災災害進展シナリオを求めている。

3.4 人命損失数の推定

ここでは、ヘリコプター、船舶等による救出は扱わず、船舶喪失に至る事故では船外脱出に失敗する人数、船舶内の避難場所に逃げれば良い場合はそれに失敗する人数の推定方法につき論じる。

与えられた災害進展シナリオを取り入れて、避難シミュレーションを実施し、火災災害であれば、途中である時間以上煙に巻かれた等が生じればその人は死亡とする。浸水災害であれば、救命艇で船外脱出に失敗した人、ある時間以上水没した人等は死亡とする。人間の判断は特に緊急時は確率的であるため、分岐部における進行方向の選択、避難開始時間の設定等のヒューマンファクターを確率密度関数の形で整理することが必要である。これが可能であれば、災害進展シナリ

オ毎にヒューマンファクターがモデル化された避難シミュレーションプログラムを用いてモンテカルロシミュレーションを実施し避難シナリオ毎の死者数を求めることにより、災害進展シナリオ毎の人命損失期待値を求め、さらに、3.1 節のリスクの式を用いて人命損失リスクを求めることができる。

4. リスク評価システム

これまで、事故発生以後の災害進展および避難の解析を実施するシミュレーションプログラムのプロトタイプを作成するとともに、使用の便および、シミュレーションプログラムの一貫した入出力を可能とするために、船舶入力モジュールを作成した。これらのプログラムから構成されるリスク評価システムは、リスク評価の専門家でなくても使用可能なように、システムの入力は船舶の設計図面等、船舶関係者が容易に扱うことのできる情報のみであることを目標としている。本章では、プロトタイプシステムの概要を示す。詳細は文献 10) を参照されたい。

4.1 船舶入力モジュール

このプログラムは、浸水、煙流動、避難の各シミュレーションプログラムに、対象船舶の内部空間の形状、接続関係および属性に関するデータを提供するものである。区画、居室等を実体と見てリレーショナルデータモデルでモデル化し、船舶全体を一元的にデータベース化することによって、各シミュレーションプログラムへ提供するデータの一貫性を確保している。

現在、一般配置図等の図面から点の座標を読み取って入力しているが、GPME あるいは種々の CAD で記述された船舶を自動で入力可能なように改良する必要がある。

4.2 浸水シミュレーションプログラム

このプログラムは、静的な釣合い計算を基本としており、船体内の滞留水は直ちに区画内に広がり水平面を形成すると仮定している。しかし、滞留水が増加して GM が負になる瞬間には次の平衡点まで瞬時に傾斜するという不自然さを解決するため、その場合に限って慣性力および減衰力を作用させるようにしている。また、外力としては定常風による傾斜偶力だけを考慮している。

4.3 煙流動シミュレーションプログラム

火災時の人命は煙により失われるものと仮定し、出火からの時間と船内各部における煙の状態の関係を求めるため、建築研究所が開発したもの⁹⁾を基礎として、煙流動シミュレーションプログラムを作成した⁹⁾。

プログラムは二層ゾーンモデルと呼ばれるものである。二層ゾーンモデルでは、船内の水平面を多数の区

画に分割し、各空間（以下、「室」と呼ぶ。）は上層（煙層）と下層（空気層）に明確に分離されるものと仮定し、それぞれの層の中では、温度や煙濃度は均一であると仮定する（瞬時拡散の仮定）。二層ゾーンモデルは、出火から数分間程度の短い時間における煙流動の状態を求めるのに必ずしも適したものではないが、多くのケースについてシミュレーションを実施するのに適しているため採用した。二層ゾーンモデルとしての本プログラムの特徴⁹⁾を以下に示す。

- (1) 火源は発熱率と単位発熱量当たりの発煙量で与え、各室のそれぞれの層における温度と煙濃度のみを求める。
- (2) 通風装置（ファン）のモデルを含む。
- (3) 廊下等の長大な空間は、通気抵抗の無い開口部だけで構成される仮想的な仕切り（以下「仮想仕切り」と呼ぶ）で仕切ることにより複数の室として扱える。
- (4) 仮想仕切りで仕切られた室等の煙層下端の高さの計算結果が振動することを防ぐため、陰解法を用いている。

4.4 避難シミュレーションプログラム¹⁴⁾

このプログラムでは、避難者の行動モデルを避難の長期計画、短期計画等の知識ベースにより構成し、また、船舶内の居室、廊下等の空間モデルを階層的なフレームで構築した。現在、本プログラムは、煙流動シミュレーションプログラムからの出力（火災災害進展シナリオ）を読み込み、空間モデル内に展開することにより、各空間の煙濃度の時間変化を実現している。また、乗客、乗員の違いにより避難の方法に違いがあり、乗員は直面する状況毎に最適な経路を選択して避難することを可能とし、乗客は目の前の開口を目指して避難するとしている。また、避難開始時間を個別に設定することが可能である。今後は、確率的な避難者モデルの開発、および、浸水災害下での避難シミュレーションのための改良が必要である。

5. リスク評価の試行

開発されたリスク評価手法の適用災害として居室火災のみを取り扱い、火災拡大防止のための RCO として、スプリンクラを考慮する。また、出火場所は、Fig.2 に示す D デッキの船室とする。

5.1 リスク評価試行用船舶

リスク評価の試行に用いた船舶の一般配置図を Fig.2 に示す。この船の構造及び設備は、スプリンクラの有無を除き、1994 年 10 月 1 日発効の SOLAS 条約を満たすものと仮定する。

