

図9 タイタニック号事故におけるイベントツリー

事故当時の海水温から考えると、時間と共に生存している者の割合は急速に減少していくと考えられる。救助船舶によって救助される人数を表中の「海から救

助」欄に記した。

遭難者数は、以上の各分類において算定した人数を用いて、次の式に従って計算した。

$$\text{死者数} = \text{乗船総数} - (\text{乗艇者数} - \text{乗艇後死亡数} + \text{海から救助された数})$$

以上の結果をまとめると、表12になる。

さらに、以上の結果を前述のイベントツリーの結果から、各シーケンスごとに犠牲者数と発生確率の関係などについて、その一部を示したものが表13である。全シーケンス数が900以上もあるため、それらを全てここに示すことは不可能であるが、ST16,a1といったシーケンスの番号が、前述の図4(a),(b)中のどのシーケンスによる犠牲者数であるかを示すものである。

この表には、各シーケンスにおける事故の発生確率とその被害者数の一部が示されている。そこでこの結果を元に、さらに遭難者数と事故の発生確率についてわかりやすくまとめたものが図10である。この図においては、図3に示した例題にもあったように縦軸は累積発生確率を、また横軸は遭難者数を示している。この図から、遭難者数が1000人以上の事故が起こる確率は 1.73×10^{-2} /航海もあることが求められた。これは、 $1.73 \times 10^{-2} \div 1/60$ であることから、60航海に1回の割合で1000人以上の遭難者が発生する事故が起こることになる。

さらにこの結果について、現代の航海における事故の発生状況と比較するために、前述のロイドの事故データから得られた情報を本研究の結果と比較するために図10中に示してある。この結果から、当時の航海における事故の発生状況と現代のそれとの差が歴然とし、

現代の航海における安全性が理解できる。

2.5 不確実さ解析

イベントツリーの分岐確率値を点で与えて解析を行うと、その結果には不確実さが伴う。不確実さの原因は、イベントツリーを作成する際に様々な仮定を設定する必要があること、分岐確率の定量化にあたり使用するデータに統計的なばらつきが存在することなどである。分岐確率の値を専門家判断によって与えた箇所は不確実さが大きい場合もある。そこで、こうした要因の影響をも考慮に入れた分析を行うために不確実さ解析を行う。

イベント・ツリー中の分岐において不確実さが存在すると見られる項目について事象の発生確率値を上限値、下限値間での一様分布から乱数により各々1つ選定しイベント・ツリー解析を実施する。これを3000回繰り返すいわゆるモンテカルロ法を実施し最終結果の不確実さ幅を求めた。不確実さの分布を考慮した項目は以下の通りである。但しカッコの中の数値は(中央値±分布幅)を意味している。

出航4月 (0.8 ± 0.2)、氷山の存在確率・3月 (0.21 ± 0.2)、氷山の存在確率・4月 (0.34 ± 0.2)、出航の遅れ (0.000624 ± 0.000624)、他船の警告による減速 (0.2 ± 0.2)、双眼鏡を所持する (0.5 ± 0.3)、事前に氷山を

表 12 遭難者数算定 (少数点以下切り捨て、単位：人)

