

確率論的安全性評価手法による タイタニック号事故の解析

三友 信夫*、松倉 洋史*、松岡 猛*

Probabilistic Safety Assessment (PSA) of Titanic

by

Nobuo MITOMO, Hiroshi MATSUKURA and Takeshi MATSUOKA

ABSTRACT

For large and complex systems, full and enough investigation is required not to damage the public or operators, before design, construction and operation. Especially chemical plant, nuclear power plant and ships etc. must not cause any large accidents because of the safety of the public or lots of people working there. So, the new assessment, PSA (Probabilistic Safety Assessment), becomes popular in addition to deterministic safety assessment for these complex systems. In this paper, as an example of an application of PSA for the marine field, the event tree analysis method was applied to the Titanic accident. Factors which related to the Titanic accident were all selected under the those day's surrounding condition. The occurrence probabilities of the factors have been estimated from various data. The probability that the Titanic encounters the sever accidents, and number of fatality have been calculated.

This report has shown the detailed procedure of event tree analysis for a marine accident. It has also shown the effectiveness of event tree analysis for the analysis of accident causes and for the improvement of the safety for various large complex systems.

*システム技術部

原稿受付 平成11年11月9日

審査済 平成12年5月31日

目 次

1.序論

2.タイタニック号事故におけるイベント・ツリー

2.1 タイタニック号事故の概要

2.2 イベント・ツリー解析

2.2.1 身近な対象のイベントツリーによる解析

2.2.2 タイタニック号事故のイベントツリー作成

2.3 イベント・ツリーの定量的解析

2.4 遭難者数算定

2.5 不確実さ解析

3.考察

4.結論

参考文献

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

1.序論

大規模複雑なシステムを設計・建設・運転する際には、そのシステムが公衆や運転員に被害を与える恐れが無い様、事前の十分な検討が要求される。被害の程度がそれほど大きくないと想定されるシステムの場合は、使用経験の蓄積により安全性が判断され、安全確保のための様々な工夫がなされていく。しかし、原子力プラント、化学プラント、高速鉄道システムあるいはタイタニック号に代表される大型客船等、大規模システム及び多数の人員の関与するシステムにおいては、事故時の影響の大きさから万が一にも大事故を発生させるわけにはいかない状況にあり、またタイタニック号の時代においてもそうであった。

安全評価法としては、決定論的方法と確率論的方法がある。決定論的方法においては安全確保のための工夫がどの様に機能するかを解析し、安全が確保されていることを確認する方法がとられている。しかし、完璧な工学システムというものは存在しないという立場からは何重にも整備された安全防護系でも次々に機能しなくなる多重故障を評価しなくてはならない。そこで、システムを構成する機器の故障・破損、システムを取りまく状況の発生を確率的な事象と捉え、システムにとり不都合な事態（事故）が発生する確率を定量的に評価する確率論的安全評価（PSA: Probabilistic Safety Assessment）という考え方が導入されてきている。

確率論的安全評価では、被害発生の可能性の程度を

明らかにする。そのために、イベント・ツリー手法という解析手法を用い、起こり得る事故シーケンス（被害に到る事象の組み合わせ）を全て調べ上げ、その発生頻度を定量的に評価する。これにより実際に事故を発生させることなく事前にシステムにとり問題となる箇所を摘出し、対策を施すことが可能となる。言い換えれば、未来において発生するかもしれない事象の予測手段と言える。

本論においては、逆に、このイベント・ツリー手法を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不運な事象の積み重ねにより発生したか。つまり、細い針の穴の様な道筋を通して結果的に惨事に至ってしまったのか。」、それとも、「あの様な状況では必然的に事故に至ったのであり、逆により大きな惨事にならずに済んだのは幸運であった。」のであるか興味ある判断が可能となる。

この様な、過去の事例に対してイベント・ツリー解析を実施するのは初めての試みであるが、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事が、本論により示されたといえる。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。

2.タイタニック号事故におけるイベント・ツリー

2.1 タイタニック号事故の概要

タイタニック号は当時の最新鋭の技術を駆使した豪華大型客船であったが、世界中が注目する中での処女航海において海難事故としてはかつてない人命が失われた大事故が発生してしまった。そのため、事故発生直後から事故に関しての種々のミステリーが仕立て上げられ、今日に至るまで数多くの小説、映画の題材となってきた。

事故発生から 90 年近く経つ現在でもタイタニック号という名は、この事故に関する映画が何度か製作され また中にはアカデミー賞を受賞するほどの大ヒットしたものもあることから、何らかの知識を持っている人も多く、中には専門家を自認し事故の原因・経緯についてそれなりの意見を持っている人も多数いると思われる。

ここでは、事故後英米政府によってなされた事故調査の公式報告書⁽¹⁾を主な参考資料として、タイタニック号事故発生に至るまでにおいて事故発生に影響があったと思われる事項を中心として、経緯の概要を記述する。