この船の居住区域は、三つの主垂直区域（以下、「MVZ」と呼ぶ。）により構成されている。居住区域の天井の高さ（甲板間高さとは異なる。）は 2.2 m である。

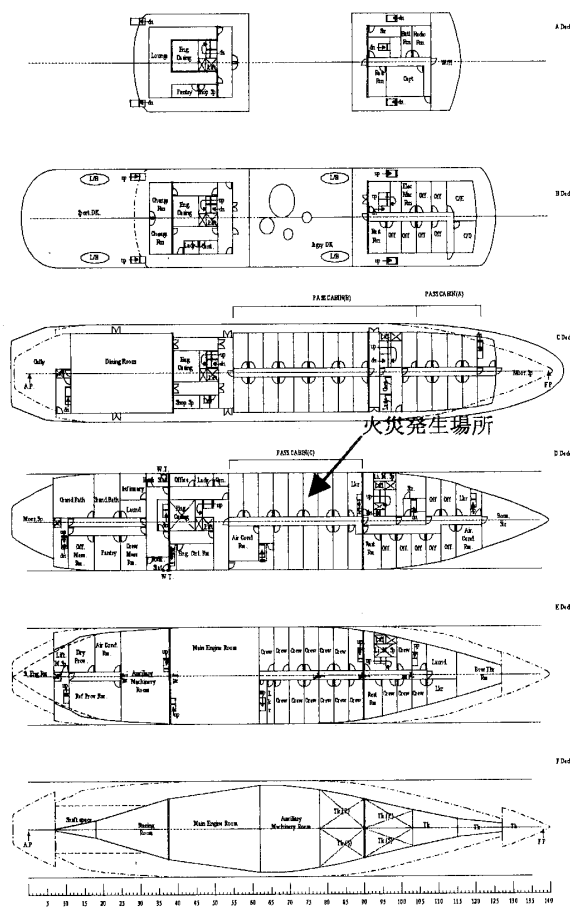


Fig.2 General Arrangement of the Ship for Trial Application of the System and Methodology

居室の扉は幅 0.9 m、高さ 1.9 m である。

各室と廊下との間のバランスダクト（扉下部の開口）は、幅 200 mm、下端高さ 300 mm、上端高さ 600 mm で、常時開いている。また、全ての防火扉には通用扉があり、通用扉は幅 600 mm、高さ 1500 mm である。廊下には排煙設備は無く、階段室の排煙ファンは全て、定格圧力 50 mmAq、定格流量 0.5 m³/sec である。煙流動計算においては、扉等の流量係数は一律 0.7、階段室を除く水平開口の流量係数は 0.3 とした。

Table 2 Numbers of Passenger ships and casualties

年	運航旅客船	事故件数
78	3928	33
79	4069	69
80	4227	61
81	4338	66
82	4437	65
83	4528	57
84	4595	81
85	4692	63
86	4799	62
87	4947	50
88	5074	45
89	5226	35
90	5416	64
91	5558	70
92	5712	43
93	5875	37
94	6009	28
95	6145	28
計	89575	957

5.2 現状の事故および災害発生確率

1978 年から 1995 年までの LMIS(Lloyd's Maritime Information Services)による海難データ、船舶データを使用した。対象とする船舶は旅客船（フェリーを含む）とする。

Table 2 は旅客船及び旅客船の事故の数の推移を示す。Table 3 は旅客船の事故の種類とそれぞれの事故における死者等の数を、Fig.3 は各災害における発生頻度と人命損失数との関係(F-N Curve)を示す。また、Table 4 は事故における災害の種類と死者等の数およびリスク(F-N Curve の積分値)を示す。

これらの表より明らかなように、旅客船において、人命損失をもたらす主要な事故は、衝突、接触、座礁、

Table 3 Casualty Types and Number of Live Lost (from LMIS Casualty Database)

事故	件数	死者数	不明者数	死者数＋不明者数
衝突	136	896	109	1005
接触	102	401	0	401
座礁	264	132	372	504
浸水	92	750	1392	2142
火災/爆発	209	525	511	1036
戦争	20	11	1	12
故障	129	17	17	34
その他	5	0	0	0
不明	0	0	0	0
計	957	2732	2402	5134

Table 4 Disaster Types , Number of Lives Lost and Risk (from LMIS Casualty Database)

災害	件数	死者数	不明者数	死者数＋不明者数	リスク (人/(Ship・Year))
火災災害	223	793	513	1306	1.46E-2
浸水災害	250	1867	2325	4192	4.68E-2
浸水&火災災害	38	350	454	804	9.00E-3
他の災害	522	422	18	440	4.93E-3
合計	957	2732	2402	5134	5.75E-2

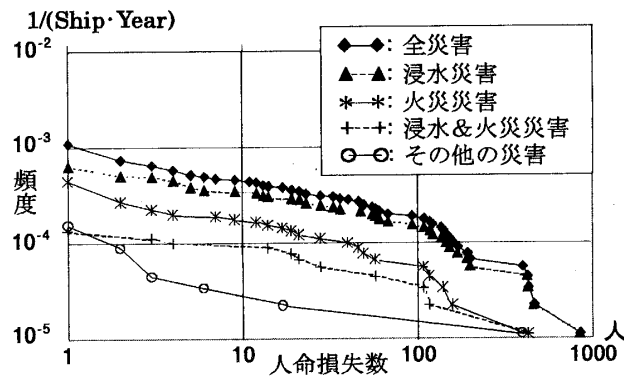


Fig.3 Frequency - Number of Fatality Curves of Disasters in Passenger Ships (from LMIS Casualty Database)