波の高さ(m)	0~1	1~3	3~12	12~
状況				
2：直進&減速 →衝突&沈没せず 11：舵切る&減速せず →衝突せず	沈没せず 死者計： 0	沈没せず 死者計： 0	沈没せず 死者計： 0	沈没せず 死者計： 0
3：カリフォルニア号、沈没40分前に到着→救命ボート&海から救助(横付けは考えない)	乗艇： 711 (100%) 乗艇後死亡： 0 (0%) 拾い上げ： 1117 (75%) 死者計： 372	乗艇： 355 (50%) 乗艇後死亡： 17 (5%) 拾い上げ： 922 (50%) 死者計： 940	乗艇： 177 (25%) 乗艇後死亡： 35 (20%) 拾い上げ： 505 (25%) 死者計： 1552	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201
4：カリフォルニア号、沈没10分前に到着→救命ボート&海から救助(低温のため多数死亡)	乗艇： 711 (100%) 乗艇後死亡： 0 (0%) 拾い上げ： 745 (50%) 死者計： 745	乗艇： 355 (50%) 乗艇後死亡： 35 (10%) 拾い上げ： 461 (25%) 死者計： 1419	乗艇： 177 (25%) 乗艇後死亡： 53 (30%) 拾い上げ： 252 (12.5%) 死者計： 1823	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201
5,8：カルパチア号、沈没1時間50分後に到着(波高0~1mなら実際と同じ)	乗艇： 711 (100%) 乗艇後死亡： 0 (0%) 拾い上げ： 0 死者計： 1490	乗艇： 355 (50%) 乗艇後死亡： 71 (20%) 拾い上げ： 0 死者計： 1916	乗艇： 177 (25%) 乗艇後死亡： 106 (60%) 拾い上げ： 0 死者計： 2129	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201
6,7,9,10：カリフォルニア & カルパチア号、救助に来ず(翌日救助されると仮定)	乗艇： 711 (100%) 乗艇後死亡： 71 (10%) 拾い上げ： 0 死者計： 1561	乗艇： 355 (50%) 乗艇後死亡： 213 (60%) 拾い上げ： 0 死者計： 2058	乗艇： 177 (25%) 乗艇後死亡： 159 (90%) 拾い上げ： 0 死者計： 2183	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201
1：直進&減速せず→急速に沈没し生存者無し	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201	乗艇： 0 乗艇後死亡： 0 拾い上げ： 0 死者計： 2201

基礎データ：乗船総数 2201名(内、実生存者 711名、実死亡者 1490名) 救命ボート定員 1178名

発見し衝突回避失敗 (0.05±0.05、0.1±0.1、0.2±0.2等)、回避操作・減速せず直進 (0.06±0.06)、回避操作・減速して直進 (0.12±0.1)、回避操作・減速して舵を切る (0.12±0.1)、カリフォルニア号が救助可

能な位置にいる (0.5±0.3)、無線機スイッチ・オン (0.1±0.1等)、カリフォルニア号信号灯を正しく認識 (0.5±0.3)、カルパチア号が救助可能な位置にいる (0.5±0.3)。

表 13 各事故の発生確率と犠牲者数

犠牲者数	発生月	シーケンス	発生確率	累積発生確率
2083	3月	ST16 a1	2.96E-07	
2083	3月	ST17 a1	2.37E-06	
2083	3月	ST26 a1	1.57E-07	
2083	3月	ST27 a1	8.97E-07	
2083	3月	ST41 a1	1.86E-09	
2083	3月	ST42 a1	1.49E-08	
2083	3月	ST51 a1	9.86E-10	
2083	3月	ST52 a1	5.63E-09	
2083	4月	ST16 a1	1.49E-06	
2083	4月	ST17 a1	1.19E-05	
2083	4月	ST41 a1	9.34E-09	
2083	4月	ST42 a1	7.47E-08	
2083	4月	ST51 a1	4.96E-09	
2083	4月	ST52 a1	2.84E-08	1.72E-05
1966	3月	ST4 a1	1.31E-05	
1966	3月	ST6 a1	2.62E-05	
1966	3月	ST8 a1	4.20E-04	
1966	3月	ST10 a1	6.62E-06	
1966	3月	ST12 a1	9.93E-06	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

