

イベントツリーによる転覆・沈没・浸水海難の安全評価

海上安全研究領域
総合安全評価研究グループ

* 松岡 猛
三友信夫

1. まえがき

船舶の安全性を確保するための基準適正化等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。今回は海難事故で比較的発生頻度の高い転覆・沈没・浸水事故等を取り上げ、イベントツリー(ET)手法を用いて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、前回、前々回の評価⁽¹⁾、⁽²⁾で実施したのと同様のアンケート調査を船長、航海士に対して実施し、転覆・沈没・浸水海難に関連する貴重なデータを得た。

2. 解析手順

解析は以下の手順に沿って実施した。

まず、浸水・転覆・沈没事故の発生状況を「浸水・転覆・沈没海難の実態」(昭和57年12月:海難審判庁)⁽³⁾および海難審判庁採決録を検討して事故を引き起こす要因を調べ上げ、この結果をもとに転覆・沈没・浸水事故発生に至る筋道を一般化してモデル化し、イベント・ツリー(ET)形式で表現した。

浸水・転覆・沈没事故は小型船に多く発生し複雑な条件が関与していることがわかったが、今回は199GT型及び499GT型の内航貨物船を対象として解析した。

ET中に現れる事象の発生確率(ETのヘディング)算定のため、それぞれのヘディング中に現れる人間行動確率、状況発生頻度等について船長等の航行経験者に平成12年度、13年度と同様にアンケート調査を実施し推定した。最後に、得られた事象発生確率値をもとにETの定量解析を実施し、船舶浸水・転覆・沈没事故発生確率を算定した。

3. イベントシーケンスとしての整理

海難審判庁採決録中の100トン~500トンの貨物船事故について具体的事故例を調べ上げ、浸水・転覆・沈没事故に関与する事項をイベント・シーケンスとし

てまとめると以下の様なシーケンスが得られた。

- 1) 設計・製造 復原性確認の試算 復原性確認の試験 天候・うねり 気象情報入手 気象判断 荒天避難 | **係留中**
| **航行中**
係留中 係留の準備 乗員在否 見回り ハッチ開閉 居住区出入口開閉 船底弁 海水吸入弁 逆止弁 海水浸入 **浸水・沈没**
航行中 出発前点検・準備 積み付け作業 過載等 積み荷状態判断 大波・うねり 海水打ち込み 海水滞留・排水ポンプ停止 主機停止 ハッチ開閉 荷崩れ等 クレーン等の回転 復原性能 **浸水・転覆**

- 2) 弁の締め付け不良 振動でのゆるみ はずれ 海水浸入 **沈没**
- 3) 係留中 圧流 判断誤り 傾斜 排水口から浸水 **沈没**
- 4) ビルジ排出 他作業で気があせる 海水吸入弁閉と
思いこみ 確認怠る ビルジ吸入弁ゴミ詰まり・逆止機能
障害 海水浸入 見張りおらず **沈没**
- 5) 開口部 雨水 めずまり 強風 傾斜 海水流入 **沈没**
- 6) 積み込み中荷崩れ 傾斜 海水流入 **沈没**

4. イベントツリー(ET)の作成

前節で整理した事故の誘因、関連事項をもとに事故発生に至るまでのシーケンスをイベント・ツリー形式で表現してみる。

イベント・ツリーにおいて検討している時間間隔は一航海とした。ここで、一航海とは「相隣り合う二港間の航海」と定義した。今回の浸水・転覆・沈没事故については、一般化した一つのツリーとしてまとめた。

図-1に主イベント・ツリーを示す。図-2は航行中における事象展開を表現したイベント・ツリー、図-3は

主ツリー 起因点	改造・設計 喫水線無断変更	復原性試算	復原性試験	天候・海象 波高< 3.75	気象情報 入手	気象海象判断	荒天避難 栈橋から離れず	停泊中 航行中
	設計改	試算	試験	天候	気象入手	判断	避難	係留・航行
A	B	C	D	E	F	G	H	I