浸水、火災であり、人命損失をもたらす災害は、浸水、火災が大半であることがわかる。

5.3 火災災害におけるイベントの解析

5.3.1 解析の概要

所与の条件下における人命損失数の期待値は煙流動シミュレーション及び避難シミュレーションにより求められると仮定しても、シミュレーションの対象となる条件及びその発生確率の推定のためには、ETA 及び FTA を実施する必要がある。

煙流動シミュレーションを行うためには、多くの条件を設定する必要があるため、ここでは Large Event Tree - Small Fault Tree モデルを用いた。

5.3.2 火災災害解析対象区域の導入

火災災害の進展をシミュレートするには、初期の状態では、火源の近傍の局所的な状態を考慮すれば良く、火災の拡大とともにより広い範囲を考慮する必要があるが生じる。そのため、火災の進展に合わせて、考慮すべき範囲を段階的に広げていくこととした。こうした範囲を解析対象区域と呼び、以下の 4 を設定した。

- (A) 火災室及びこれに面する廊下
- (B) 火災 MVZ 内の火災階
- (C) 火災 MVZ 内（非火災階を含む。）
- (D) 全船（全居住区域）

解析対象区域の導入は、災害進展シナリオのグループ化を多段階で行うことを可能にし、考慮すべきシナリオの数の低減に寄与する。

5.3.3 イベントツリーの作成^{8),10)}

火災災害に関する Functional Event Tree の作成においては、以下の 13 のイベントを想定した。

- (1) 火災初期における探知・確認
- (2) 持ち運び式消火器による消火
- (3) 火災室内における煙の区画化
- (4) 火災室前の廊下における煙の区画化
- (5) スプリンクラによる消火（火災探知）
- (6) 火災 MVZ の火災階における階段室への煙流動防止及び他の MVZ の廊下への煙流動防止
- (7) 消火栓による消火
- (8) 廊下及び他の室への延焼防止
- (9) 火災 MVZ 内における階段室からの煙流動防止及び非火災階廊下からの煙流動防止
- (10) 非火災 MVZ から他の MVZ への煙流動の防止
- (11) 非火災階への延焼防止
- (12) 非火災 MVZ への延焼防止
- (13) 密閉消火

「密閉消火」は、居室火災については考え難いが、イベントツリーの汎用性を考慮して含めた。

Functional Event Tree に基づき、より詳細な System Event Tree を作成した。System Event Tree におけるイベントの数は 72 であった。ここで、厳密には個々に考慮すべき扉やダクトの開閉等については、簡単のため、一括して正否を論じている。

5.3.4 フォールトツリーの作成^{9),10)}

System Event Tree 上の各 Event を Top Event とするフォールトツリーを作成した。Fig.4 に例を示す。

これらのフォールトツリーを用いて計算を行うのに、適当に確率値を与える必要のある事象(以下「基本事象」と呼ぶ。)の数は 214 である。

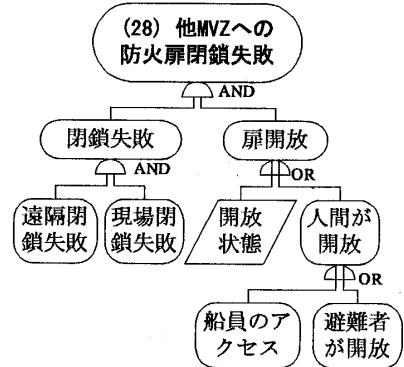


Fig.4 An Example of Fault Tree

5.3.5 火災発生時の状況の仮定¹⁰⁾

船舶における居室火災は、昼夜を問わず発生し、また、停泊中にも多く発生しているが、簡単のため、航海中であって乗員・乗客の殆どは起きている状態で発生した火災について検討した。

5.3.6 確率の計算¹⁰⁾

基本事象の中には、船舶の設計や火災発生時の

状況により確率値が決まるものも多い。こうした事象では、人間による作業等とは異なり、装置の有無のように確率値が 0 または 1 になる場合もある。このことを考慮して、基本事象の確率は Table 5 に示す 10 段階で表現し、それぞれの表現について適当な確率値を与えた。但し、スプリンクラがある場合の消火失敗の確率は、米国の National Fire Protection Association の調査結果¹²⁾に基づき 4%とした。基本事象のうち、船舶の設計により確率値を決定したものは 70、火災発生時の状況により確率値を決定したものは 29、船舶の設計と火災発生時の状況の両方により確率値を決定したものは 6、その他は 109 であった。

基本事象の確率に基づき、各フォールトツリーの Top Event の生起確率、即ち、System Event Tree における各分岐の確率の計算結果を Table 6 に示す。表中の

Table 5 Expression and Value of Provability

確率の表現	確率値
Absolutely	1
Certainly	0.99
Mostly	0.9
Very_Freq	0.8
Frequent	0.5
Probable	0.2
Occasional	0.1
Remote	0.01
Negligible	0.001
Impossible	0