タイタニック号の建造計画は 1907 年末に起った。そして完成までに約 5 年の歳月をかけ、1912 年 4 月 10 日 予定より約 1 ヶ月遅れて処女航海に向けて多数の著名人を乗せて出航した。この 1 ヶ月の遅れは事故発生に大きな意味を持っていた。なぜならば 1 ヶ月前の 3

月中旬は氷山が流れ出す季節ではなく氷山との衝突事故は発生しなかったと考えられているからである。

次に、出航日においても予定より出航時刻が1時間遅れた。もし出来事の発生が全て1時間早まっていたならば、衝突後救難無線を発した時刻が夜中の12時前になり、すみやかに周辺に存在していた船舶が救助に駆けつけ、これだけの人命が失われることは無かったと言われている。

現代では常識とされている無線技術については、1800年代の終わりごろから開発されたものでありまだ実用化されて間もない技術であった。タイタニック号にも発明者であるマルコーニが乗船する予定であったが直前に取りやめとなった。マルコーニが乗船していれば、救難無線発信においてより効果的であったのではないかとされているが、果たしてそのようになったかどうかはあくまでも推測の域を出ない。当時はまだ無線技術は珍しく、乗客である著名人と英国、米国の地上との間の私信に主として活用されていた。それ故、この航海中では運航支援としての各種情報伝達には重きを置かれていなかった様である。

出航後、流水原が行く手の海域に存在するという警告を他船から無線で受信していたが、船長はそれほど深刻には受け止めていなかった。航海中も流水原があるという警告を更に受けるが、速力を落とすことなく高速(20.5ノット≒時速40km:船舶としては現在でも相当の高速である)で航行を続けた。これは大西洋横断の最短記録を目指していたという事情とも関係している。

やがて午後11:40に氷山に衝突してしまうのであるが、氷山発見が衝突の約37秒前、距離にして約450mであった。事故調査報告書に「午後6時から衝突時迄、天候は晴天、視界良好であった。月明かりなく星は輝き、空には一片の雲もなかった」とされているように、この夜は暗闇であったことと、珍しいほどの無風で鏡の様な水面で白波が全く立っていなかったことが発見が遅れた主な要因である。更に、見張り員が双眼鏡無しで見張り台に立っていた。ただし、この夜の条件では双眼鏡があったとしても、より早期の氷山の発見は無理であったとの意見もある。

氷山の発見後、回避行動をとるが船腹をなでる様に氷山をかすめて通り、そのため却って多数区画の損傷、浸水をもたらして沈没に至ってしまった。この回避行動の判断も適切ではなかったのではないかと。巨大船であり、一見したところ小さな氷山は恐れるに足らずという意識が操船者にあったと思われる。また、破損区画数を最小に押さえる衝突形態をとることを考えず、漫然と回避したのではないと思われる。

氷山との衝突の後、速やかに救難無線を出さず午前0時14分になって初めて救難無線を発している。この無線は多くの船舶に受信されている。しかしながら、それらの船舶のほとんどが事故地点からかなり離れていたため、救助に駆けつけることは不可能であった。しかしながら、唯一救助できる可能性をもった船舶が存在した。わずか19海里的距離にいたCalifornia号である。しかしながら、この船舶の通信係は24時間勤務体制ではなく午前零時をもって勤務を終了し休憩に入るのが習慣であったため、午前零時を過ぎたその

時は無線は切られていた。幸いにも、やや遠方ではあるが58海里的距離にいたCalpatia号は救難無線を受信し救助に駆けつけた。これらの事実が救助活動、犠牲者数に大きな影響をもたらしてしまった。

更に、午前零時44分信号灯を打ち上げ、California号の乗組員がこの信号灯を視認したと言われているが、信号灯の意味するところを理解せず救助には向かわなかった。

午前2時20分についてタイタニック号は沈没してしまった。

事故現場から58海里離れた位置にいたCalpatia号が最高航行速度を超えた速度により225分かけて午前4時10分頃到着した。しかし、その時既にタイタニック号は海の底に横たわっていた。もし沈没前に、他の船舶が到着し救助活動を行っていたら多数の人命が救われた事は明らかであろう。

以上の事故の経緯を図と表にまとめたものが、表1と図1(a), (b)である。

2.2 イベント・ツリー解析

本事件のような大事故においては、事故に至る過程および事故後の対応においては様々な出来事に遭遇し、その都度の対応、選択により結果が異なることは十分に考えられる。つまり、それらの出来事のうちの一つでも異なった対応をすれば結果的に事故に至らなかった、もしくはより多くの人命が助けられた等のことが考えられる。この様な考え方により、この事故に至った出来事などを網羅して評価するためにイベント・ツリー手法を用いて解析してみる。

まず、イベント・ツリーについて説明をする。イベント・ツリーとは原子力プラントの安全性評価などに用いられているもので、一般的に図2に示す形をしている。このケースでは、起因事象が左端に、これに続き事故過程を緩和する機能/系の動作が見出しとして上欄に示されている。起因事象から出発し、各機能の成功/失敗に従って分岐させていくことにより、それぞれの機能の成功/失敗の組み合わせに対応した事故シーケンスが得られる。右端に各事故シーケンスの最終的な結果、プラントの損傷状況などが記述される。