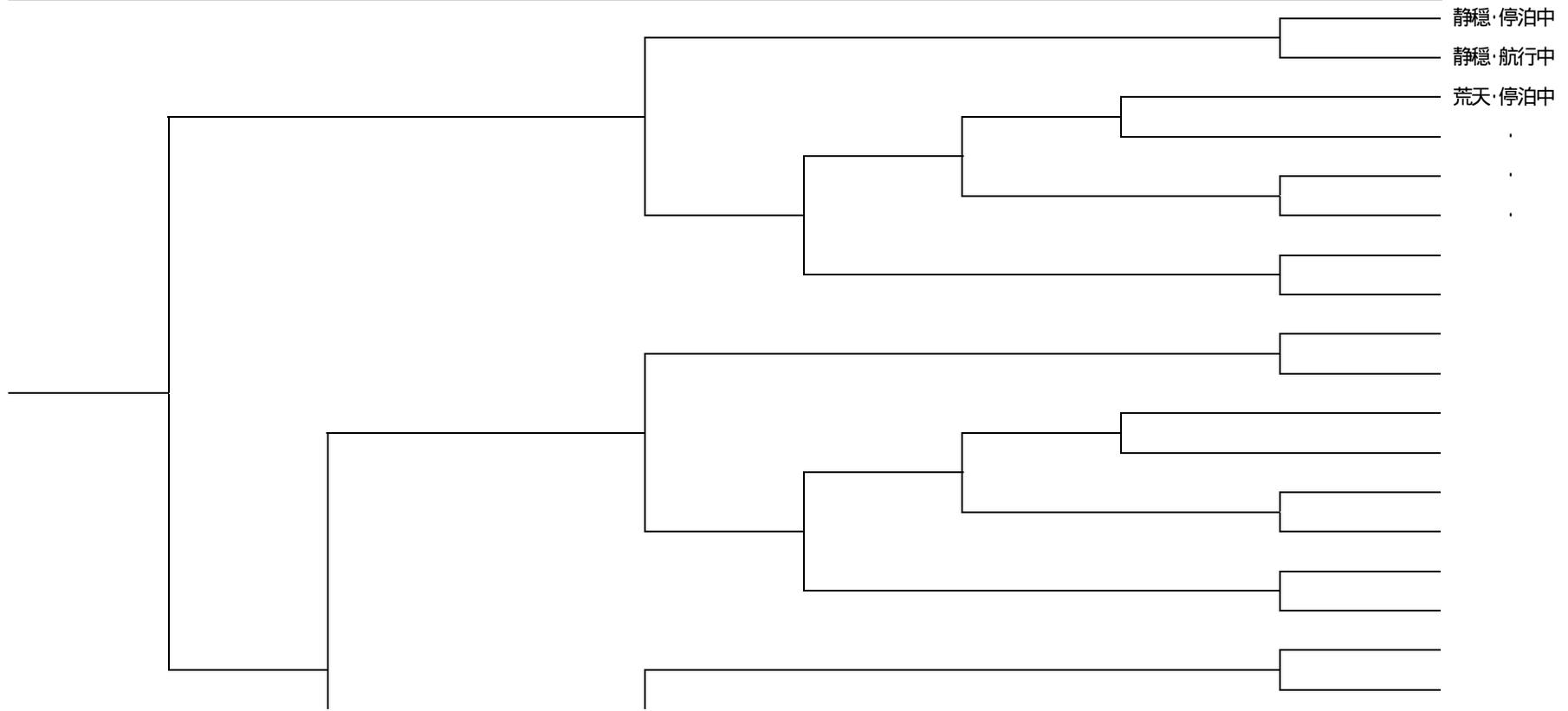


図-1 浸水・転覆・沈没事故発生に到るイベント・ツリー（主ツリー）

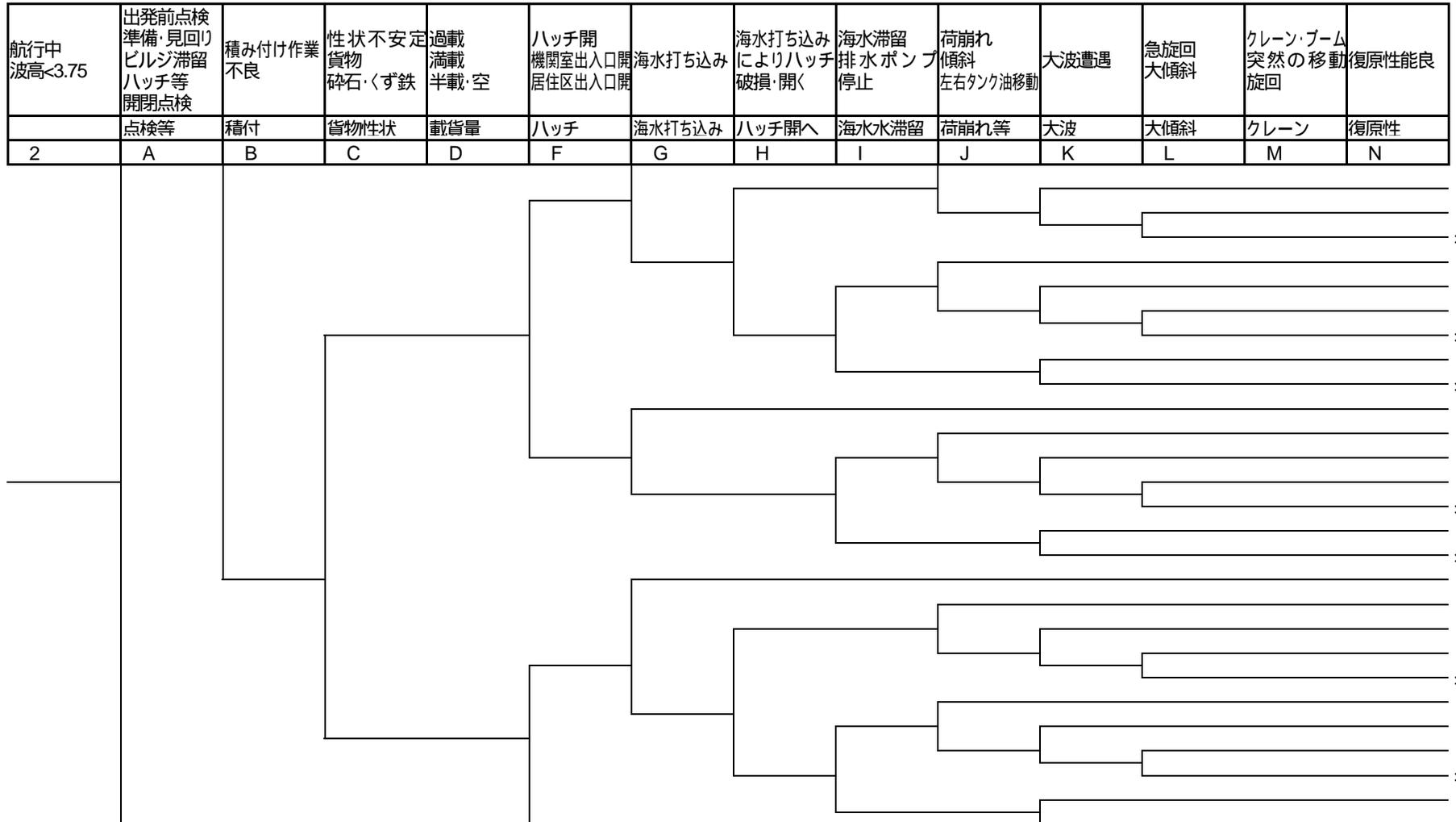


図-2 浸水・転覆・沈没事故発生に到るイベント・ツリー（航行中）

停泊時	保守点検 準備見回り 等の不良	積み付け作業 不良	性状不安定 貨物 碎石等	過載 満載 半載・空	ハッチ状態 閉失敗	雨水浸入 ビルジ 目詰まり	海水系より 多量漏洩	荷崩れ発生 船体大傾斜	圧流・ 岸壁と接触	破口発生	着底傾斜	浸水	無人
	点検等	積付	貨物性状	載貨量	ハッチ	雨水浸入	海水系漏洩	荷崩れ	圧流等	破口	着底	浸水	無人
2	A	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N	O