Table 6 Branching Probabilities of System Event Tree

Area	No	Event	確率	Area	No	Event	確率
(A) 火災室及びこれに面する廊下	1	火災室内の人間による火災探知失敗	0.099	(C) 非火災階を含む火災MVZ	37	火災室と廊下の間の扉崩壊	0.2
	2	火災室の火災感知器作動失敗	0.01		38	火災室と廊下の間の壁崩壊	0
	3	廊下の煙感知器作動失敗	0.01		39	火災室の天井崩壊－廊下へ延焼	0
	4	廊下等の人間による火災探知失敗	0.92		40	火災室と隣接室間の壁崩壊	0
	5	警報システム作動失敗	0.2872		41	火災室の天井崩壊－隣接室へ延焼	0
	6	火災確認システム失敗	0.2872		42	仕切り昇温による廊下への延焼	0
	7	直ちに消火できる範囲に消火器無し	0.208		43	仕切り昇温による隣接室への延焼	0
	8	消火器能力不足	0.038		44	非火災階階段防火扉閉鎖失敗	0.04555
	9	火災室窓開放	0.1		45	階段室非火災階防火扉の通用扉開放	0.109
	10	火災室空調ダクト開放	0.5		46	階段室煙制御ダクト閉鎖	0.08
	11	火災室空調ファン停止失敗	0.8		47	階段室煙制御装置起動失敗	0.1009
	12	火災室排煙ダクト閉鎖	1		48	非火災階廊下煙制御ダクト閉鎖	1
	13	火災室排煙装置起動失敗	0.91		49	非火災階廊下煙制御装置起動失敗	0.1009
	14	通路へのバランスダクト	1		50	非火災階廊下通常扉閉鎖失敗	0.04995
	15	その他のバランスダクト有り	0		51	非火災階廊下防火扉閉鎖失敗	0.045545
	16	火災室扉開放有り	1		52	非火災階廊下防火扉の通用扉開放	0.6
	17	火災室開放扉閉鎖失敗	0		53	他 MVZ 火災階廊下煙制御ダクト閉鎖	1
(B) 火災MVZ内火災階	18	廊下煙制御ダクト閉鎖	1	(D) 全居住区域	54	他 MVZ 火災階廊下煙制御起動失敗	0.1009
	19	廊下煙制御装置起動失敗	0.55		55	他 MVZ 火災階廊下通常扉閉鎖失敗	0.0999
	20	開放防煙扉閉鎖失敗	1		56	他 MVZ 火災階廊下防火扉閉鎖失敗	0.04555
	21	閉鎖防煙扉開放有り	0.872		57	他 MVZ 火災階廊下防火扉通用扉開放	0.6
	22	閉鎖防煙扉閉鎖失敗	0		58	他 MVZ 火災階階段防火扉閉鎖失敗	0.009905
	23	非火災室ダクト開放	0.855		59	他 MVZ 火災階階段防火扉通用扉開放	0.6
	24	非火災室扉開放有り	0.91		60	他 MVZ 階段室煙制御ダクト閉鎖	0.02
	25	非火災室開放扉閉鎖失敗	0.05		61	他 MVZ 階段室煙制御装置起動失敗	0.1009
	26	スプリンクラ消火失敗	0.04		62	階段室への壁崩壊	0.1
	27	他 MVZ への通常扉閉鎖失敗	0.00999		63	階段室内燃焼物有り	0.992
	28	他 MVZ への防火扉閉鎖失敗	0.04555		64	階段室からの壁崩壊－延焼	0.02
	29	他 MVZ への防火扉の通用扉開放	0.109		65	縦ダクトへの壁崩壊	0.1
	30	階段室への防火扉閉鎖失敗	0.0482		66	縦ダクト内燃焼物有り	0.208
	31	階段室への防火扉の通用扉開放	0.6		67	縦ダクトからの壁崩壊－延焼	0.02
	32	階段室煙制御ダクト閉鎖	0.028		68	甲板貫通 (延焼)	0
	33	階段室煙制御装置起動失敗	0.19		69	火災階壁崩壊－他 MVZ へ延焼	0.05
(C)	34	直ちに消火できる範囲に消火栓無し	0.36		70	非火災階壁崩壊－他 MVZ へ延焼	0.05
	35	消火栓能力不足	0.056		71	開口部閉鎖不良	0.1
	36	火災室窓崩壊	0.0016		72	開口部等崩壊 (密閉失敗)	0.208

"Area"とあるのは 5.3.2 節で述べた解析対象区域である。

確率が 0 でも 1 でも無い Event の数は 55 である。

スプリンクラが無い場合については、「(26)スプリンクラ消火失敗」の確率を 1 として評価する。

5.3.7 代表イベントシーケンス及びその発生確率¹¹⁾

Table 6 中のイベントにより構成されるイベントツリーで表される各イベントシーケンスについて解析することは現実的では無いため、それらのグループ化を行い、代表イベントシーケンスとその発生確率を求めた。

本来であれば、イベントシーケンスについて、解析対象区域内で煙流動シミュレーション及び避難シミュレーションを行い、人命損失の期待値が概ね等しくなるものをグループ化すべきであるが、3.3 節で指摘したように実施困難なため、結果が同様と判断されるイベ

ントシーケンスをグループ化した。

グループ化に際しては、各解析対象区域毎に、各イベントシーケンスに対応する人命損失の期待値を推定し、"Marginal", "Critical", "Catastrophic"の三つにグループ化した。但し、「火災室及びこれに面する廊下」の解析対象区域においては、「持ち運び式消火器による消火」に成功した場合は、人命損失は無いものと仮定し、別のグループ ("Negligible"と呼ぶ。)とした。イベントシーケンスの各グループについては、発生確率を計算し、代表イベントシーケンスを選定した。各グループの発生確率を Table 7 に示す。