イベント・ツリーの作成においては、下記の2点に十分留意する必要がある。

- ・ 論理的に矛盾なく見落としのないものであること
- ・ 可能な限り整理されて見易い形のものであること

これらの条件に適し、どれだけ質の高いイベント・ツリーを作成できるかが、安全性解析の成否に大きく影響してくる。

表1 タイタニック号の事故までの経緯

1912年4月10日	出航予定日 (タイタニック号の完成が遅れたため、予定より約1か月遅れる)
	12:00 タイタニック号は出航しようと波止場から離れるが、直後にニューヨーク号とニアミスを起こしたためこの間1時間遅れとなる。
	13時頃 サウサンプトンを離れ、シェルブールに向かう。
	18:30 シェルブール到着。
	20:10 シェルブールを出港し、クイーンズタウンに向かう。
11日	11:30 クイーンズタウン到着。
	13:30 クイーンズタウンを出港し、ニューヨークに向かう。
12日	順調に航海
13日	順調に航海
14日	事故当日 (以下全てタイタニック号船内時間)
	9:00 カロニア号より冰山発見の告知を受ける (1回目)。
	13:42 バルチック号より冰山発見の告知を受ける (2回目)。
	13:45頃 アメリカ号から冰山発見との信号を傍受 (3回目)。
	17:50 南に変針。
	19:30 カリフォルニア号からの冰山発見との信号を傍受 (4回目)。この頃気温は摂氏0度程度まで下がる。
	21:30 船長が自室へ引き上げる。
	21:40 メサバ号より冰山発見の告知を受ける (5回目)。
	22:00 ライトラー氏、マードック氏に船橋の当直を引き継ぐ。
	23時頃 カリフォルニア号、タイタニック号に冰山点在との警告を送るがタイタニックは「やめろ」と応答する。
	依然として減速はせず、速力20.5ノットを維持する。
	23:30 カリフォルニア号、無線スイッチを切る。
	23:40 冰山に衝突。複数区画に浸水し始める。
15日	0:00頃 船の沈没が確実視されるようになる。
	0:05 救命ボートによる避難の準備が始まる。
	0:15 最初の救助要請信号 CQD が発せられる。
	0:20 救命ボートを繰り出すようにとの命令が出る。
	0:25 CQD 呼び出しがカルパチア号にキャッチされる。
	0:30頃 婦人と子供を救命ボートに移すよう命令がでる。
	0:35 カルパチア号から、救助に向かいつつあるとの通信を受信。
	0:45 最初の遭難信号灯 (ロケット) が打ち上げられ始める。カリフォルニア号、この信号灯を望見する。
	最初の救命ボートが水面におろされる。
	世界ではじめて SOS が発信される。
	1:40頃 カリフォルニア号はタイタニックの遭難信号灯をこの頃まで望見するが、最後まで救難要請とは気づかず。
	1:45頃 最後の遭難信号灯が打ち上げられる。
	2:05頃 最後の救命ボートがおろされる。
	2:17 最後の無線メッセージが発せられる。
	2:20 沈没。
	2:40頃 カルパチア号、救命ボートから打ち上げられた緑色の信号灯をはじめで確認する。
	4:10 カルパチア号、最初の救命ボートから乗客を救助する。
	9時頃 カルパチア号、救助を終えニューヨークへ向かう。
16日	
17日	
18日	夜 カルパチア号、ニューヨークに到着。

(「タイタニック号遭難事件 (公式報告書)」及び「不沈タイタニック」その他より)