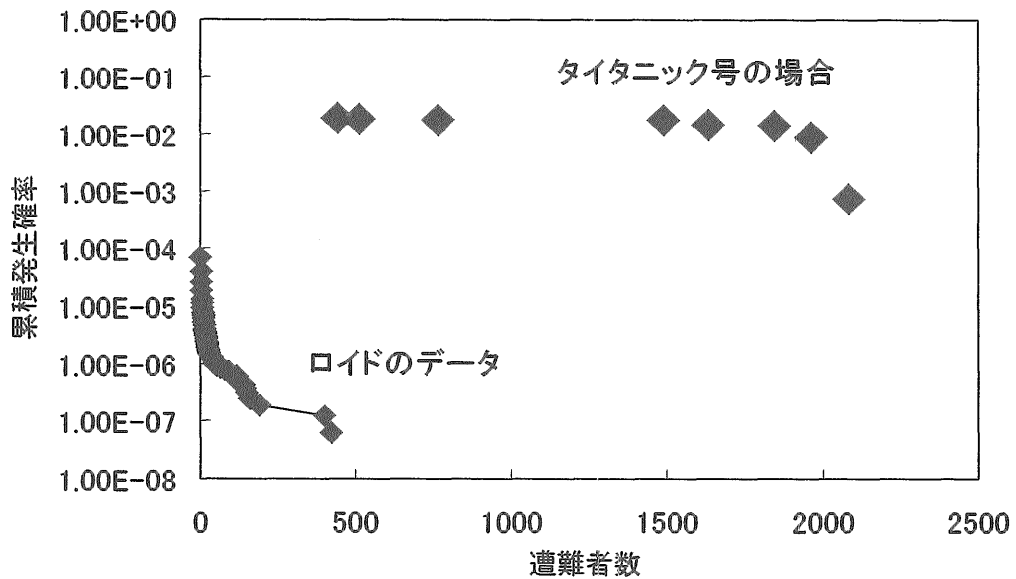


図 10 遭難者数と累積発生確率の関係 (Lloyd, Casualty Data 1978~1995)

解析の結果を図 11 中に各々の犠牲者数毎に 95% 上限値、5% 下限値を点線で示してある。また、最大値、最小値の存在限界をグレーの範囲で示した。
遭難者数と累積発生確率の関係からタイタニック号

事故と同程度以上の事故が発生する確率は、点推定値は 2.05×10^{-2} 回/航海であるが、95% 上限値は 3.47×10^{-2} 回/航海、5% 下限値は 9.82×10^{-3} 回/航海となった。

