

45 イベントツリー手法による船舶衝突事故発生頻度の評価

システム技術部 *松岡 猛、福戸淳司、三友信夫
装備部 金湖富士夫、太田 進
特別研究官 宮本 武

1. まえがき

船舶の安全性を確保するための基準案の検討に必要な安全性評価手法についての研究を進めている。今回は海難事故で最も発生頻度が高い衝突事故をとりあげ、イベントツリー(ET)手法を用いて衝突事故発生頻度の評価を行った。

イベントツリーの定量的評価に必要な人間行動の過誤率等については、アンケート調査を船長、航海士に対して実施し、船舶航行の分野における貴重なデータを得た。さらに、衝突事故低減のための対策(リスクコントロールオプション:RCO)の評価を行い、推奨すべき安全対策についての提案も行った。

2. 解析手順

解析は以下の手順に沿って実施した。まず、衝突事故の発生状況を検討し衝突事故を引き起こす要因を調べ上げ、この結果をもとに衝突事故発生に至る筋道を一般化してモデル化し、ET形式で表現した。ET中に現れる事象(ETのヘディング)の発生確率を算定するため、それぞれのヘディングについてフォールト・ツリー(FT)を作成し、基本事象(ベイシックイベント)の発生確率を与えFTの頂上事象発生確率を求めた。ヒューマンファクターに関する事象発生確率は適切なデータがないため、人間行動の過誤率等について船長等の航行経験者にアンケート調査を実施し推定した。

得られたデータを用いてETの定量解析を実施し、船舶衝突事故発生頻度を評価した。

3. イベントツリーの作成

衝突事故発生要因の抽出のために、海難審判庁より出された報告書^{(1),(2)}の事例記述から衝突事故に関連する要因を調べ上げた。その結果、船舶間の衝突事故を引き起こす発端(いわゆる起因事象)として以下の三種が考えられる。

①双方の船舶の航路がそのままでは衝突する方向となった。(見合い関係発生)

②並行して(対向して)航行中、一方が突然進路変更。

③並行して(対向して)航行中、吸引力が働く。

通常衝突事故として最も多く発生していると考えられる①のケースについて衝突に至るまでの要因を一般化して記述し、以下の様な連鎖を得た。

見合い関係発生 → 環境条件 → 航行条件 → 観測機器不全 → 観測の誤り → 認知誤り → 2船間のコミュニケーション不適切 → 避航計画の誤り → 避航実行誤り → 航行機器不全・操船環境不良 → **衝突発生**

上記の諸要因の連なりをもとに、図-1~3のETを作成した。このETではA船、B船毎にそれぞれ「観測機器不全」、「観測の誤り」、「認知誤り」、の要因を置いている。また、環境条件(霧、島陰等)、航行条件については一般的な状況を想定し、イベントツリー中には記述していない。

イベントツリー中のシーケンスをたどって行った場合の衝突が発生するか否かの判定を以下の基準に基づいて行った。

①A(あるいはB)船が状況を正しく判定(観測機器正常+観測正しく実行+認知正常)した場合でAB船間のコミュニケーションが成功している場合は、B(あるいはA)船の状況判断によらず衝突は起こらないとする。

②A(B)船が状況を正しく判定(観測機器正常+観測正しく実行+認知正常)した場合でAB船間のコミュニケーションが成功していない場合は、B(A)船も状況を正しく判定(観測機器正常+観測正しく実行+認知正常)している場合、双方衝突回避の努力を行う。(図-1のET中におけるABに続くET(図-2))

③A(B)船が状況を正しく判定(観測機器正常+観測正しく実行+認知正常)した場合でAB船間のコミュニケーションが成功していない場合でB(A)船は状況を正しく判定していない場合、正しく判定した側の船舶のみが衝突回避の努力を行う。(図-1のET中におけるAあるいはBに続く図-2のAあるいはBのETで表現されたシーケンス)