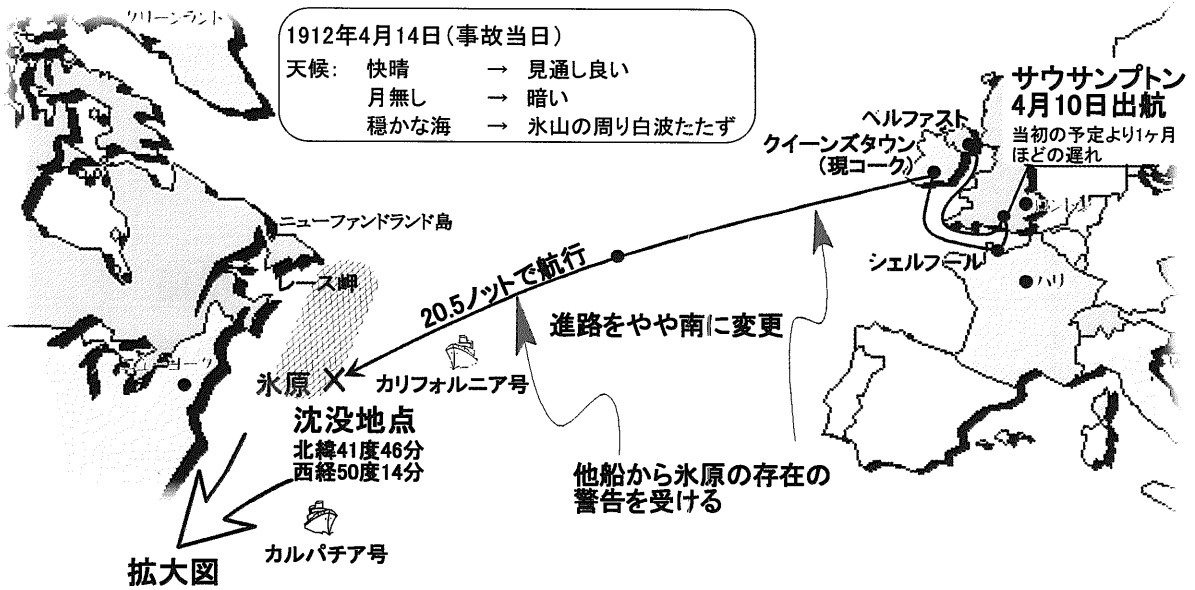
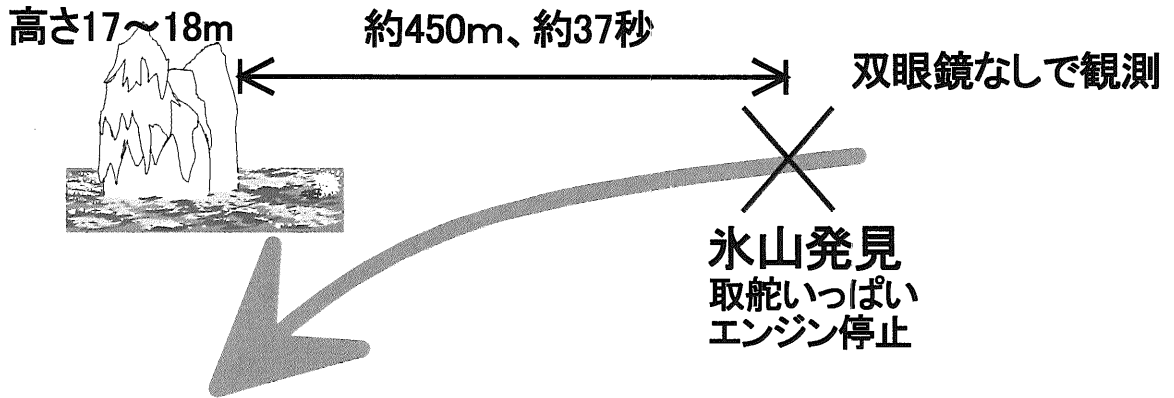


図 1(a) タイタニック号事故までの主要素



船腹をなぞるようにかすめて通り過ぎる

無線発信	4月15日午前0時14分
信号灯	午前0時44分
沈没	午前2時20分
カルパチア号到着	午前4時10分

図 1(b) タイタニック号事故までの主要素

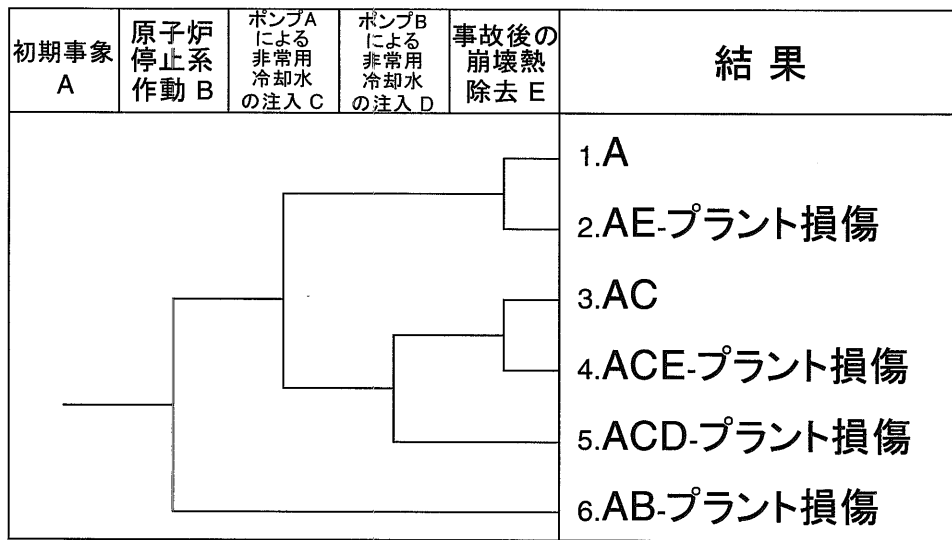


図2 イベントツリーの例

2.2.1 身近な対象のイベントツリーによる解析

そこで、実際に 今回のタイタニック号事故のケースのような場合にイベントツリーを作成する例について考える。自宅まで徒歩で帰宅する場合を仮定する。通常なら、自宅まで曲がることもなく一本道であるが、雨天でない場合 道路工事が行われる可能性のある場所がある。また この経路においては、自宅までの間に信号機が設置されている交差点が2 箇所ある。このようなケースを取り上げ、起り得る様々な場合を考え、自宅までの所用時間についてイベントツリーを用いて考察してみる。

