シミュレーションによる旅客船の火災リスク推定方法

海上安全研究領域 *金湖 富士夫、大縄 将史

1.緒 言

IMO(International Maritime Organization : 国際海事機関)におけるFSA (Formal Safety Assessment:総合安全評価)の導入以降、海事関連 の重要な基準審議においてリスク評価が重要な役 割を果たすようになっている。また、英国を中心 にしたEU諸国では2005年2月よりリスク評価に基 づく船舶の設計手法の開発プロジェクト (SAFEDOR)が開始された¹⁾。海上技術安全研究所で は 10 年前よりシミュレーションを利用したリス ク評価システムの研究を実施してきた。その第I 期として(社)日本造船研究協会との共同研究にて 旅客船の浸水および火災リスクを求めるためのシ ステムMSES(Marine Safety Evaluation System) のプロトタイプの開発を行うとともに、シミュレ ーションを用いたリスク評価手続き(図 1)の開発 を実施した²⁾。現在第Ⅱ期として旅客船の災害を 火災に絞り、火災進展シミュレーションおよび避 難シミュレーションの高度化による火災リスクの 精度付き推定、および巨大旅客船の火災リスク評 価が可能な手続きの開発を実施している。

ここでは高度な火災シミュレーションプログラ ムである FDS (Fire Dynamics Simulator)と二層ゾ ーンモデルを用いた簡易な火災解析プログラムで ある BRI2002 を併用した火災リスクの精度付き評 価方法を示すともに、第 I 期 MSES の火災および 避難シミュレーションによる旅客船の火災リスク 評価例を示す。なお、避難シミュレーションプロ グラムの説明は文献 3)を参照のこと。

2. 旅客船のリスク

LRF(Lloyd's Register Fairplay)社の海難デー タによると 1978 年~2002 年の期間中に死者(行 方不明者を含む)を出した事故が合計 123 件あり 死者の合計は 11310 人であった。その中で、浸水 が生じた事故は 71 件で人命損失数は 10817 人(平 均 152 人)、火災あるいは爆発が生じた事故は 47 件で人命損失数は 5584 人(平均 119 人)、浸水と火 災あるいは浸水と爆発が同時に生じた事故は 14 件で人命損失数は 5129 人(平均 366 人)、浸水も火 災も生じなかった事故は 19 件で人命損失数は 38 人(平均 2 人)である。これより浸水、火災および



図1 シミュレーションを用いたリスク評価手続き

爆発は主要な災害であり、これらに対する対策が 重要であることがわかる。また、1978 年から 2002 年にかけての母集団は 100079 隻・年であり、旅客 船全体のリスクは 0.113 人/(隻・年)、浸水リス クは 0.108 人/(隻・年)、火災リスクは 0.0557 人/(隻・年)となる。これらの事故の中で 4306 人の死者を出したものがあり、その事故は衝突後 火災となり、その後浸水し沈没している。この事 故を除けば浸水、火災ともリスクが激減する。ま た、火災事故は 339 件で頻度 0.003387、さらに居 室(機関室以外)の火災事故は 182 件で頻度は 0.001819 件/(隻・年)である。

3. 火災による人命損失リスク導出手順

リスク評価には、事故発生および事故後の災害 進展の一連の事態の進展すなわち事故シナリオの 同定とそれらの発生頻度の推定、さらに事故シナ リオ毎の人命損失数の推定が必要である。火災事 故の発生頻度は2章のようにLRF 海難および船舶 データから得ることができるが、LRF 海難データ にはタンカー以外は重大な事故のみ記載されてい るため、軽微な事故も含めた頻度の推定が必要で ある。事故シナリオ毎に火災および避難シミュレ ーションを実施することになるが、現実的な時間 でリスク評価を実施するためにはシミュレーショ ンの実施回数を削減する必要がある。ここで事態 を複雑にする要素として、火災の拡大を防止する ための手段(消火作業、防火扉閉鎖等)が成功した としても成功までの時間の長短で死者数が異なる 可能性が上げられる。また、種々の確率や人命損 失数の推定には不確実さが伴うため、その考慮が 必要である。これらを考慮し下記のような火災リ スク評価手続きを開発した。

- 初期消火、防火扉閉鎖等火災進展に有意な影響 を与える要素のみで構成される Generic ET(G-ET)の作成。
- 2) G-ET の各分岐確率の確率密度関数の作成
- 3) G-ET の各イベントシーケンスにおける各イベ ントの成功時間確率密度関数の作成
- 4) G-ET の各イベントシーケンスにおける各イベントの成功時間を、各区分が同確率になるようそれぞれ同数に分割。
- 5) G-ET の各イベントシーケンスにおける各イベ ントの成功までの時間が長ければ長いほど人命 損失数は多くなるとの仮定を行い、G-ET の各イ ベントシーケンスで成功イベントの同じ順序の 区分の境界時間で火災シミュレーションを実施 する。各イベントシーケンスにおいて出火場所 の数だけ二層ゾーンモデルによる対象船舶の火 災シミュレーションを実施することになる。
- 対象船舶に最も近いDeck Planの旅客船の FDS による推定値への補正項を得て、境界面高さ、
 各層の温度、CO 等毒性ガス濃度、すす濃度等を 求める。

