

事故 災害

イベント・ツリーを用いた 事故・災害の分析 タイタニック号事故を例にして

松岡 猛

Takeshi MATSUOKA

工博 独立行政法人 海上技術安全研究所
システム技術部 部長

確率論的安全評価

大規模プラント、公共施設、高速鉄道システム、大型客船等の安全評価法としては、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とらえ、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¹⁾。

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²⁾という解析手法を用い、被害に到る多重故障の組合せ（事故シーケンス）、その発生確率（ P_i ）、被害の大きさ（ C_i ）を全て調べ上げ、 $P_i \cdot C_i$ の総和によりシステムのもたらすリスクを定量的に評価する。これにより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。このイベント・ツリー手法をすでに発生してしまった事故・災害に適用して分析を行うことも可能である。1912年に発生した海難史上最大級の事故であるタイタニック号事故³⁾にイベント・ツリー手法を適用してみた。タイタニック号事故は不運な事象の積み重ねにより発生したのか、それとも、あのよう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すんだのは幸運であったのか、また、事故を引き起こした要因は何であったのか等興味ある判断が可能となる。

このイベント・ツリー手法は、各種の事故解析、事故原因究明の有力な手法となり得る。本方法を広く事故・災害の解析に適用することにより、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。

イベント・ツリー手法

イベント・ツリーは重大事故・災害発生につながり得る複雑な事故シーケンスの展開に適した解析方法で図-1に示すようなツリー構造をもっている。この例では天ぷら油に火が入るという身近な事象が示してある。左端に発端となる起因事象が置かれ、順次各種状況の発生、人間による対策、安全設備の動作等を表わす見出し（ヘディング）が上部に書かれている。各ヘディングにおける状

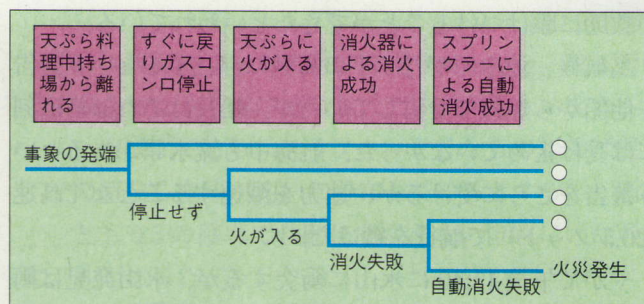


図-1 身近な事象についてのイベント・ツリー

況・機能・対策の発生・成否に対応して事故のシーケンスが上下に分岐してゆく。分岐の最終端にある○印は事象が安全に収束したことを意味している。このようにして、論理的に起こり得る全ての事故シーケンスを同定することができる。

このイベント・ツリーにより得られる各事故シーケンスを定量的に評価するためには、起因事象の発生頻度と合わせて各ヘディングの成否の確率を求める必要がある。安全設備の動作に対してはフォールト・ツリー（FT）⁴⁾、GO-FLOW手法⁵⁾等の解析手法が使われている。各種状況の発生については統計データ等の実測値が用いられ、人間による対策を支配する人的過誤率の推定には人間信頼性解析手法⁶⁾が活用されている。

人間行動は個人差（熟練、非熟練）が大きく、また置かれた状況（ストレスの高低）によっても過誤率は異なってくる。事故事例からの統計データ、被験者を用いたシミュレーション実験、人間行動モデル等により過誤率の数値を得る試みがなされている。

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。

事故の事実関係については諸説あるが、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³⁾を主な参考資料として、タイタニック号事故発生に至る

までの概要を記述する。図-2 には位置関係も含めわかりやすく表示した。

タイタニック号は1912年4月10日予定より約1か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。1か月前の3月中旬に出航していれば、流水の量は少なく冰山との衝突事故の発生確率は少であったといわれている。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ることができたといわれている。

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さらに受けるが、速力を減速することなく高速(20.5ノット)で航行を続けた。

やがて午後11:40に冰山に衝突するが、冰山発見は衝突の約37秒前、距離にして約450mであった。この夜は月齢26.1の新月に近い暗闇であったことと、珍しいほどの無風で鏡のような海面で氷山の周囲に白波が全く立っていなかったことも発見が遅れた要因であった。さらに、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ように冰山をかすめて通り、そのためかえって船体の多数区画の損傷によって多量の浸水をもたらした沈没に至ってしまった。