まず、図3のような状況を考え、その際に次のような仮定をたてる。

- ・雨天でなく、信号で停止せず 工事にも遭遇しない

い場合には全行程 10 分、雨天の場合には 15 分とする

- ・雨天の場合、工事は行われない（雨天であるつまり工事が行われない確率:0.2）
- ・雨天でない場合でも、道路工事の計画上必ずしも工事は行われない（工事が行われる確率:0.9）
- ・信号で停止した場合、A:一度につき 2 分待たされる、B:破線方向 2 分、実線方向 1 分待たされるとする（信号で停止する確率 A:0.5、B 破線方向:0.7 実線方向:0.3 各交差点の大きさと優先方向に依存する）
- ・工事が行われている場合、道路が全面的に閉鎖され、その場合には図中の破線矢印のように迂回しなければならず、5 分の遠回りとなる

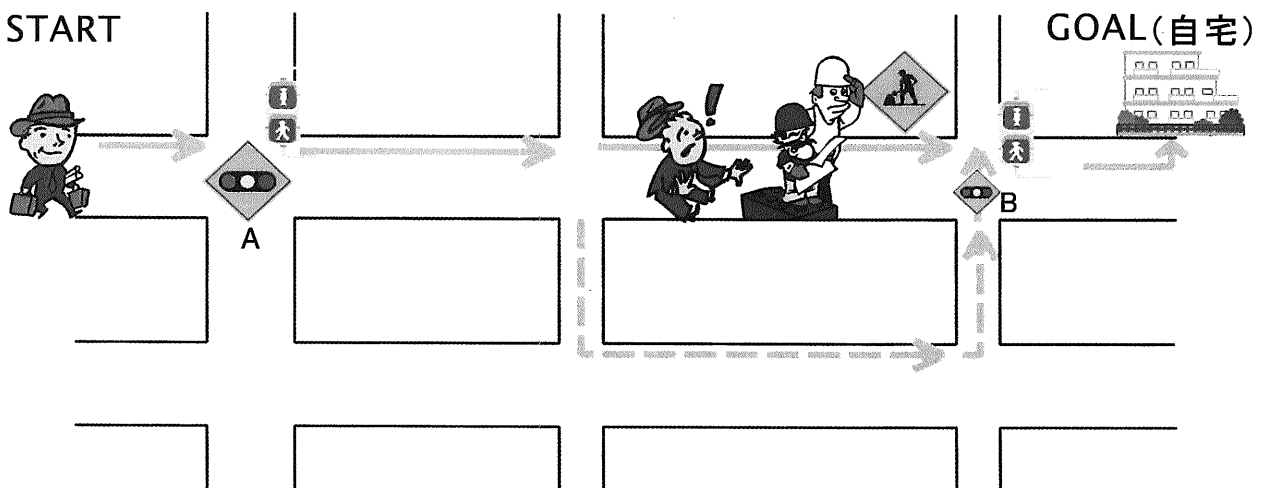


図3(a) イベントツリー例題図

以上のことからイベントツリーを作成すると下図のようになる。

図 3(b)から、今回の例における各所要時間とその発生確率が分かる。この結果について、更に所要時間とその確率について理解しやすく図 3(c)の様にとめることができる。この図においては、横軸は所要時間を、縦軸はその所要時間の発生する確率を累積した累積発生確率を示している。この図からは、たとえば所要時間が 15 分以上であるケースの発生確率を累積した場合それは 0.8 程度となっている。このことは所要時間

が 15 分以上かかる状況は確率が 0.8 程度で発生してしまうことを意味している。つまり、最短で 10 分程度の距離でも今回の仮定のような状況では、その 1.5 倍以上の時間を要することが 80% 程度も可能性があるということである。ここに示した例からわかる様に、イベントツリーを用いる場合には、種々の条件が関与する事象においてもそれらを整理、この例においては時系列に整理などし、さらに解析に必要なものとそうでないものを区分けすること等により、抜け落ちなく分析することが可能となる。