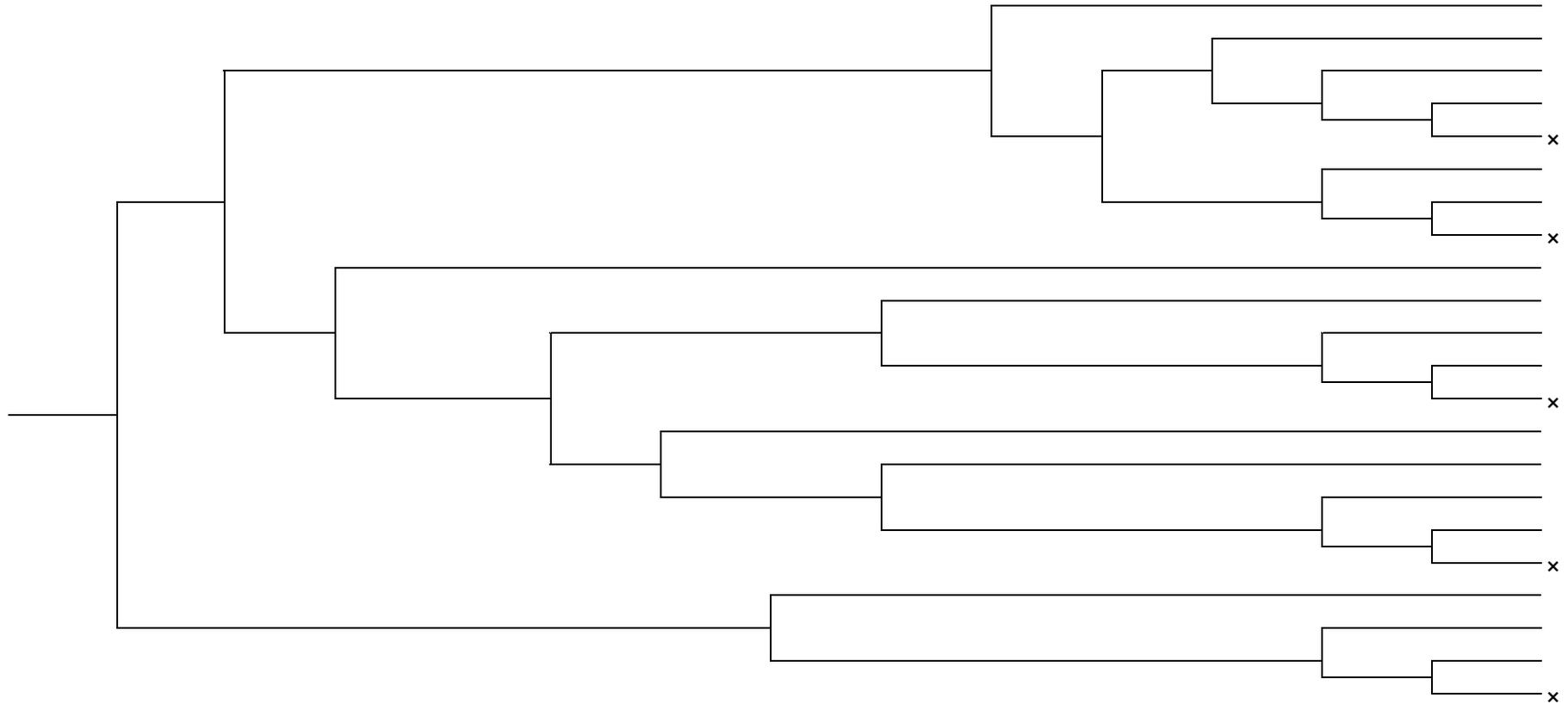


図-3 浸水・転覆・沈没事故発生に到るイベント・ツリー（停泊中）

停泊中における事象展開を表現したイベント・ツリーであり、それぞれ主イベント・ツリーに続くイベント・ツリーである。これらのツリーの分岐は多数になるためそれぞれの下部は省略してある。また、実際には静穏 / 荒天 / 貨物性状 / 貨物積み付け状態の組み合わせ条件に応じ、それぞれの分岐確率が異なるイベント・ツリーが種々あるが、ここではすべてを記すことはせず省略してある。

5. イベント・ツリー(ET)の定量解析

イベント・ツリー(ET)のヘディング分岐確率を求めるためには、各種基本的な事象の発生確率を評価して積み上げていく必要がある。基本的には、船舶関連のデータベース、統計データに基づいて、各種解析を実施する等して定量化を進めるが、必要に応じて他分野のデータベース等を参考にしたり、専門家判断も交えて定量化を行う必要がある。