冰山との衝突の後、速やかには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。しかし、タイタニック号から19海里的の距離にいたカリフォルニア号の無線は午前零時を過ぎたその時には切られていた。58海里的の距離にいたカルパチア号が救難無線を受信し救助に駆けつけた。午前零時44分には信号灯を打ち上げ、カリフォルニア号の乗組員がこの信号灯を視認したといわれているが、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。最初の救助船であるカルパチア号が到着したのは午前4時10分頃であった。

イベント・ツリーの作成

このタイタニック号事故では、事故に至る過程および事故後の対応においてさまざまな出来事に遭遇し、その対応、選択によっては結果が異なっていたことは十分に考えられる。つまり、それらの出来事のうち一つでも異



図-2 タイタニック号事故までの主要素

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が考えられる。

タイタニック号の建造、出航時からの事故に関係したであろう事項をヘディングとして取り上げイベント・ツリーを作成すると図-3 および図-4 のようになる。図-3 では、出航から衝突直前までの事象進展を示してある。右端に○印を付したシーケンスでは、衝突は発生しない。衝突が発生するその他の場合では、さらにその右側に図-4 に示すシーケンスが続く。衝突の形態やその後の救助状況により分岐する様子が示されている。

ここに取り上げた出来事の他にも、当然さまざまなことが起こっているが、ここでは事故発生に関係すると思われるもののみを取り上げてある。

イベント・ツリーの定量的解析

イベント・ツリーでは各ヘディング事象の発生の有無によりシーケンスが分岐していくが、この発生確率を求めることが、イベント・ツリー定量的解析の第一段階となっている。各事象について発生確率値を検討したが、主要なものを以下に記す。

- ① 完成の遅れ：当時このような大型船が種々の理由により1か月以上完成が遅れる確率は80%程度と考えた。
- ② 氷山の存在：米国沿岸警備隊による1960年から1998年までの北緯40～52度、西経39～57度内で発見された氷山のデータを入手し整理した結果、この海域での氷山の存在確率は3月34.19%、4月43.01%となった。4月の方が多少存在確率が大いだが、当初予想されていたより差は少ないことが判明した。
- ③ 出航の遅れ：出航が遅れた原因は、港湾内で他船舶と接触事故を起こしそうになったためである。当時の情報が入手し難いため、現在の事故をもとに1回の入出港において軽微事故に遭遇する確率を0.000624と推定した。

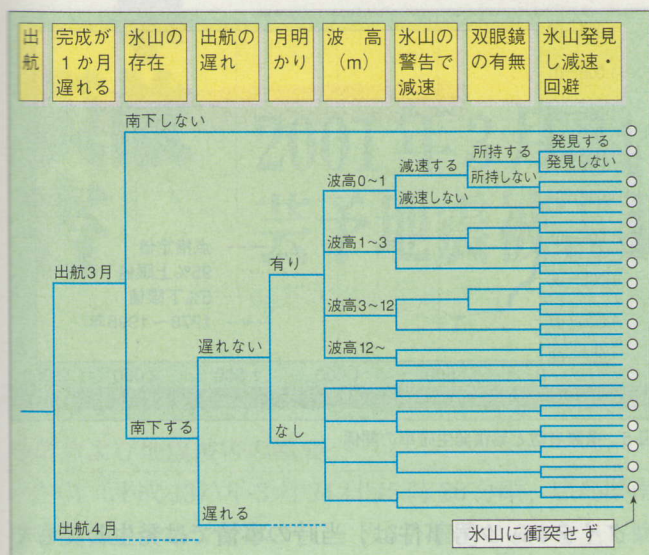


図-3 タイタニック号事故におけるイベント・ツリー (前半)