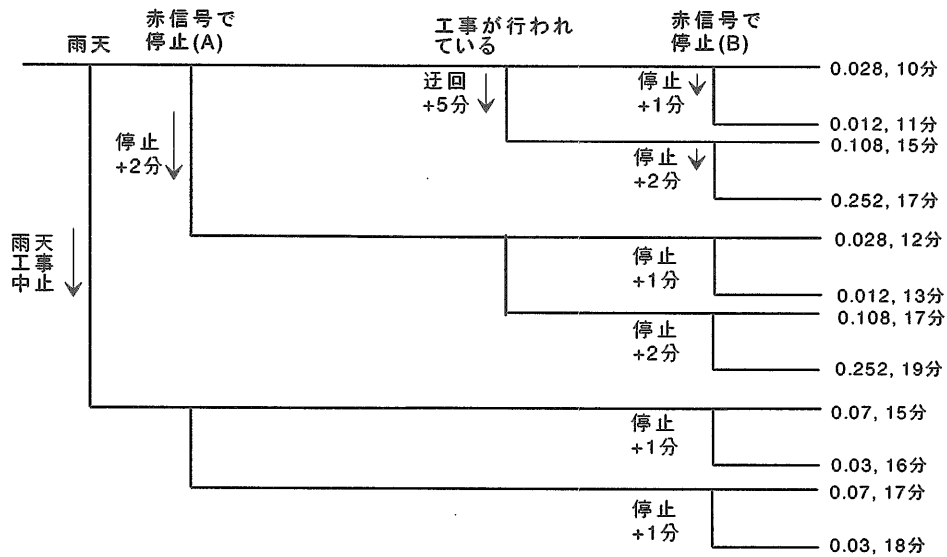


図 3(b) イベントツリー例題結果

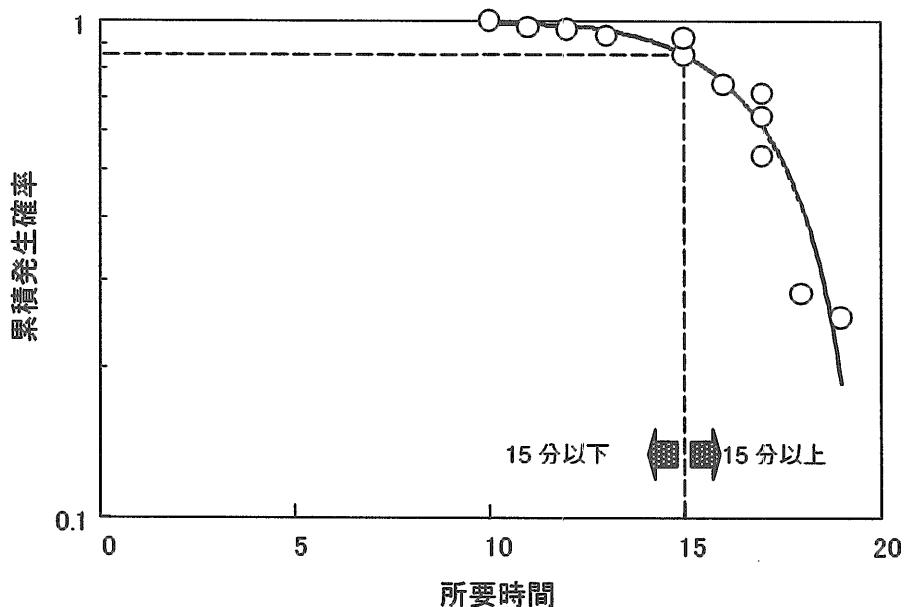


図 3(c) 累積発生確率と所要時間の関

2.2.2 タイタニック号事故のイベントツリー作成

以上のような特徴を持ったイベントツリーを用いて、タイタニック号が1912年4月10日に港を出発してから同15日に沈没するまでの過程を解析をしてみることにする。そこでまず沈没するまでの航路において実際に起こった事実、また遭遇したと報告されている出来事等のうち、事故および事故後の救助活動に関係すると思われるものについて示したものが表2である。

表2に示された出来事の他にも当然様々な事が起きているが、それらのなかには、「7.双眼鏡の有無」のような一見些細な出来事と思われることと比べ、より重大な出来事に思われるものも存在しているが、この表には本事故に関係すると考えるもののみを取り上げている。

1. 完成の遅れ

タイタニック号は、当初3月の処女航海を予定し建造が行われていた。しかしながら、途中同じ船会社所属の姉妹船Olympic号が衝突事故を起こしたため、その修理のためにドックおよび作業員を奪われてしまい、完成予定が大幅に遅れることになった。

2. 氷山の存在

完成が遅れたことにより、タイタニックの出港は4月となる。

3. 出港の後れ

当初の予定から遅れながらも出港の日を迎えたタイタニックであるが、この出港当日にも他船と接触事故を起こしそうになっている。この事故により、出港は約1時間遅れることとなったが、この1時間が後の事故の際に他船への救難信号の送受信に大きな影響を及

ぼす。

4. 月明かり

氷山への対応の不的確さがこの大惨事の原因の一つであることは容易に想像されることであるが、この「氷山の発見」に必要な条件として、当日の「月明かり」の存在は重要である。しかしながら、前述したような視界条件であったため海上は暗く有効な視界は短く、裸眼による目視では氷山の発見は困難であったと思われる。

5. 天候

前述した月の光の他にも、「氷山の発見」に必要な条件として当日の波、風と言った天候なども大きな要因となる。つまり事故当夜は新月に近い状態であっただけでなく、波も風もなく穏やかな鏡のような海面であった。このような状態では氷山などの漂流物は発見しづらい。しかしながら、風や波については適度な強さであれば氷山に衝突した波が白く立ち、氷山は発見されやすい。逆に強すぎる風や波は航行に危険である。