5.1. 海水打ち込み確率および大波に遭遇する確率

ETのヘディングにあらわれる“海水打ち込み確率”および“大波遭遇確率”の定量的評価のため、199GT型及び499GT型の内航貨物船が日本の沿岸を航行する際の海水打ち込み確率を、通常の長期予測計算の手順に従って計算した。

海象条件は、有義波高3.75m以上と未満とで区分し、さらに波の相対的高が乾舷の1.5倍以上の場合を大波であるとして、大波遭遇確率を算出した。海水打ち込み位置としては、船首部および、船内への浸水等を考慮して船体中央部についても検討した。

計算を行った海域は、九州北岸及び西岸、本州南岸中部である。これらの海域の波浪データについては、北太平洋の波浪データベースの波浪追算データを用いた。

解析の結果、海水打ち込み確率として 5.6×10^{-4} / 波浪(3.75m未満) 2.0×10^{-2} / 波浪(3.75m以上) が得られた。船の平均動揺周期を6秒とすると打ち込み確率は 9.3×10^{-5} / 秒(3.75m未満) 3.33×10^{-3} / 秒(3.75m以上) となる。内航船の1航海平均所要時間を10時間とすると、 9.3×10^{-5} / 秒 $\times 36,000 = 3.35$ / 航海(3.75m未満) 3.33×10^{-3} / 秒 $\times 36,000 = 120$ / 航海(3.75m以上) と算出される。これは、穏やかな海象の場合は航海中ほとんど海水打ち込みが起こらず、波高の高い海象の場合には航海中に海水打ち込みが何度も繰り返して起こることを意味している。

大波遭遇確率も同様に計算し、0.01 / 航海

(3.75m未満) 3 / 航海(3.75m以上) と得られた。これは、穏やかな海象の場合は航海中まず大波に遭遇せず、波高の高い海象の場合には航海中に大波に3回程度遭遇することを意味している。

5.2. 専門家判断による分岐確率の推定

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。航行に関する頻度は、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、直接操船判断の評価には使えない。そのため、操船状況・運航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。

平成14年度においても、前年度までと同様専門家へのアンケートにより、人間の判断、誤操作等に関する確率を求めた。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。また、RCO(リスクコントロールオプション)の参考として、現場の意見収集も試みた。

アンケートは、造船研究協会から日本内航海運組合総連合会に協力を依頼し、海上技術安全研究所から同組合に所属する各社に書類を送付した。現在までに213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-4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、5%下限、95%上限値も推定できる。表-1にはアンケートの集計結果を示す。

5.3 他の分岐確率の評価

(1) 復原性の程度

解析対象とした499型貨物船、199型貨物船のGM値は標準的な船舶の場合それぞれ0.67m、0.74mであり、まずまずの復原性を有している。そこでイベント・ツリー中での復原性の良否を基準とした分岐は確率1.0