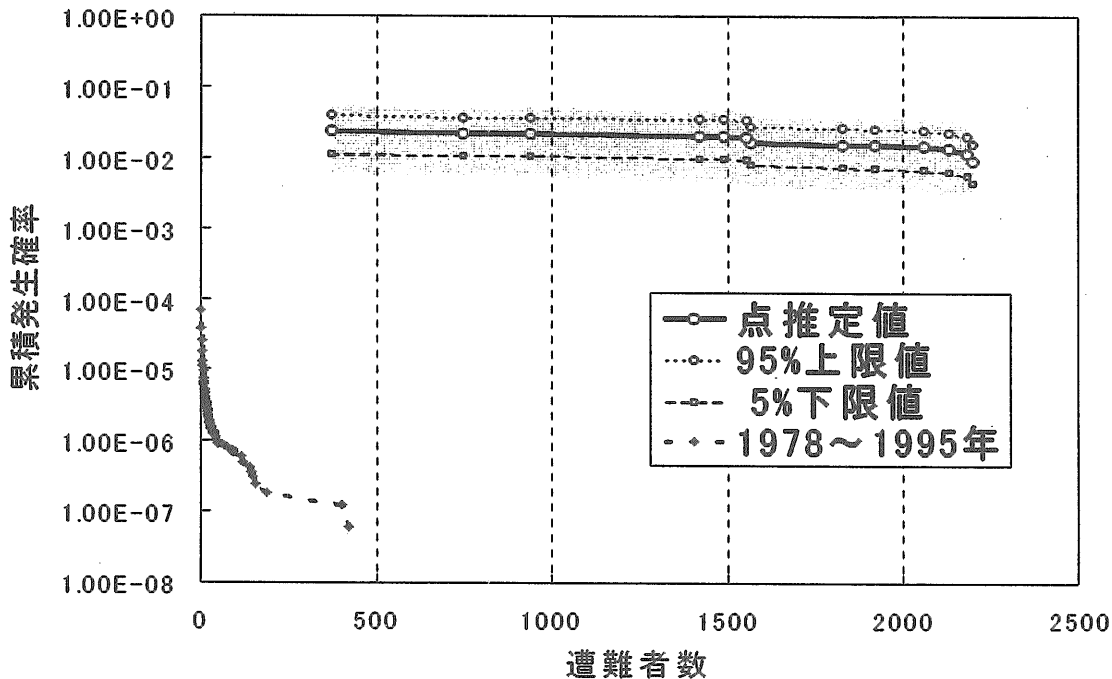


図 11 不確実さ解析を用いた遭難者数と累積発生確率の関係

3. 考察

以上の結果から、今世紀初頭の船旅は、現代のそれと比べはるかにリスクを伴ったものであり、現代の冒険者のおかれる状況の安全性が想像される。その理由としては、下記のようなものが考えられる。

- a. 救難体制の不備
- b. レーダー技術のない時代
- c. 天気予報、冰山情報無し
- d. 無線を有効に活用していない
- e. 未熟な Safety Culture

a,bについては、この事故以後 SOLAS 条約が発足し救命設備やレーダーのみならず下記に示されるような設備、構造等が規定されることとなり、大きな影響を与えた。

- ・ 損傷時の復元性 区画障壁の増設
- ・ 単底→二重底
- ・ 排水溝の集中化、水面下の放出
- etc.

a,b 以外のものについても、いずれもこの事故により受

けた影響は大きく、後に新たな体制やルールの作成に影響を及ぼしている。

また当時の船舶の設備などを考えると、それは乗員者数に対してまた装備として不充分なものであり、このことは遭難者が出る事故はすなわち大事故につながってしまうことも容易に想像できる。

4. 結論

過去において発生してしまった事故（タイタニック号の事故）に対して、従来適用されることの無かったイベントツリー手法を適用して評価を行った。これにより、タイタニック号の事故がどのような事象の積み重ねにより発生したかを検討し、その結果として、当時の状況における遭難者数と事故の発生確率などについて知見を得た。

本論により、イベントツリー手法の有効性が示され、タイタニック号に限らず各種の事故解析、事故原因究明の有力な手法となり得ると思われる。本方法を広く各種システムの事故解析に適用する事により、同種の事故の再発を防ぎ安全性向上に寄与できると考えている。

参考文献

1. タイタニック号遭難事件事故報告書 (海難審判庁訳)
2. <http://www.uscg.mil/lantarea/iip/home.html>
3. LLOYD'S MARITIME INFORMATION SERVICES、1978~1995 Casualty Data
4. 社団法人日本造船研究協会第46基準研究部会、放射
性物質の海上輸送の安全に関する調査研究 (海上火災) 平成10年度報告書、(1999年3月)
5. <http://www.srimot.go.jp/wavedb/wavedb.html>
6. 運輸省海上技術安全局：訓練手引書、船員災害防止協会、平成7年2月

附録 表計算ソフト（エクセル）によるイベント・ツリー解析の実施

本解析では、市販の表計算ソフト（Microsoft EXCEL97）を用いて、ワークシート上にイベント・ツリー（以下、ETと略記）を作成し、マクロプログラムを用いて解析を行った。

今回表計算ソフトにより作成したETを附図1に示す。Aには各ヘディングが示されている。Bはシーケンスの通し番号、Cは遭難者数が記入されている。Dは計算を実行することにより得られた、各シーケンスの発生確率である。

一般的なETは本文図2の様に分岐点が上下に分岐した線に対してほぼ中央の位置にあるが、ワークシート上にETを作成する際は附図1の様に分岐点を上に詰めて作成した。これにより1つの行には1つのシーケンスしかなくなるため、分岐の挿入・削除を行挿入・行削除で行うことが可能となる。ETの作成では分岐した後に同じ形の分岐関係が続くことが多いため、複数行をワンセットで複写することによりETの作成が非常に簡単になる。

分岐のうち、上の枝の分岐確率には、1から下の分岐確率値をセル参照を用いて引いた値となるよう設定した。また、同じ列にあり、同じ分岐確率値が入るセルはETの上欄に参照用のセルをEの様に設け、そこを参照することで値を設定した。これにより、参照用のセルの値を変更すれば、必要な変更が全て完了するため、様々な仮定をおいた計算が容易となる。