6. 他船からの警告を受けたことによる警戒

事故が起こった夜は、事故地点の近海には何隻もの船舶が航行していたことが報告されている。当然これらの船舶の内何隻かは、氷山に遭遇、またはその存在に気づき他船へ警告を発している。この警告をタイタニック号も受けているが、無視してしまっている。

7. 双眼鏡の存在

安全な航海を行うためには、双眼鏡を利用した監視は有効な場合が多い。しかしながらタイタニック号では氷山の衝突前後、双眼鏡を用いた監視が行われていなかった。このことについても諸説様々なものがあるが、この事故のケースでは双眼鏡を用いていたとして

表2 事故に関連すると思われる事実および出港後の出来事

分類		場所・時間	
1.	完成の遅れ	出港前	
2.	氷山の存在	航海中	
3.	1時間の出港の遅れ	出港時	
4.	月明かり	航海中	
5.	天候	航海中	
6.	他船からの警告を受けたことによる警戒	氷山発見の前後	
7.	双眼鏡の存在	航海中	
8.	氷山の発見による減速	氷山発見時	
9.	衝突状況	事故時	
10.	他船の位置	California号	事故時
		Calpatia号	事故時
11.	通信機のスイッチ	California号	事故時
		Calpatia号	事故時
12.	救助信号灯に対する反応	California号	事故時

もそれが有効であったかどうかは疑問である。

8. 氷山の発見による減速

タイタニック号は、事故の直前まで現代においても高速と考えられる約 20 ノットで航行していた。このような高速でも、遠方で氷山を発見した場合には回避できるものとした。

9. 衝突状況

氷山を発見した時にタイタニック号がとった対応は、減速かつ方向転換を試みている。しかしながらこの場合においても他の方策はあったはずであり、大型船舶の操船経験者に尋ねてみたところでも、通常の判断では減速はしないとのことであった。衝突の際に、氷山が船体のどの部分と衝突したのかにより事故の程度は大きく変わったはずである。結果的には、複数区画の浸水をもたらすような衝突形態となったが、衝突の仕方次第ではこの様な結果に至らなかったはずである。つまり、この衝突形態ゆえに 2 時間で沈没という事態になり救助までの余裕時間が小となった。しかしながら、損傷がもっと軽度のものであれば沈没までの時間が延びたもしくは沈没しなかった等のことが考えられる。ここでは、衝突の形態を大きく 4 種類に分類して考える。

10. 他船の位置

事故時には周囲を何隻かの船が航行し、また それらのほとんどの船舶が CQD 信号を受信したものの救助に駆けつけることは困難な状況であったことは概要でも述べたとおりである。しかしながら、それらの船舶の中で California 号がわずか 19 海里離れた海域を航行していたことは重要な意味を持つと考える。つまり、現実には救助に駆けつけることはなかったがもしも救助に参加していれば、助けることの出来た乗客の数はかなり増えていたはずである。また、実際に駆けつけた Calpatia 号については、58 海里も離れた場所から性能以上の速度を出して駆けつけている。周囲の船舶

がタイタニック号に対し、流水群の背後に存在していたか否かでも救助に来られるかどうかがわかる。

11. 通信機のスイッチ

概要でも述べたとおり、救難信号を傍受した船舶は幾つかあった。しかしながら「肝心の」と言っても良いであろう、最短距離にいた California 号では、当時の通信係の勤務体系として午前零時以降の業務は行われていなかった。したがって、基本的には通信機のスイッチは切られていた。その結果タイタニック号の CQD 信号を受信されず救助できた乗船者の数に大きな影響を及ぼしたものと考えられる。

12. 救助信号灯にたいする反応

事故発生後タイタニック号からは、救助信号灯が発せられている。この救助信号灯がどの程度の数の船舶から見る事ができたか、また見えた場合でもそれが救助を求める意味であると判断できたかも重要なことである。

13. 救助までの時間の考察

前述したように事故発生後のタイタニック号の救助に駆けつけることのできた船舶として、実際に救助にあたったカルパチア号とカリフォルニア号を取り上げて考えることができる。これらの船舶の到着時間を、その事故時の位置から算出すると表 3 のようになっていた。これらの事象をもとに作成したイベント・ツリーが図 4(a), (b)で、それぞれの事象の関連がわかりやすく示されている。図中「ST1, a1」等はシーケンスの番号を示し、上位からナンバリングされる。また矢印は図 4(a)から(b)に続くシーケンスを示す。図 4(a)では出航から衝突直前までの事象の展開を示してあり、これに続く展開がある場合の 1 例として図 4(b)に(a)中の *印の後に続くシーケンスを示してある。また、図 4(b)の右端は事象の結果を示すが、それらを含め詳細等については 2.3 イベント・ツリーの定量的解析等において後述する。