- ④ 月明かり：事故が起こった夜は新月に近い状態であった。月の運行から、午後11時～午前1時の間に月が水平線下に存在する割合を算出0.369を得た。
- ⑤ 波高：当研究所の船舶気象情報データベース⁷⁾をもとに当該海域の波浪状況を4段階に分類した。1. 波高が低すぎるため氷山の発見に役立たない (0～1 m, 事故当日の状況), 2. 氷山を発見するのに適当な波高 (1～3 m), 3. 波高が高く救命ボートへの移乗に困難を伴う場合 (3～12 m), 4. 航行自体に注意が必要な場合 (≥ 12 m), である。これらの波高に遭遇する確率はそれぞれ0.157, 0.253, 0.550, 0.041である。
- ⑥ 他船の警告による減速：タイタニック号は処女航海での大西洋横断の最短記録を目指していた事情もあったことを考慮し、警告を受け入れて減速する確率を0.2とした。これは、主として船長がどのように判断するかによって依存している特徴的な人的因子である。
- ⑦ 氷山の発見による減速・回避：遠方に氷山を発見した場合回避行動をとり氷山との衝突は避けられるとする。氷山を発見できる確率は、天候状態、月明かりの有無、航行速度、双眼鏡の有無を考慮して設定した。
- ⑧ 回避操作：回避操作の形態として、次の4つのパターンを考える。1. そのまま直進 (大破して間もなく沈没), 2. 減速し直進 (舳先の少破で沈没を免れる), 3. 減速し舵を切る (多数区画の破損で約2時間後に沈没), 4. 減速せず舵を切る (旋回性能が確保されているため衝突を免れる)。それぞれの対応をとる確率を、0.06, 0.12, 0.12, 0.70と設定した。
- ⑨ 他船の位置：カリフォルニア号とカルパチア号とも現実にはタイタニック号との間に流水群の存在しな

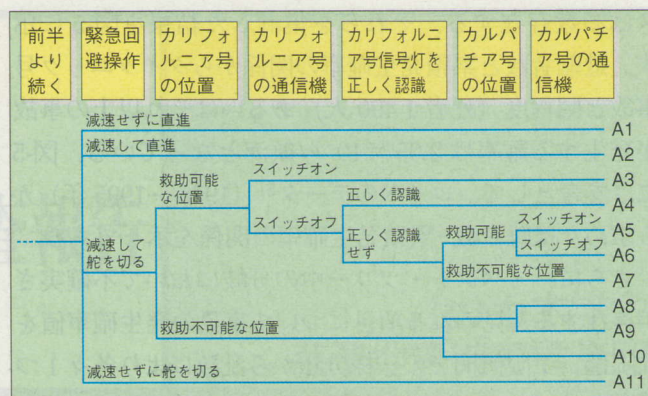


図-4 タイタニック号事故におけるイベント・ツリー (後半)

い位置関係にあり救助が可能であったが、運が悪い場合には流水群に遮られ救助に向かえない場合もあったはずである。タイタニック号からの距離は現実の値とし方位が均一に分布しているとする、両船とも0.5の確率で救助に向かえない位置にいた可能性があった。

- ⑩ 通信機のスイッチ：当時の通信係の勤務体系は午前零時までであった。それゆえ、午前零時以前においては0.9の確率でスイッチが入っており、午前零時以降では0.1の確率で入っているとした。

遭難者数の算定

図-4には衝突直前に氷山を発見した後のシーケンスが示されている。

シーケンスA1では急速に沈没するとし、救命ボートに乗り移る間もなく全員が死亡するとした。

シーケンスA2ではタイタニック号の船体設計から沈没に至るほどの区画が浸水することはないとして遭難者数0人とした。

シーケンスA11では衝突は免れ、遭難者数は0人。

残るシーケンスA3～A10は実際に発生した状況と同じで氷山をかすめる形で衝突することになる。A3～A10は救助条件が異なるため救助可能な人数も異なってくる。遭難者数は専門家(船長経験者)意見をもとにして設定した。

全シーケンス数は902シーケンスに達しており、その中で何らかの人的損失のあるシーケンス数は684シーケンスであった。

解析結果

イベント・ツリーの各分岐確率値が与えられると各シーケンスの発生頻度の値が得られる。発生したタイタニック号事故とまったく同一経過をたどるシーケンスの発生頻度は 1.00×10^{-8} /航海と得られた。しかし、異なった経過をたどっても結果的に多数の死者の出るシーケン

スは多数存在する。それらを集計した結果を図-5に示す。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（死者1490人）あるいはそれ以上の事故が発生する確率は 2.05×10^{-2} /航海となっている。図-5には参考として、ロイドのデータ⁸⁾（1978～1995年）から求めた遭難者数-累積発生確率の関係を示してある。

さらに、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。解析の結果を図-5中に各々の犠牲者数ごとに95%上限値、5%下限値を点線で示し、最大値、最小値の存在限界をグレーの範囲で示した。

事故に至るシーケンスの中でどの項目（イベント・ツリー中での分岐）が大きな影響をもっているかを評価するFussell-Vesely指標⁹⁾がある。これは着目している事象の発生確率を0.0と置いた場合の効果を示す。

FV値を調べた結果、当然のことながら、氷山の存在がこの事故の大きな要因となっていた。次に、氷山の存在する海域で事前に氷山に気がつかなかったこと、減速しながら舵を切ってしまったこと、さらに、他船の警告を無視して高速で航行を続けたこと、出航が4月になってしまったことが続く。