消火に成功した場合には引き続くイベントは発生しないものとして各解析区域における代表イベントシーケンスの組み合わせを求めるとその数は 46 となり、そ

れぞれについてスプリンクラがある場合と無い場合の確率を求めた。

簡単のため、消火活動の正否、火災探知の遅速及び防火扉閉鎖の正否にのみ着目して代表イベントシーケンスのグループ化を行った。結果を Table 8 に示す。表においてイベントは時系列的に並んでいないことに留意されたい。

Table 7 Probabilities of Representative Event Sequences

解析対象区域	発生確率			
	Neg.	Margin.	Critic.	Catas.
火災室及び廊下	5.43E-01	1.69E-01	2.88E-01	3.37E-05
火災 MVZ 火災階	-	9.60E-01	3.63E-02	3.66E-03
同,スプリンクラ無	-	0	9.09E-01	9.15E-02
火災 MVZ	-	6.04E-01	3.61E-01	3.52E-02
全居住区域	-	6.08E-01	3.54E-02	3.57E-01

5.3.8 Event 発生タイミングの仮定

煙流動シミュレーションを実施するには、各イベントが発生するタイミングを設定する必要があるため、火災の規模、人間の移動速度等を勘案し、出火から各イベントが発生するまでの時間を設定した。

5.4 煙流動シミュレーション

5.4.1 火源の仮定

消火や延焼を考慮して、火源の発熱率を Fig. 5 に示す通り仮定した。また、単位発熱量当たりの発煙量は $0.02 \text{ m}^3/\text{kJ}$ とした。

5.4.2 通行の限界¹³⁾

避難シミュレーションの入力データとして、煙流動シミュレーション結果に基づき、船内各部が通行不能になる時間を求める必要がある。そのため、上層下端の高さが 1.2 m に達したら乗員、乗客は通行できないものと仮定した。また、本シミュレーションプログラムは、火災ブルーム及び開口ジェットブルームを含み、

下層への煙の侵入もモデル化しているため、下層の煙濃度も変化する。下層の減光係数が 0.1 m^{-1} になると乗客は通行できないものとし、 0.5 m^{-1} になると乗員も通行できないものと仮定した。

5.4.3 計算結果

このモデルでは、火災室を含む空間が密閉された状態を扱うことができない。そのため、計算条件によっては、計算を途中で打ち切る、または、開口を仮定する必要が生じる。

計算の結果、Table 8 に示した条件のうち、5 番までの条件では通行に支障を来すほど煙が流動しないことになり、人命損失の期待値は零であると推定した。6 番及び 7 番の条件については、前述の計算の都合により一つの計算結果で代表させた。

同様に、計算の都合等により、Table 8 の 8 番～10 番、11 番～13 番の条件に対応する煙流動状況は、はそれぞれ一つの計算結果で代表させた。火災室前の廊下における上層下端高さ及び下層の煙濃度を Fig. 6 に示す。

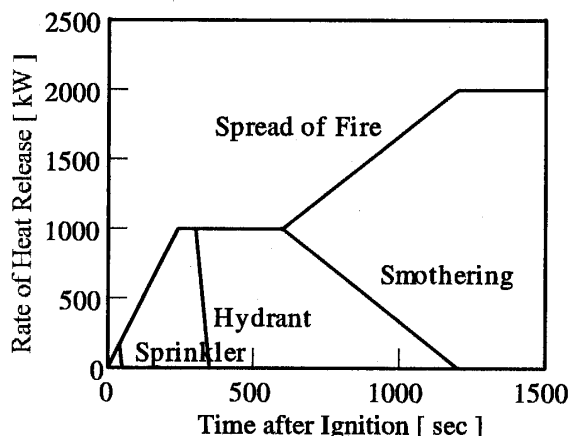


Fig. 5 Rate of Heat Release of Fire

Table 8 Status and Probabilities of Representative Event Sequences

消火				火災の早期探知		防火扉の閉鎖		No.	発生確率	
消火器	スプリンクラ	消火栓	密閉	火災室の人間	その他	火災階	MVZ		スプリンクラ有り	スプリンクラ無し
成功	—	—	—	—	—	—	—	1	5.43E-01	5.43E-01
失敗	成功	—	—	成功	—	—	—	2	1.62E-01	0
				失敗	—	—	—	3	2.76E-01	0
	失敗	成功	—	成功	—	—	—	4	4.09E-03	1.02E-01
				失敗	—	成功	—	5	6.32E-03	1.58E-01
				成功	—	失敗	—	6	6.36E-04	1.59E-02
						—	—	7	1.72E-03	4.31E-02
		失敗	成功	失敗	成功	成功	—	8	2.66E-03	6.66E-02
					失敗	失敗	—	9	2.68E-04	6.70E-03
				成功	—	—	—	10	3.44E-07	8.59E-06
					成功	—	—	11	2.58E-03	6.45E-02
			失敗	—	失敗	—	成功	12	1.89E-07	4.73E-06
							失敗	13	1.55E-09	3.88E-08

この条件では、火災室扉の開放により一度煙が流出した後、扉の閉鎖により煙の流出は一時的に止まり、その後、火災室内の煙層が厚くなり、扉下部にあるバランスダクトから煙が流出している。