表 3 救助に駆けつけることのできた船舶とその位置

救助の可能性のあった船舶	Titanic 号からの距離(船舶の最高速度)	無線信号を受信した場合の到着時間	信号弾を認識した場合の到着時刻
カルパチア号	58 海里 (14 ノット)	249 分後、実際には午前 4 時 10 分頃到着	見えなかった
カリフォルニア号	19 海里 (13 ノット)	87 分後 (午前 1 時 43 分)	午前 2 時 10 分

2.3 イベント・ツリーの定量的解析

図 4 に示したイベント・ツリーの各分岐確率を求めることにより各事故シーケンスの発生頻度が算出でき定量的解析が完了する。今回の解析では、起因事象は「タイタニック号の出航」となるが、この発生頻度を 1 として解析を進める。

1. 完成の遅れ:完成の遅れた理由は、ドックおよび作

業員を他船の修理のために奪われてしまったのがその理由であった。そこで、当時 一般的にこの様な大型船が種々の理由により 1 ヶ月以上予定より遅れる確率を求めることとする。そのためには、当時の船舶の建造の実態データ等を入手したいところであるが、現実には困難であるため、有識者から得た情報をもとに検討することとした。その

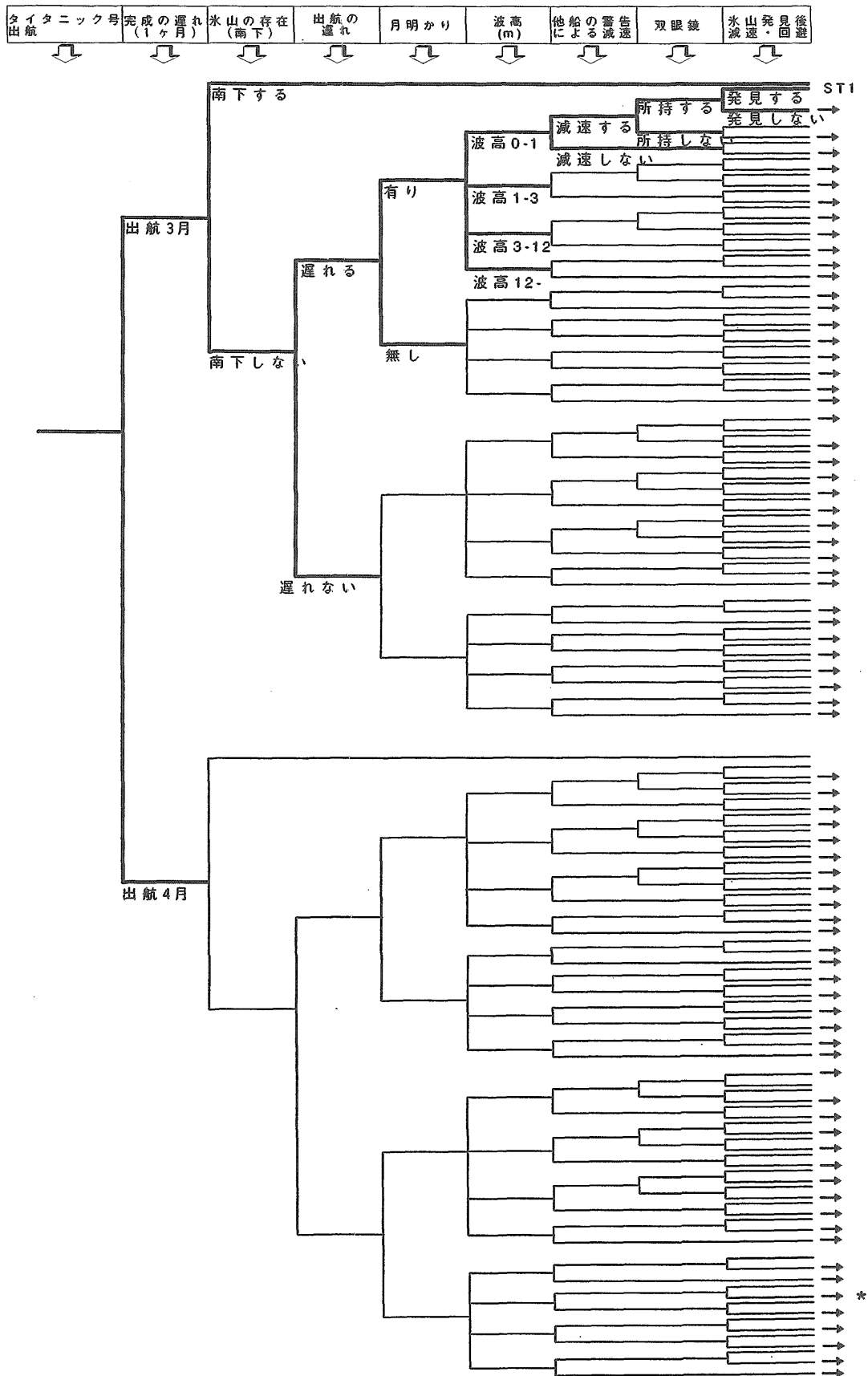


図 4(a) タイタニック号事故におけるイベントツリー