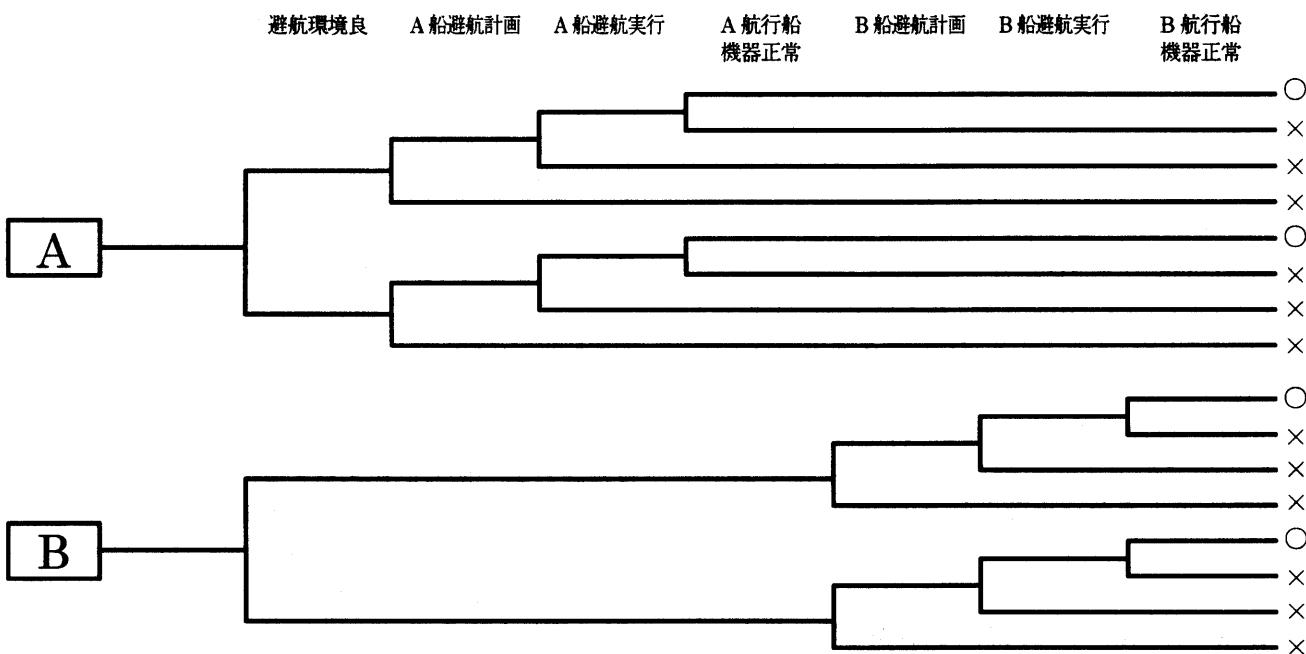


図-3 衝突事故発生に至るイベント・ツリー(後半部分その2、3)

④A,B 船とも状況を正しく判断していない場合は両船間のコミュニケーションは考慮せず衝突発生とする。
(図-1 の ET における×印のついたシーケンス)

図-1～3 の ET 中で、×印がついたシーケンスは衝突発生、○印は衝突しないシーケンスを表している。→AB、→A、→B のシーケンスは図-2、図-3 中の AB、A、B で始まる後半のイベントツリーへとそれぞれ続くことを意味している。分岐していった結果シーケンス数は 90

となり、そのうち衝突事故にいたるシーケンスは 63 となった。

4. FTによる分岐確率の検討

この ET のヘディングはやや概略的な項目となっており、ET の定量的評価のためには各ヘディングをより詳細・具体的な要因に分解する必要がある。前述の海難審判庁の報告書の事例記述から調べ上げた要因をもとに FT を作成した。それらの FT の各基本事象の発生確