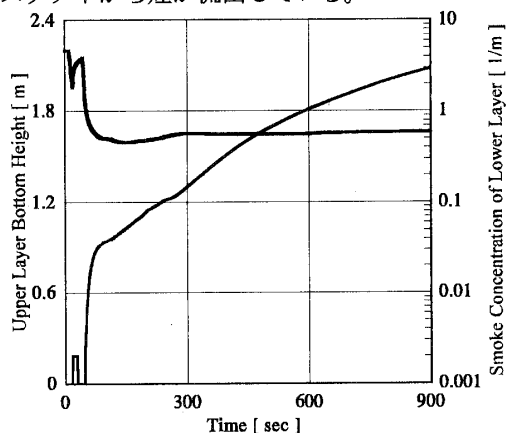


Fig. 6 Time History of Smoke Condition (No. 8 - 10)

以上により、避難シミュレーションの入力データとなる煙流動計算結果（すなわち火災災害進展シナリオ）が得られた。それぞれの計算結果に対応する確率は Table 9 の通りである。

Table 9 Grouped Disaster Event Sequences

災害進展 イベントシーケンス	発生確率	
	スプリンクラ有り	スプリンクラ無し
6, 7 (A)	2.36E-03	5.90E-02
8, 9, 10 (B)	2.93E-03	7.33E-02
11, 12, 13 (C)	2.58E-03	6.45E-02

5.5 避難シミュレーション¹⁴⁾

煙流動シミュレーションプログラムより出力された 3 通りの火災災害進展シナリオを用いて、避難シミュレーションを実施した。その結果を、Table 10 に示す。

なお、火災災害進展イベントシーケンス B および C は、避難シミュレーションの結果はほとんど一致しているため、災害進展イベントシーケンス A および C の二つに対応する火災災害進展シナリオで避難シミュレーションを行った。さらに、避難シミュレーションでは、乗客および乗員の初期配置を 2 種類に分け、乗客を 3 種類に分けて避難開始時間をそれぞれ異ならせている。避難開始時間は乗員の行動の結果であり、また、乗員、乗客の初期配置も確率的であるため、それらをモデル化してモンテカルロシミュレーションを実施することになるが、それらの確率的なモデルが得られていないので、数種類の避難開始時間および初期配置を想定して避難シミュレーションを決定論的に実施した。

初期配置は、ほとんどの乗客がレストランにいる食事時、およびそれ以外の時をそれぞれ代表させているが、レストランへ大半の乗客が居る時間を、朝食、昼食、夕食それぞれ 1 時間とし、計 3 時間と仮定した。

この仮定に基づき、初期配置 A の発生確率は 0.125、B の発生確率は 0.875 とした。また、火災室の乗客が避難開始する場合は、災害進展イベントシーケンスが A の場合は、15 秒を境に、それ以前の場合を 10 秒(t_1)に、また、それ以降の場合を 20(t_1)秒に代表させ、それぞれ発生確率を 0.5 とした。また、火災災害進展イベントシーケンスが B, C の場合は、Table 10 のようにした。 t_2 ないし t_3 の値が 3 通りある場合は、正規分布を仮定し、それぞれ、 $-\sigma$ 、平均値、 $+\sigma$ として、 $\pm\sigma$ で分割される正規分布曲線の 3 つの部分を表させた。

5.6 リスク評価

3.1 節のリスク評価式は、事故発生確率を用いることを前提としているが、ここでは、事故発生確率を使用せず、災害発生確率を Table 4 の値を用いて求め、その後、災害進展イベントシーケンスの発生確率、そして、それぞれの災害進展イベントシーケンスにおける避難シナリオの部分リスクを求めるという方法を採用した。また、5.5 節で述べたように、数種類の条件を設定し、決定論的に実施した避難シミュレーションによる人命損失数、および、5.5 で示した各条件の発生確率から、 $\sum_{i=1}^K P(x|i, j, s) \cdot x$ (人命損失期待値) を計算した。

船舶のリスクは、浸水、火災、その他の災害の部分リスクの和で求められるが、本研究により開発された方法、すなわち、災害進展イベントシーケンスの作成および災害進展シミュレーションによる災害進展シナリオの作成、災害進展シナリオ下での避難シミュレーションを実施してのリスクの導出は、火災災害のうち居室火災の場合のみであるので、浸水等のそれ以外の災害の部分リスクは、実績値である Table 4 の値を用いることにした。なお、浸水および火災災害が同じ船舶内に生起する災害は、火災災害とみなした。

以上より、リスクを以下の式で求める。

$$\text{Risk} = 3.79\text{E-}2 + 4.93\text{E-}3 + 7.94\text{E-}3 (\text{機関室火災の部分リスク}) + \text{居室火災の部分リスクの推定値}$$

以下、居室火災の部分リスクを求める。

Table 4 より、火災災害発生頻度は、以下のようを求める。

$$\sum_{s=1}^n S(s) h(F|s) = \frac{223}{89575} = 2.49\text{E-}3 (1/(\text{Ship} \cdot \text{Year}))$$

ここで旅客船事故において、居室火災が火災事故に占める割合を考慮する。ここでは、居室火災は、機関室火災以外の火災とする。LMIS 海難データによると、1978 年から 1995 年までの 18 年間に発生した総トン数 100 トン以上の船舶において火災災害を生起した事故 223 件のうち 101 件が機関室火災であるため、居室火