場合①: FDS 予測値の最大値、最小値を利用す る場合(図 3)

最大値、最小値毎に避難シミュレーション を実施する。

場合②: FDS 予測値の確率密度関数を利用する 場合(図4)

イベントの成功時間の区分と同様に各居 住空間各層の温度、成分の濃度範囲がすべて ある一定の確率になるようそれぞれの範囲



図2 火災のジェネリックイベントツリー(G-ET)および分岐確率と成功時間の確率密度関数

^{7) 6)}で得られた結果、および避難者の初期配置の 数を用いて避難シミュレーションを実施する。

を分割し、同じ順番の区分の境界値を用いて 避難シミュレーションを実施する。

- 8)7)で得られた各イベントシーケンスの成功時間の各区分の境界線における人命損失数の最大値、最小値から各イベントシーケンスの人命損失数の最大値、最小値の最大、最小を求める。
- 9)2)で得られた各イベントシーケンスの分岐確率の確率密度関数を用いてモンテカルロシミュレーションを行い、8)で得られた各イベントシーケンスの人命損失数の最大値、最小値からG-ETの人命損失数の最大値、最小値の確率密度関数および確率分布関数を求める。

避難シミュレーションそのものが確率的なシ ミュレーションである場合には、死者数の最大値、 最小値は確率変数となるため、イベントシーケン スの分岐確率と同様にモンテカルロシミュレーシ ョンによりG-ET全体の最大値と最小値の確率密度 関数(あるいは確率分布関数)を求める。この手続 きの4)および5)より、火災シミュレーションおよ び避難シミュレーションの実施回数はG-ETの各イ ベントシーケンスおよび火災発生場所毎に成功イ



図3 各層の FDS による推定値の最大値,最小値と平 均値との差(温度,CO 濃度)(中型旅客船 1MVZ)



ベントの数をn、 分割数をmとす ると、n^{m+1}から m+1 と大幅に減 少することにな る。

 7ィールト*モデ・ル と二層ゾーンモデ・ル の使用に関して 計算機が十分
 早く、現在の二

層ゾーンモデル

A(-1,0,	×:	-3)	-						
					_				
R(0,0,1,-2)		R(0,0,0,-2)		R(0,1,1,-2)		R(0,1,0,-2)	R(0,2,1,-2)		R(0,2,0,-2)
R(0,0,1,-1)	C((R(0,0,0,-1)	Fire	R(0,1,1,-1)	C((R(0,1,0,-1)	R(0,2,1,-1)	C((R(0,2,0,-1)
R(0,0,1,0)	0,0,1	*	ro	R(0,1,1,0)	0,1,1	R(0,1,0,0)	R(0,2,1,0)	0,2,1	R(0,2,0,0)
R(0,0,1,1)	,*)	R(0,0,0,1)	om	R(0,1,1,1)	,*)	R(0,0,1,1)	R(0,2,1,1)	,*)	R(0,2,1,1)
R(0,0,1,2)		R(0,0,0,2)		R(0,1,1,2)		R(0,0,1,2)	 R(0,2,1,2)		R(0,2,1,2)
H(0,0,*,3		S(0,0,*,-3)		H(0,1,*,3)	~	S(1,1,*,-3)	H(0,0,*,3	0	S(1,2,*,-3)
R(1,0,1,4)		R(1,0,0,4)		R(1.1.1.4)		R(1,1,0,4)	R(1,2,1,4)		R(1,2,0,4)
R(1,0,0,5)	C(1	R(1,0,0,5)		R(1,1,1,5)	C(1	R(1,1,0,5)	R(1,2,1,5)	C(1	R(1,2,0,5)
R(1.0.1.6)	1,0,1	R(1,0,0,6)		R(1.1.1.6)	1,1,1	R(1,1,0,6)	R(1,2,1,6)	,2,1	R(1,2,0,6)
R(1,0,1,7)	,*)	R(1,0,0,7)		R(1.1.1.7)	,*)	R(1,1,0,7)	R(1,2,1,7)	,*)	R(1,2,0,7)
R(1,0,1,8)		R(1,0,0,8)		R(1,1,1,8)		R(1,1,0,8)	 R(1,2,1,8)		R(1,2,0,8)
H(1,0,*,9		S(1,0,*,-9)		H(1,1,*,9)	~	S(-1,1,*,-9)	H(1,2,*,9	-	S(-1,2,*,-9)