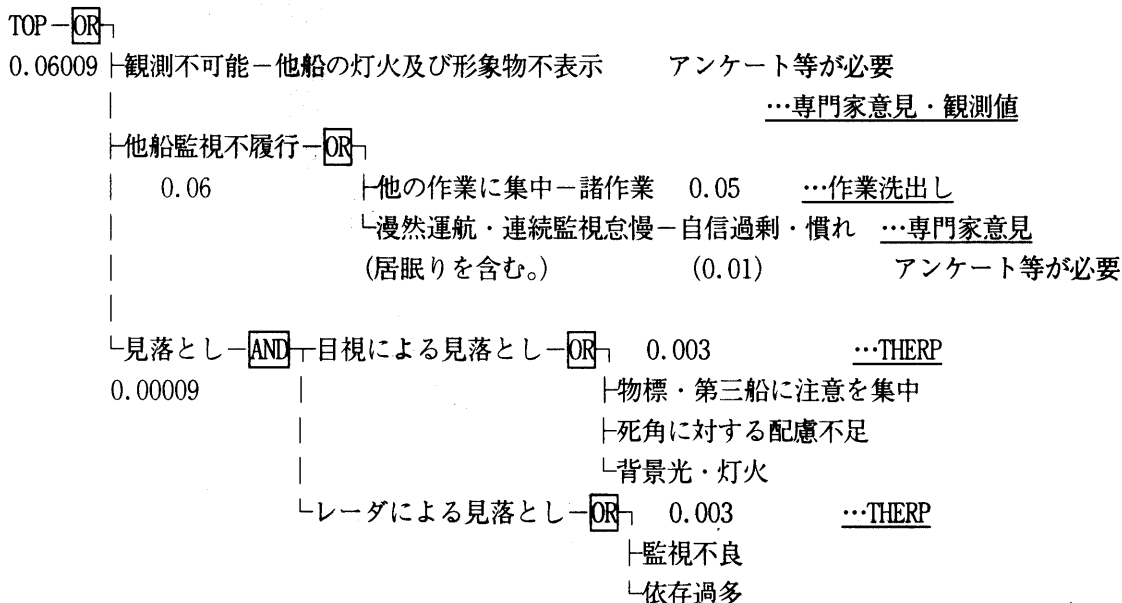


図-4 観測誤りのフォールトツリー(FT)

率を各種データ、工学的判断により推定し積み上げる。ことにより各FTの頂上事象発生確率が求まる。この頂上事象発生確率値がすなわちET中における分岐確率となる。

例えば、図-1の ET 中の初認時の観測誤りを頂上事象とするFTは図-4の様になる。FTの表記方法としては AND、OR ゲートを記号ではなく枠で囲んだ文字 (AND、OR) で表し、中間事象、基本事象等を横書きの文字で表示した この FT を構成する各要因の発生確率を検討した結果を各項目の脇に記載してある。“THERP”⁽³⁾は原子力分野で開発された人間信頼性解析手法で、この方法を参考に人間過誤率を推定した。最終的に頂上事象発生確率を $0.06009 + \alpha$ と評価した。

5. 専門家判断による人間行動過誤率等の推定

FTを作成しイベントの分岐確率の検討を行うが、特に航行環境に関する項目及び人間が関わる項目について、既存のデータベースから統計的にその発生確率を求めることが困難な場合が多い。見合い関係の成立や遭遇隻数といった航行環境に関する頻度は、統計的に議論するだけの観測記録は採られていない。一方、人間に関わる項目であるヒューマンエラーの生起確率についても、原子力プラント等で検討されデータベース化が進められているものの、プラントの運転に特化してお

り、直接操船の評価には使えない。そのため、操船状況に対応した事象発生確率、人間誤操作確率を求める必要がある。

今回、航行環境及びヒューマンエラーに関する生起確率を、アンケートにより求めた。作成したETのヘディング中ヒューマンファクターに関係する項目について定量的な値を答えてもらう形式のアンケートを作成した。

アンケートは国土交通省海事局安全評価室から地方運輸局に依頼し(11ヶ所*50部)、管内の関係会社へ配布・要請した。また、造船研究協会から日本旅客船協会、全国内航タンカー海運組合、日本航海海運組合総連合会へ協力依頼文書を送付した。さらに、海上技術安全研究所からも直接、日本船主協会、航海訓練所へアンケート依頼を行い、現在までに346件の回答を得た。各質問項目毎に回答者の答えを確率値に変換し、横軸を確率値、縦軸を回答数の累積確率値としたグラフに表現した。各回答者が全ての質問に答えているわけではないので、質問項目毎に回答数は異なっている。