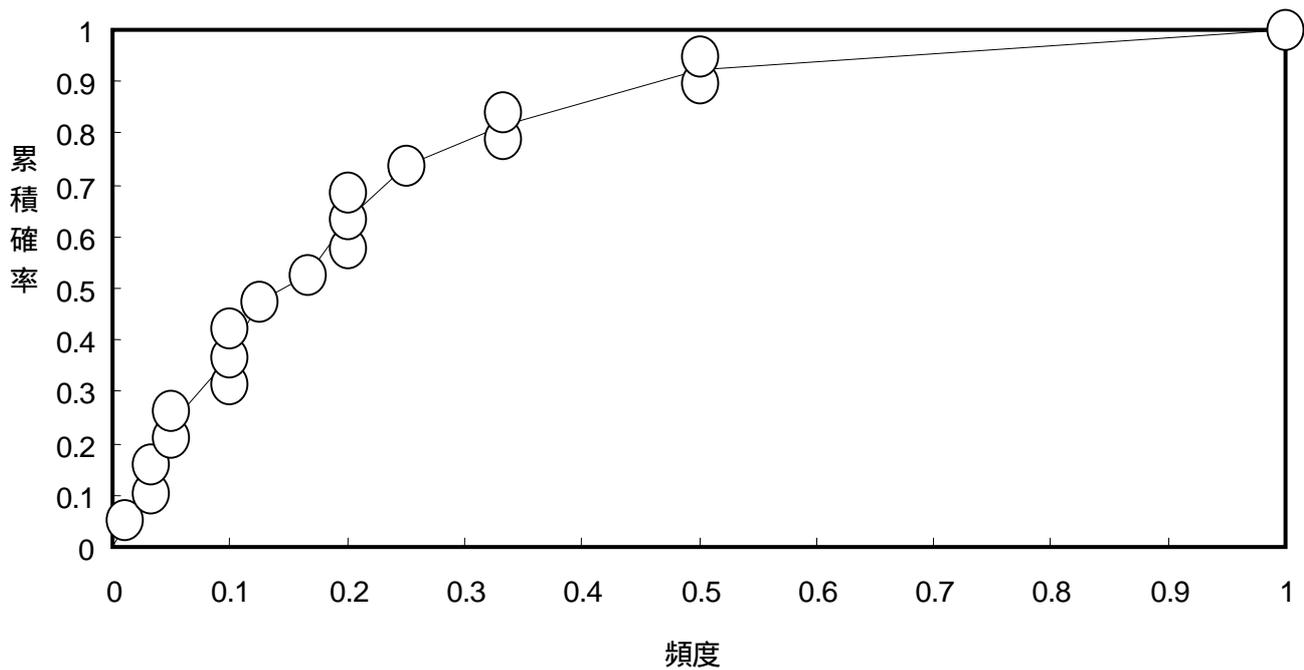


図 - 4 アンケート集計結果の一例 (気象情報入手せず)

表-1 アンケート集計結果

項目番号	事象	回答者数	頻度 or 確率
	改造・設計変更の経験	212	0.28
ウ	復元性試算	63	0.42
エ	復元性試験	62	0.41
イ	気象情報入手せず	208	0.23
ウ	気象海象判断ミス	203	0.0058
エ	荒天避難せず	204	0.0037
ア	出発前点検	212	0.92
カ	性状不安定貨物	147	0.069
オ	積載状況	96 (重複有り)	
	空		0.43
	半載		0.27
	満載		0.45
	満載以上		0.011
ア	積荷点検		
ウ	積荷作業不安	197	0.092
ア	ハッチ等の開閉	151	
	静穏時 (閉確率)		0.57
	荒天時 (閉確率)		0.95
エ	荷崩れ傾斜発生	198	1.02×10^{-4}
キ	クレーンブーム突然の旋回	127	0.0

で良の方へ分岐するとする。ただし、改造、設計変更をした後に復原性試算・試験を実施していない場合は確率0.1で復原性は悪いと判断した。

(2) ビルジ排水ポンプの故障

船舶信頼性データベース SRIC⁽⁴⁾によると故障率 $3.68 \times 10^{-4} / \text{h}$ が得られている。1航海時間を10時間として、アベイラビリティを求めると $3.68 \times 10^{-4} / \text{h} \times T/2 = 1.84 \times 10^{-3} / \text{航海}$ となる。ただし、荒天時は海水打ち込みは航海中始終発生するのでビルジ排水ポンプは10時間連続して作動する必要がある。したがってポンプ故障確率として $3.68 \times 10^{-4} / \text{h} \times T = 3.68 \times 10^{-3} / \text{航海}$ を用いる。

(3) 海水系からの多量漏洩

おなじく、船舶信頼性データベース SRIC によると海水系の漏洩率は $6.01 \times 10^{-4} / \text{h}$ となっている。ただしこの値は漏水量にかかわらず全ての事象を含んでいる。多量の漏水率としてはこの値の1/30を採用し、停泊中の多量漏水確率として $6.01 \times 10^{-4} / \text{h} \times 1/30 \times 10\text{h} = 2 \times 10^{-4} / \text{停泊}$ と評価した。

(4) 海水打ち込みによるハッチ等の破損

海水打ち込み1回毎にハッチ等が破損する確率を0.001と設定した。その結果、1航海における破損確率は荒天時120回 $\times 0.001 = 0.12$ 、静穏時は3.35回 $\times 0.001 = 0.00335$ となる。