Table 10 Results of Trial Application of the System and Methodology

災害進展 イベント シーケンス	災害進展 シナリオ発生確率(スプリンクラ有)	災害進展 シナリオ発生確率(スプリンクラ無)	初期配置	初期配置発生確率	火災室乗客避難開始時間	t1発生確率	火災階乗客避難開始時間(t2)	t2発生確率	他の階乗客避難開始時間(t3)	t3発生確率	避難シナリオ発生確率(スプリンクラ有)	避難シナリオ発生確率(スプリンクラ無)	人命損失数	部分リスク(スプリンクラ有)	部分リスク(スプリンクラ無)
A	2.36E-03	5.90E-02	A	1.25E-01	10	0.5	70	1	70	0.16	2.36E-05	5.90E-04	0	0.00E+00	0.00E+00
									130	0.68	1.00E-04	2.51E-03	0	0.00E+00	0.00E+00
									160	0.16	2.36E-05	5.90E-04	0	0.00E+00	0.00E+00
					20	0.5			120	0.16	2.36E-05	5.90E-04	3	7.07E-05	1.77E-03
									180	0.68	1.00E-04	2.51E-03	7	7.02E-04	1.75E-02
									210	0.16	2.36E-05	5.90E-04	7	1.65E-04	4.13E-03
			B	8.75E-01	10	0.5	70	1	70	0.16	1.65E-04	4.13E-03	0	0.00E+00	0.00E+00
									130	0.68	7.02E-04	1.75E-02	0	0.00E+00	0.00E+00
									160	0.16	1.65E-04	4.13E-03	0	0.00E+00	0.00E+00
					20	0.5			120	0.16	1.65E-04	4.13E-03	9	1.49E-03	3.72E-02
									180	0.68	7.02E-04	1.75E-02	26	1.82E-02	4.56E-01
									210	0.16	1.65E-04	4.13E-03	26	4.29E-03	1.07E-01
B,C	5.51E-03	1.38E-01	A	1.25E-01	20	0.9			120	0.16	9.92E-05	2.48E-03	3	2.98E-04	7.44E-03
									180	0.68	4.22E-04	1.05E-02	11	4.64E-03	1.16E-01
									210	0.16	9.92E-05	2.48E-03	15	1.49E-03	3.72E-02
					120	0.05	120	1	120	1	3.44E-05	8.61E-04	4	1.38E-04	3.45E-03
									180	0.04	2.76E-05	6.89E-04	12	3.31E-04	8.27E-03
									210	0.01	6.89E-06	1.72E-04	16	1.10E-04	2.76E-03
			B	8.75E-01	20	0.85			120	0.16	6.56E-04	1.64E-02	10	6.56E-03	1.64E-01
									180	0.68	2.79E-03	6.97E-02	27	7.53E-02	1.88E+00
									210	0.16	6.56E-04	1.64E-02	30	1.97E-02	4.92E-01
					120	0.1	120	1	120	1	4.82E-04	1.21E-02	12	5.79E-03	1.45E-01
									180	0.03	1.45E-04	3.62E-03	29	4.20E-03	1.05E-01
									210	0.02	9.64E-05	2.41E-03	32	3.09E-03	7.72E-02
計													1.47E-01	3.66E+00	

災の発生割合を 54.7%とする。Table 10 は、居室火災のみの部分リスクの推定を示している。

さらに、本報で実施した居室火災のイベントツリー解析では、軽い事故も考慮に入れているが、LMIS 海難データにはシビアアクシデントのみが記されていることを考慮しなければならない。したがって、LMIS 海難データには記載されない軽い事故も見積もる必要がある。その割合は、ここで実施したイベントツリー解析により、0.543 とする。この値は、Table 8 のイベントシーケンス No.1 の発生確率である。

以上より、リスクは、下式の如く求められる。

$$\text{Risk} = 5.07E-2 + 2.49E-3 \times 0.547 \times \frac{1}{1-0.543} \times \left\{ \begin{array}{l} 1.47E-1 \\ 3.66E0 \end{array} \right\}$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} 5.07E-2 + 4.38E-4 \\ 5.07E-2 + 1.09E-2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 5.11E-2 \\ 6.16E-2 \end{array} \right\}$$

この式で、上段はスプリンクラ有、下段はスプリンクラ無の場合であり、単位は人/(Ship・Year)である。Table 10 より、スプリンクラにより、居室火災の部分リスクは 25 倍ほど小さくなるが、他の災害による部分リスクが大きな割合を占めるため、災害全体に対するスプリンクラのリスク低減効果は、スプリンクラ無の場合に比べて約 20%の改善に止まっている。また、この値は、Table 4 の LMIS 海難データから求めた全体リスクより 6.30E-3 だけ小さくなり、10%程度の改善となる。しかし、本解析には、火災発生場所の変化、避難開始が大幅に遅れた状況等の考え得る災害進展、

避難のシナリオが十分に扱われていない等の 6 章でも指摘している問題があり、本解析によるリスク評価値は議論に耐えるものではない。

6. 考察

ここで開発したリスク評価の方法論における解決すべき大きな問題は、以下に示す 2 点である。

(1) 災害進展シナリオの数の削減

3.2 節で原理的な問題を指摘し、5.3 節で手続き面でさらに述べた通り、リスク評価の試行におけるイベントの解析では Large Event Tree - Small Fault Tree モデルを用いたため、解析すべき条件の数が膨大なものとなり、且つ、その数の低減（災害進展シナリオのグループ化）の方法は合理的とは言えない。これは、災害進展シナリオの数の本質的な無限性の他に、シミュレーションを行うには、条件を詳細に規程する必要があるため、全ての事象を網羅するには、解析すべき条件の数が膨大になることに起因する問題でもあり、イベントツリーをより簡単なものにできたとしても、各イベントの発生時間を如何に設定すべきかという問題が残る。このことから、災害進展シナリオのグループ化の手法の重要性は明らかであり、現在研究中である。