図-5に集計結果の一例を示す。回答数の累積が50%に対応する確率値を図中に示してある。この値が専門家意見による事象の発生確率(ヒューマンエラー率等)の判断値と言える。また、回答者による答えの散らばり具合から、図中に示す様に5%下限、95%上限値も推定できる。

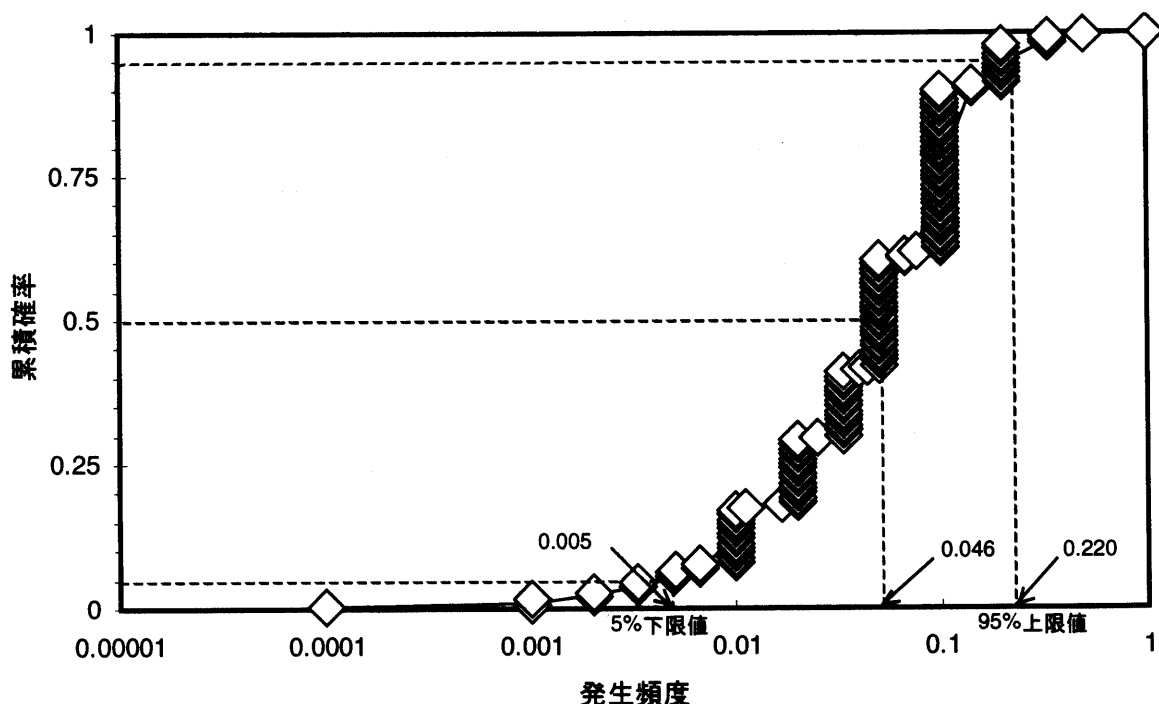


図-5 動静判断を誤る確率

表一 各事象発生頻度及び確率

項目 番号	事象	FT による評価結果	アンケート結果	修正評価値
①	見合い関係成立頻度	—	0.653/h	0.653/h
②	観測機器不全	1.4×10^{-4}	—	1.4×10^{-4}
③	観測誤り(初認)	$0.06009 + \alpha$	0.062	0.0038
④	誤認	0.009	0.046	0.0021
⑤	2船間で連絡を取る確率	小	0.124	0.124
⑥	連絡失敗確率	1.44×10^{-4}	0.544	0.544
⑦	運航環境良好	0.9975	0.9	0.9
⑧	避航計画失敗	0.0047、0.0064	0.052、0.077	0.0052、0.0077
⑨	避航実行失敗	0.03	0.030	0.003
⑩	航行機器不全	5.4×10^{-4}	—	5.4×10^{-4}

6. 衝突事故 ET の定量化

以上の検討の結果、ET の各ヘディング事象の発生確率が表一の様にとめられた。これらの数値を用い、海上技術安全研究所で開発した GFES (GO-FLOW イベントシーケンス解析プログラム)⁽⁴⁾により ET 定量解析を実施した。人間行動に関する項目はアンケート結果の値を用い、アンケートでは得られなかった機器故障に関する値は FT の評価により得られた値を用いた。