考察

本分析で求めた確率は、当時の一般の船舶の事故発生確率ではなく、あくまでタイタニック号という特定の船がその特有な環境下でどの程度の確率で事故に遭うかを求めたものである。その結果、同事故と同等以上の海難事故の発生確率は 2.05×10^{-2} 回/航海であった。これは、およそ49航海に1回という非常に大きな割合で同事故と同等以上の事故が起こることを示している。90%信頼度幅での値でみると、およそ29航海～109航海に1回という値である。

一方、現在の大型客船・フェリーに発生した事故統計データから遭難者数と累積発生確率を求めた結果は図-5中の左下隅、青色の線となっている。タイタニック号事故の解析結果と比較すると大きな隔たりが見られる。

20世紀初頭の船旅は想像以上にリスクを伴った旅であったといえるのではないかと。天気予報もなく、レーダーの無い状態で夜間に高速航行しており、しかも、万一の事故時の救難体制は貧弱であった。乗客数よりはるかに少ない救命ボートの数、イパーブ（船舶の沈没時に自動離脱・浮遊し、遭難警報を自動発信する装置）もなく、無線を受信する体制も整備されていなかった。

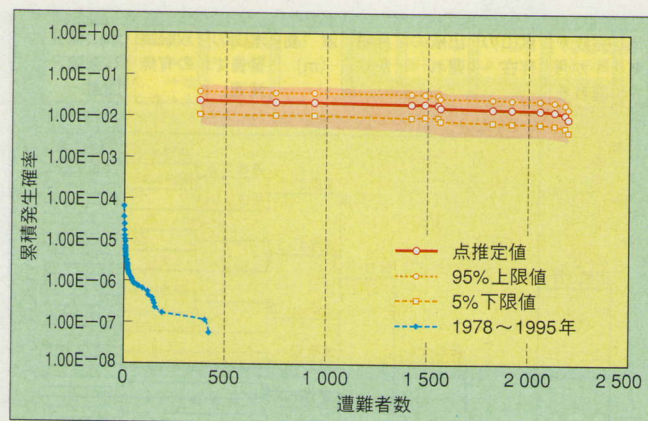


図-5 遭難者数と累積発生確率の関係

タイタニック号事件は、当時の事情では発生してもやむを得なかった事故といえるのであろう。この事故を教訓に航行方法も含め種々の安全対策がとられるようになり、その後の安全な航海が確保されタイタニック号に匹敵する事故の発生を防いできた。

通常、大事故の発生の際には無数の小事故が存在するといわれている。しかし図-5の遭難者数と累積発生確率の関係をみると、遭難者が出る事故は大事故になってしまっている。これはこの大型客船の置かれた状況を反映している。つまり小事故では、遭難者が発生することは稀であり、遭難者が出るような事故はほとんど大事故であることを示している。

本解析では、イベント・ツリーを用いた定量的評価法により、事故解析/事故究明にとって有力な情報が得られる例を示した。今後、このような定量的評価を基に安全確保に関する議論が各分野において一層深まることを期待する。

参考文献

- 1 近藤駿介・松岡猛 他：原子力発電所の確率論的安全評価，日本原子力学会誌，第28巻，第12号，pp.1096-1128，1986
- 2 U.S.Nuclear Regulatory Commission: An Assessment of Accident Risks in U.S.Commercial Nuclear Power Plants, Appendix I Accident definition and use of event tree, WASH-1400, NUREG-75/014, 1975
- 3 タイタニック号遭難事件事故報告書（海難審判庁訳）
- 4 U.S.Nuclear Regulatory Commission: An Assessment of Accident Risks in U.S.Commercial Nuclear Power Plants, Appendix II Fault tree methodology, WASH-1400, NUREG-75/014, 1975
- 5 Matsuoka, T. and Kobayashi, M.: GO-FLOW A New Reliability Analysis Methodology, Nuclear Science and Engineering, Vol.98, pp.64-78, 1988
- 6 Swain, A.D. and Guttman, H.E.: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, 1983
- 7 <http://www.srimot.go.jp/wavedb/wavedb.html>
- 8 LLOYD'S MARITIME INFORMATION SERVICES, 1978～1995 Casualty Data
- 9 確率論的安全評価（PSA）実施手順書に関する調査検討一レベル1PSA，内的事象一，原子力安全研究協会，1992.7