図 6 火災室中心の船内居住空 間の指定法(例)

と同程度に高速計算ができればすべての火災シミ ュレーションをフィールドモデルで実施できる。 しかし、非常に高速であるFDSでさえ、二層ゾーン モデルの1つであるBRI2002の1万倍も時間がか かる⁷⁾。そこで、適当な数の典型的なDeck Planで FDSとBRI2002 を稼動させ、各Deck Plan毎に修正 項の時系列を求める。それらのPlanは既存の旅客 船でも良いし、新たにそのようなPlanを作成して も良い。このようなDeck Planを標準Deck Planと 呼ぶことにする。新たな旅客船が計画された場合、 そのPlanに最も近い標準Deck Planを選び、修正項 を得、新たなPlanでBRI2002 で計算し、各時点、 各地点で修正項を加えFDSで求められるであろう 上限値、下限値を求める。その際、各層の平均値 の差からFDSの平均値を求め、FDSの平均値から各 空間におけるFDSによる温度、CO等毒性ガス、およ びすすの濃度の分布を求める。

修正項を求めるに当って、図 6 のように火災 室を中心に空間の種類、MVZ、甲板、船側方向の 並び、船長方向の並びの違いにより対象旅客船 の各空間の指定を行い、指定毎に得る。

空間指定 X(n1, n2, n3, n4)は、

X:居住空間種類(R:room,C:coridor, S:stair, H:hall,A:atrium)

n1:指定居住区間が存在している MVZ n2:指定居住区間が存在している甲板 n3:指定居住区間が存在している船幅方向位置 n4:指定居住区間が存在している船首方向位置 を意味し、n1~n4 は離散値となる。

図3より、火災室近傍の4deckの通路は短時間

でFDSとBRI2002による温度とCOの推定値の最大 および最小値の差が一定になる傾向が見られ、 7deckの通路は時間とともに差が漸増するような 傾向が見られるが、いずれにしても両者は密接な 関連を持つと言ってよく、BRI2002による推定値か らFDSによる推定値を求めることは妥当と言えよ う。境界面高さについても同様と思われる。

5. リスク評価例^{2), 4), 5)}

以前の MSES を用いて、(社)日本造船研究協 会 RR42 で作成された仮想の国際航海小型旅客 船のスプリンクラのリスク低減効果を評価し た。火災シミュレーションプログラムとして 1990 年版の二層ゾーンモデルプログラム BRI2 を改造したものを使用している。図7に使用し



た旅客船の一般配置図を示す。図8にスプリン クラの有無による人命損失リスクの上下限の 累積確率分布関数を示す。図8より、この例題 ではスプリンクラは火災リスクの最大値が1 桁近く減少させることがわかる。なお、G-ET の分岐確率および成功イベントの成功時間確 率密度関数を作成するために火災を検知した 時点から成功イベントの成功時間の上下限に 関して専門家より意見を聴取した。なお煙感知 器のモデル化を実験に基づき実施し成功イベ ントの成功時間確率密度関数に組入れた。

6. 結言

以上より、比較的小数回の火災および避難シ ミュレーションにより精度付きで火災リスク を推定する手続きがほぼ確立され、同手続きを 用いた例題による居室火災リスクの導出、スプ リンクラによる火災リスク削減効果の推定を 行うことにより、本手法の効果性が示された。 今後は本手法を用いて種々の旅客船の火災リ スクを導出することを予定している。

参考文献

1) VASSALOS, D.: "Risk-Based Design : from Philosophy to Implementation", Proceedings of IMDS2004, Supplementary Volume pp. 1-10 2) 第42基準研究部会:船舶の確率論的安全評価 方法に関する調査研究報告書,(社)日本造船研究 協会,平成7,8,9,10,11年度

3) 戴、金湖:船舶災害時における避難解析手法に ついて-第1報、避難者モデルの構築方法及びシ ミュレーションについて-,日本造船学会論文集、 Vol. 184, pp. 573-581

4)金湖他: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、日本造船学会論文集、Vol.186, pp.569-580, 1999.11
5)金湖:船舶の確率論的安全評価手法-その3: 火災災害進展シナリオ生成方法、日本造船学会論 文集、Vol.188, pp.457-464, 2000.11

6) 岡他: フィールドモデルによる火災現象の数値シミュレーシ ョン, 第 5 回海上技術安全研究所研究発表会講演 集, 2005/6

7)今里他: CFD プログラムと二層ゾーンプログラムによる 旅客船火災の推定, 第5回海上技術安全研究所研 究発表会講演集,2005/6