その結果、二船間で連絡を取り合う以前に衝突してしまう頻度は、 $7.35 \times 10^{-3}/h$ 。

二船双方とも避航を試みつつ衝突してしまう頻度は、 $3.45 \times 10^{-3}/h$ 、一方の船のみが避航を試みる場合に衝突してしまう頻度は、 $9.67 \times 10^{-3}/h$ となり、合計で、 $2.05 \times 10^{-2}/h$ という評価結果となる。

内航船であるため、一航海約 12 時間とすると、衝突発生頻度は $2.46 \times 10^{-1}/航海$ となり、造研第 46 基準部会⁽⁵⁾で評価した値、“軽微損傷事故も含めた衝突発生頻度 $1.33 \times 10^{-3}/航海$ ”に比較しても大であり、現実に見られる衝突事故件数から推定できる値からの不一致も大きいと思われる。

ここで得られた値はニアミス発生件数に相当していると考えられる。ET では一定のミス、機器故障の結果必ず衝突に至るシナリオとなっているが、現実には、かなり危険な状態になった場合でも、臨機応変の対処、リカバリー等で衝突を免れて衝突発生件数が小となっていると思われる。

アンケートにより得られた値を ET 解析に使用するに当たり、検討を行ってみる。

アンケートの結果、観測誤り(初認)として 0.062 が得られているが、これは一度相手船を視認したときに誤りを犯す確率として回答していると考えられる。ET のシーケンスの展開においては、初認の誤りを犯してもさらに双方の船が接近する過程において、2度、3度と観測を繰り返す

余裕時間は考えられる。この全てにおいて誤りを犯す確率は、単純な積を取れば相当に低いものとなる。

しかし、同じ状況に置かれた場合同様の誤りを犯す確率は高くなると言われ、また、一度思いこんだ事を修正するのは人間かなり難しい。それ故、ここでは観測誤り(初認)の値として $0.062 \times 0.062 = 0.0038$ を修正評価値として採用する。つまり二重のチェックを行うという仮定の値を用いる事とする。

認知誤りの確率も同様の理由により、 $0.046 \times 0.046 = 0.0021$ を修正評価値として採用する。

避航実行失敗としては 0.03 の値がアンケート結果として得られている。衝突に至る過程で一度避航の実行に失敗しても、操船者は次善の何らかの策を再度取り、ぎりぎりの所で衝突を免れているであろう。このリカバリーの失敗確率を 0.1 程度と見積ると、ET 中での避航失敗確率は $0.03 \times 0.1 = 0.003$ となる。この値を修正評価値として用いる。

避航計画失敗についても、計画に基づき航行中に異常に気づき、再度別の避航方法を考えることは行われているであろう。避航実行と同様リカバリーがあるとして、ET 中での避航計画失敗確率を $0.052 \times 0.1 = 0.0052$ 、 $0.077 \times 0.1 = 0.0077$ とした修正評価値を採用する。

以上の修正を行った評価値で ET の定量解析を行うと、二船間で連絡を取り合う前に衝突してしまう頻度は、

$$2.38 \times 10^{-5}/h$$

二船双方とも避航を試みつつ衝突してしまう頻度は、

$$4.93 \times 10^{-5}/h$$

一方の船のみが避航を試みる場合に衝突してしまう頻度は、 $6.62 \times 10^{-5}/h$ となり、

合計で、 $1.39 \times 10^{-4}/h$ という評価結果となる。

一航海約 12 時間とすると、衝突発生頻度は

$$1.67 \times 10^{-3}/航海$$

浦賀航路のデータに基づいて算出された衝突事故発

生確率値との比較も行った。その結果、矛盾のない値となっていることがわかり、次章の事故低減のための対策(RCO:リスクコントロールオプション)の考察においては、修正評価値を用いたETを使用した。

7. RCO(リスク・コントロール・オプション)の検討

RCOの候補として21項目を選定し、その中の14項目についてRCOを実施したときの効果として対応するETの構成項目(ヘディング)の分岐確率値を改善して評価してみた。