(2) シミュレーションプログラムの検証

CFD 等でも問題の点であるが、実際の問題を模擬する計算機プログラムは、実際の現象と比較して検証し

なければならない。本研究で開発した煙流動シミュレーションプログラムは建築研究所が作成したものをカスタマイズしたものである。建築研究所によるプログラムは建築の分野で標準的に使用されているものであり、同分野である程度検証されているとみなすことができよう。しかしながら、建築と異なった船舶の特徴（建築物に比較して通路の幅が狭い、通路が入り組んでいる等）があり、検証のためには、実物大の実験が必要であろう。

また、本報では詳述しなかったが、浸水シミュレーションプログラムは船舶の浸水沈没の過程の特徴（初めは急速に傾くが少し時間が経過すると傾きがほぼ一定になり、沈没間近になると急激に傾きを増して短時間で沈没する）を良く表現している¹⁰⁾が、模型実験等による検証が必要である。

避難シミュレーションプログラムは、知識工学の手法を取り入れてできるだけ細かなモデル化を行い、人間の判断方式を十分に模擬できるようにしているが、実際の人間の避難時の判断・行動のデータに基づくモデル化がまだ不十分であり、今後の改良が必要である。また、船舶の事故後の乗客、乗員の挙動はモデル化に十分な程度の記録がほとんどないため、実例による検証は困難であるが、建築物の大規模火災の記録などである程度の検証が可能と思われる。

以上の二つの問題の他に、イベントツリーの分岐確率の決定等の問題もある。大きな問題が幾つか残ってはいるが、これまで専門家判断に頼っていた事項を解析的手法で置き換えることは有意義と考える。

7. 結言

FSA 実現のためのリスク評価の方法論および船舶のリスク評価システムを開発し、同システムを用いて、RCO としてスプリンクラを例にとり、リスク評価を試行した。考察でも述べたように本リスク評価法は多くの問題を含むため、現時点では、推定したリスクの数値そのものは論じるに値するものではない。しかし、各種の事故進展状況の発生確率や被害の大きさを専門家判断により直接推定する方法と比較すれば、本リスク評価法は、事故時の事象についてより分析的に考察しているため、恣意性の排除の観点からは優れていると言えよう。また、リスクの推定精度が低い場合であっても、各種 RCO の効果を定性的に比較する等、目的によっては本リスク評価法が有効な場合もあると考えられる。

今後は問題点の解決、同システムの改良、および同システムを用いての種々の RCO の評価を実施する必要

がある。

謝辞

本研究は、日本財団の支援を受け、(社)日本造船研究協会との共同研究で実施したものである。日本造船研究協会第 42 基準研究部会長の東京大学大和教授はじめ委員の方々、並びに運輸省海上技術安全局安全基準課の方々に厚く感謝する次第である。

参考文献

- 1) INTERIM GUIDELINES FOR THE APPLICATION OF FORMAL SAFETY ASSESSMENT(FSA) TO THE IMO RULE-MAKING PROCESS, MSC/Circ.829,MEPC/Circ.335, 1997/11/17
- 2) United Kingdom: FORMAL SAFETY ASSESSMENT-Trial Application to high speed passenger catamaran vessels Final Report, DE41/INF.7 1997/12/12
- 3) Norway, ICCL: MATTERS CONCERNING SEARCH AND RESCUE, INCLUDING THOSE RELATED TO THE 1979 SAR CONFERENCE AND THE INTRODUCTION OF THE GMDSS - SOLAS regulation III/28.2: Helicopter Landing Area(HLA) on non-ro-ro passenger ships, COMSAR 3/9/13/Add.1, 1997/12/16
- 4) JAPAN: FORMAL SAFETY ASSESSMENT, MSC70/INF.7, 1998/9/11
- 5) 金湖：船舶の確率論的安全評価手法（その 1：船舶の遭遇確率の推定手法について）、日本造船学会論文集、Vol.177、1995、pp.419-427
- 6) 的場：座礁・衝突における人間信頼性に関する研究、日本造船学会論文集、Vol.184、1998、pp.591-597
- 7) 田中、中村：＜二層ゾーンモデルの概念に基づく＞建物内煙流動予測計算モデル、建築研究所報告 No.123, 1989
- 8) RR 42 平成 7 年度報告書、(社)日本造船研究協会
- 9) RR 42 平成 8 年度報告書、(社)日本造船研究協会
- 10) RR 42 平成 9 年度報告書、(社)日本造船研究協会
- 11) 太田：「船舶の確率論的安全評価システムの研究」（その 4：煙流動シミュレーションプログラムの開発）、第 69 回船舶技術研究所発表会講演集 pp 162 - 167, 1997
- 12) 本江豊次：「スプリンクラ設備の効用と限界」、火災学会誌 1972 年 2 月号
- 13) 神忠久、「煙の中での歩行速度について」、火災学会誌 1975 年 5 月号
- 14) 戴、金湖：船舶災害時における避難解析手法について—第 2 報、避難誘導による避難行動について—、日本造船学会論文集、Vol.186