なお、ETの線の色塗り、分岐確率値が参照しているセルの記入等は、適宜マクロプログラムを用いることにより効率的に行うことができる。

本解析体系では、各シーケンスの発生確率値の計算から結果のソート・集計・グラフの作成まで一度に行えるようプログラムした。計算結果は、附表1・附図2の様な形で与えられる。

以上は分岐確率に点推定値を用いた場合の解析であるが、不確実な解析を行う際には、分岐確率値をすべて独立な乱数で与える必要がある。そのため点推定値の解析のようにE欄へのセル参照では行うことが出来ない。その場合でも、置換用のマクロを作成するなどして、比較的簡単に変数を設定し直すことが可能である。1回分の計算を終えた後、乱数を更新して次の回の計算を行うこととなる。

表計算ソフトを用いてET解析を行う利点は以下の様にまとめられる。

- ・ETの作成・検証が簡単である

表計算ソフトの持つ豊富な編集（カット&ペースト、検索・置換など）・表示（ウインドウ枠の固定・複数行の表示/非表示など）・印刷機能を利用することで、ワークシート上で容易にETを作成・検証できる。複雑な条件付きの置換や色塗り、分岐確率値の合計値確認などに適宜小さなマクロプログラムを利用すれば、ETの作成・検証はより容易となる。

- ・マクロ作成が簡単である

マクロ言語は、システム開発等に用いられる低レベル言語に比べてプログラムが易しいため、ワークシートと連動したマクロプログラムを簡単に作成できる。また、統計処理などに各種の内部関数を利用することで、それらを独自に作成するよりも簡便かつ高速なプログラムを短時間で作成可能である。

- ・自由度の高い解析が可能である

ETとマクロプログラムを解析者自ら作成することができるため、様々なカスタマイズを行うことが可能である。例えば、今回の解析では表計算ソフトのワークシート上に、タイタニック号の乗船総数とボート総定員から遭難者数を計算する表を作成したが、その計算結果をETの遭難者数のセルから参照することにより、ボート総定員を変化させた結果を直ちにETに反映させて解析を行うことが可能である。また、ETの分岐相互間に従属性があり、その関係が分かっている場合は、その関係をETの参照関係でif~thenなどを用いてET中に作り込むこともできる。

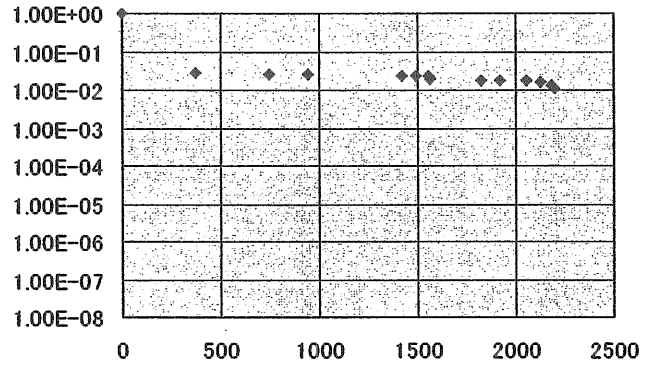
エクセルでET解析を行う欠点は、計算速度が遅いことである。点推定値の計算ではあまり問題とはならないが、不確実な解析では数千回の計算を行う必要があるため問題となる。例えば、今回の解析ではPentium III 400MHzのCPUを持つPCを用いたところ、1回あたりの計算時間は約2分であった。3,000回の計算を行うには約100時間を要する。

しかし、ETによる解析では、通常ETの作成とその検証に多大な労力を要し、解析時の障害となっている。エクセルを用いることで簡便にETを作成・検証できるという利点は、計算速度が遅いという欠点を十分補うものである。

また、現在エクセルは広く普及しており多くのPCで利用可能である。そのため、身近にある複数台のPCを用いて分散計算を行うことが出来る。今回は、4台のPCに分散させて計算を行うことにより、およそ1日で計算を終えることが出来た。PCの性能も年々向上しており、この欠点のもつ重要性は徐々に小さくなる傾向にある。