対策が操船者に対して能動的に働きかける場合は失敗を犯す確率(ET中の分岐において失敗側へ行く確率)が半分に低減するとし、対策が操船者に対して受動的な場合は失敗を犯す確率が3/4になるとしてETを計算し直した。その結果衝突事故低減に有効な対策が見えてくる。

効果の最大のRCOは航海支援装置である。この航海支援装置は「就労監視装置、AIS(ARPA)、ECDIS+GPS、GPS+携帯電話、自動 Bearing 調整装置、指令確認装置」と現状で考え得るほぼ全ての装置を装備することを意味しており、効果が大きいことは当然であるが費用もかなりなものとなる。

次に効果の大きなRCOは「連続運転制限機能」、「安全教育」、「AIS」である。連続運転制限機能、安全教育は操船者のヒューマンエラー全体を低減する効果があり、ET中の4項目が関与しているので衝突事故発生頻度低減には有効に働いている。連続運転制限機能は比較的簡易な装置と考えられる。また、安全教育は新規に装置を設置する必要はなく、操船者の安全に対する心構えを向上させる効果的な方法があれば費用的には負担は少ないであろう。

AISの導入:初認見落とし、他船動静誤認がかなりの程度防止でき初期段階で衝突発生を防ぐことになる。新しいシステムを航行環境に導入し、各船舶にも新規装備を設置する必要があり費用はそれなりに要するものと思われる。**「就労監視装置」の導入:**23%の衝突発生頻度の減少効果が期待できる。居眠り防止ということで、これも比較的簡易な装置の導入で済みそうである。ただ、「他作業に従事」、「自信過剰・慣れ」等本装置の導入だけでは防止不可能な要因もあるため、本評価値は実際の効果より大きめの値を予測している心配がある。

「GPS+携帯電話」の導入:2船間のコミュニケーションの向上は、20%の衝突発生頻度の減少効果が期待できるが、期待された程の効果がでないことが判った。コミュニケーションを取ろうとする以前の衝突発生、コミュニケーション成

功後の判断ミス、操船ミス等からの寄与に大きなものがあることを意味しているのであろう。

以上の考察の結果、推奨されるべきRCOは第一に「連続運転制限機能」、「安全教育」で、その次に「AIS」導入があり、「就労監視装置」、「見張りシステムの改善」が更にその次として考えられる。

8. まとめ

現在、海上技術安全研究所では日本造船研究協会との共同研究により内航船の安全性評価手法の研究を進めている。今回、衝突事故を取り上げイベントツリーを用いた確率論的評価を実施した。本評価実施により評価方法の手順を整理するとともに、RCO候補についての評価が行え、推奨すべき安全対策についての提案も行えた。

今後、この成果をもとにして衝突事故以外の各種事故についての評価手順の整備を行い、船舶分野における確率論的安全評価方法実施手順としてまとめていく予定である。

本研究は日本財団の助成事業の一つである(財)日本造船研究協会の船舶の総合的安全評価に関する調査研究(RR49)の一環として、第49基準研究部会(船舶の総合的安全評価に関する調査研究)⁶⁾との共同研究の一部として行われたものである。本報告をまとめるにあたり第49基準研究部会の主査である東大 大和裕幸教授をはじめとする部会委員・参加者の皆様にご協力いただいた。各位に感謝の意を表する。

9. 参考文献

1. 海難審判庁、「構内及びその付近における船舶間衝突の実態」(平成2年12月)
2. 海難審判庁、「狭水道における船舶間衝突の実態」(平成4年3月)
3. A.D.Swain, H.E.Guttmann, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, 1983
4. T. Matsuoka, et al., Safety Analysis System using Thermo-Hydrodynamic Simulation of Accident Sequences in Event Tree/GO-FLOW, PSA' 99, Washington D.C. August 22-26, 1999
5. 日本造船研究協会第46基準部会報告書、「放射性物質の海上輸送の安全に関する調査研究」(平成10年度報告書p.198)
6. 日本造船研究協会第49基準部会報告書、「船舶の総合的安全評価に関する調査研究(分冊:内航船の確率論的安全評価に関する研究)」(平成13年度報告書)