(5) 圧流による岸壁との接触

潮流は汐の干満によって引き起こされると考え、停泊中0.1の確率で潮流に出会うと設定

(6) 荷崩れ発生確率

アンケートにより荷崩れ発生確率は $1.02 \times 10^{-4} / \text{航海}$ と評価されている。これも荷崩れの程度を全てを含んでいると考えられる。転覆・浸水につながる恐れのある大規模な荷崩れ発生率はこの値の1/30として、 $3.4 \times 10^{-6} / \text{航海}$ を基礎値とした。荒天時、積み付け不良時、性状不安定貨物の組み合わせにより倍数 $10^{1/2}$ を各段階毎にかけて評価値を算出した。

6. 浸水・転覆・沈没事故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得られる。これらの数値を用いET定量化解析を実施した。

解析結果をまとめると表-2の様になる。表の意味するところは、事故が発生した場合に静穏時であったか荒天時であったか、さらに停泊中であったか航行中であったかの割合を表している。静穏時航行中に発生する件数が一番多く、次いで静穏時の停泊中となる。

荒天の発生頻度を3%と見積もっており、荒天時に種々の対処で航行するか避難するかを決定するモデルをたてている。その結果、静穏時航行、静穏時停泊、荒天時停泊、荒天時航行の発生割合は 347:39:11:1 となっている。各状況単位時間当たりの事故発生頻度の割合は、静穏時航行：静穏時停泊：荒天時停泊：荒天時航行 = 1:8:8.3:178 となる。荒天時航行中のリスクは大きい結果となっているが、停泊中のリスクも静穏、荒天にかかわらず静穏時航行に比較して大きいという結果が出ている。

浸水・転覆・沈没事故の発生頻度を事故データから推定した。平成元年から平成8年の8年間における要救助海難統計によると、100~500トンの貨物船の転覆事故総数は19件、浸水事故の総数は56件であった⁽⁵⁾。一方、日本海運集會書によると1999年度末の20トン以上の日本籍船舶100~500トンの貨物船の総数は2,340隻である。1隻の年間平均航海数を200航海とすると8年間での総航海数は3,744,000航海となる。

その結果、事故データからの推定値は転覆事故発生頻度は $5.1 \times 10^{-6} / \text{航海}$ 、浸水事故発生頻度は $1.5 \times 10^{-5} / \text{航海}$ となる。

今回の解析は転覆・浸水・沈没海難をイベント・ツリー形式に表現し、評価に用いた手法・考え方を検討することに主眼がある。解析結果と事故データからの推定値との比較を議論するのは今後の課題と考えている。

表-2 浸水・転覆・沈没事故の発生頻度 (ETによる解析値)

	航行中	停泊中
静穏時	6.13×10^{-6}	5.57×10^{-6}
荒天時	3.15×10^{-6}	1.58×10^{-6}
計	9.28×10^{-6} 回 / 航海	7.15×10^{-6} 回 / 航海
合計	1.643×10^{-5} 回 / 航海	

7. まとめ

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評価手法として「内航船の確率論的安全評価法」についての研究を進めている。

本年度は、浸水・転覆・沈没事故に関してイベント・ツリー手法による評価を実施した。前年度までにおいて衝突事故、座礁・乗り揚げ事故、喫水線下衝突事故の発生頻度評価は実施済みであり、今後これらの評価とも併せて船舶分野に於ける標準的な確率論的安全評価実施手順書としてのまとめを行っていく。これにより、個別の船舶・運行条件に適用した確率論的安全評価が国内各機関・組織で容易に実施できる枠組みが整備できる。

本研究は日本造船研究協会（RR-S7委員会）との共同研究として実施したものである。御討論をいただいた委員会関係各位並びに助成を賜った日本財団に感謝します。

参考文献

1. 松岡 猛他、「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」、第1回海上技術安全研究所研究発表会講演予稿集 pp.209 - 213 (平成 13 年 6 月)
2. 松岡 猛他、「イベントツリー手法による座礁・乗り揚げ事故発生頻度の評価」、第2回海上技術安全研究所研究発表会講演予稿集 pp.213 - 218(平成 13 年 6 月)
3. 海難審判庁、「浸水・転覆・沈没海難」(昭和 57 年 12 月)
4. 船研「船舶信頼性データベース」(RR49平成11年度報告書 p.221 参照)
5. 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、分冊：内航船の確率論的安全評価に関する研究 (平成 12 年度報告書、平成 13 年 3 月) p.21