附表1 集計結果

遭難者数	発生確率	累積発生確率
2201	0.010945874	0.010945874
2183	0.002838594	0.013784468
2130	0.001770621	0.015555089
2059	0.001308679	0.016863768
1918	0.000816311	0.017680079
1824	0.000418846	0.018098925
1564	0.001410864	0.019509789
1553	0.003352676	0.022862465
1490	0.000847844	0.02371031
1421	0.000193101	0.023903411
941	0.001545687	0.025449097
747	0.00021828	0.025667377
373	0.001603869	0.027271246
0	0.972728754	1



附図2 遭難者数と累積発生確率の関係

完成が一月遅れる	氷山の存在	出航の遅れ	月明かり	波高	他船の警告による減速	双眼鏡	氷山発見し減速・回避	回避操作	カリフォルニア号の位置	カリフォルニア号の通信機スイッチ	カリフォルニア号を探知し正しく認識	カリフォルニア号の位置	カリフォルニア号の通信機スイッチ
出航3月 0.2	南下しない(3月) 0.6581	遅れない 0.999376	有り 0.725	波高 0-1 0.156525	減速する 0.2	所持する 0.5	発見する それぞれ記入	減速せずに直進 0.06	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	正しく認識 0.5	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1
出航4月 0.8	南下する(3月) 0.3419	遅れる 0.000624	なし 0.275	波高 1-3 0.253175	減速しない 0.8	所持しない 0.5	発見しない それぞれ記入	減速して直進 0.12	救助不可能な位置 0.5	スイッチオフ (after midnight) 0.9	正しく認識せず 0.5	救助不可能な位置 0.5	スイッチオフ (after midnight) 0.9
	南下しない(4月) 0.5699			波高 3-12 0.54915				減速して舵を切る 0.12		スイッチオン 0.9			スイッチオン 0.9
	南下する(4月) 0.4301			波高 12- 0.04115				減速せず舵を切る 0.7		スイッチオフ (before midnight) 0.1			スイッチオフ (before midnight) 0.1

タイム シミュ シタ 出航	完成が 一ヶ月遅 れる	氷山の存在	出航の 遅れ	月明かり	波高	他船の警告による減速	双眼鏡	氷山発見し減速・回避	回避操作	カリフォルニア号の位置	カリフォルニア号の通信機スイッチ	カリフォルニア号を探知し正しく認識	カリフォルニア号の位置	カリフォルニア号の通信機スイッチ	遭難者数
1 top	出航3月	南下しない													0
1	0.2	0.6581													0.13162
2		南下する	遅れない	有り	波高0-1	減速する	所持する	発見する							0
		0.3419	0.999376	0.725	0.156525	0.2	0.5	0.8							0.000620397
3								発見しない	減速せずに直進						2201
								0.2	0.06						9.30596E-06
4									減速して直進						0
									0.12						1.86119E-05
5									減速して舵を切る	救助可能な位置	スイッチオン				373
									0.12	0.5	0.1				9.30596E-07
6											スイッチオフ	正しく認識			747
											0.9	0.5			4.18768E-06
7												正しく認識せず	救助可能な位置	スイッチオン	1490
												0.5	0.5	0.1	2.09384E-07
8														スイッチオフ	1564
														0.9	1.88446E-06
9													救助不可能な位置		1564
													0.5		2.09384E-06
10										救助不可能な位置			救助可能な位置	スイッチオン	1490
										0.5			0.5	0.1	4.65298E-07
11														スイッチオフ	1564
														0.9	4.18768E-06
12													救助不可能な位置		1564
													0.5		4.65298E-06
13									減速せず舵を切る						0
									0.7						0.000108569
14							所持しない	発見する							0
							0.5	0.7							0.000542847
15								発見しない	減速せずに直進						2201
								0.3	0.06						1.39589E-05
16									減速して直進						0
									0.12						2.79179E-05
17									減速して舵を切る	救助可能な位置	スイッチオン				

附図1 ワークシート上に作成したイベントツリー

イベント発生時期	完成が一月遅れる	氷山の存在	出航の遅れ	月明かり	波高	他船の警告による減速	双眼鏡	氷山発見し減速・回避	回避操作	カリフォルニア号の位置	カリフォルニア号の通報機スイッチ	カリフォルニア号番号等を正しく認識	カルパチア号の位置	カルパチア号の通報機スイッチ	遭難者数
									0.12	0.5	0.1				373
18											スイッチオフ 0.9	正しく認識 0.5			747
19												正しく認識せず 0.5	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1490
20													スイッチオフ 0.9		1564
21													救助不可能な位置 0.5		1564
22									救助不可能な位置 0.5			救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1490	
23													スイッチオフ 0.9		1564
24													救助不可能な位置 0.5		1564
25									減速せず舵を切る 0.7						0
26						減速しない 0.8		発見する 0.6							0
27								発見しない 0.4	減速せずに直進 0.06						2201
28									減速して直進 0.12						0
29									減速して舵を切る 0.12	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.9				373
30											スイッチオフ 0.1	正しく認識 0.5			747
31												正しく認識せず 0.5	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.9	1490
32													スイッチオフ 0.1		1564
33													救助不可能な位置 0.5		1564
34									救助不可能な位置 0.5			救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.9	1490	
35													スイッチオフ 0.1		1564
36													救助不可能な位置 0.5		1564
37									減速せず舵を切る 0.7						0
38					波高1-3 0.253175	減速する 0.2	所持する 0.5	発見する 0.95							0
39								発見しない 0.05	減速せずに直進 0.06						2201
40									減速して直進 0.12						0
41									減速して舵を切る 0.12	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1				941

	A	B	タイ ク ン ク ン 出航	完成が 一ヶ月遅 れる	木山の持込	出航の 遅れ	月明かり	波高	他船の警 告によ る減速	取巻料	水山発見し 減速・直進	回響操作	カリフォルニア号 の位置	カリフォルニ ア号の通信 機スイッチ	カリフォルニア 号信号機を正 しく認識	カルパチア号の位 置	ガリパチア号 の通信機ス イッチ	遭難 者数
42														スイッチオフ 0.9	正しく認識 0.5			1421
43															正しく認識せず 0.5	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1918
44																スイッチオフ 0.9		2059
45																救助不可能な位置 0.5		2059
46													救助不可能な位置 0.5			救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1918
47																スイッチオフ 0.9		2059
48																救助不可能な位置 0.5		2059
49												減速せず舵を切る 0.7						0
50										所持しない 0.5	発見する 0.9							0
51											発見しない 0.1	減速せずに直進 0.06						2201
52												減速して直進 0.12						0
53												減速して舵を切る 0.12	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1				941
54													スイッチオフ 0.9	正しく認識 0.5			1421	
55														正しく認識せず 0.5	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1918	
56																スイッチオフ 0.9		2059
57																救助不可能な位置 0.5		2059
58													救助不可能な位置 0.5			救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.1	1918
59																スイッチオフ 0.9		2059
60																救助不可能な位置 0.5		2059
61												減速せず舵を切る 0.7						0
62									減速しない 0.8		発見する 0.8							0
63											発見しない 0.2	減速せずに直進 0.06						2201
64												減速して直進 0.12						0
65												減速して舵を切る 0.12	救助可能な位置 0.5	スイッチオン 0.9				941
66														スイッチオフ	正しく認識			

←C
D
↓

0.0000016934
0.0000000847
0.0000007620
0.0000008467
0.0000001882
0.0000016934
0.0000018815
0.0000439021
0.0011289101
0.0000075261
0.0000150521
0.0000007526
0.0000033867
0.0000001693
0.0000015240
0.0000016934
0.0000003763
0.0000033867
0.0000037630
0.0000878041
0.0080278049
0.0001204171
0.0002408341
0.0001083754

附図1 ワークシート上に作成したイベントツリー