

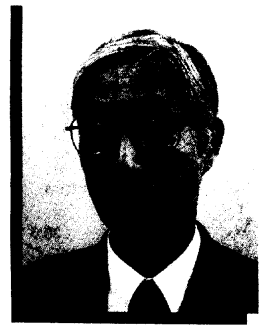


4 安全技術

海上交通の安全

独立行政法人海上技術安全研究所
海上安全研究領域長

松岡 猛



1. はじめに

水の浮力を利用して航行している船舶は重量物の大量輸送に適している。1隻で50万トンもの輸送が可能で、1トンキロあたりの燃料消費はわずか0.6gですむ。航空、陸上（自動車）、海上の貨物輸送量に要するエネルギーの比は、ほぼ100・10・1程度といわれている。そのため、移動・輸送手段としての船舶の役割は依然として重要であり、海上輸送は日本国内貨物輸送量のほぼ40%を占めている¹⁾。

このような輸送手段として重要な役割を担っている海上交通の安全の確保とは海難事故の発生をいかに防ぐかにかかっているといえる。海難事故というところの多くの人々が真先に思い浮かべるのは1912年に発生したタイタニック号の沈没事故であろう。そこで、タイタニック号事故を一例として取り上げ、事故の発生に到った経緯をたどることにより海上交通の安全確保に必要な要因についてのイメージを掴んでいただき、その後で、海上交通一般の安

全確保のために現在取られている種々の技術・方策について説明していく。

2. タイタニック号の沈没事故

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1490名というかつてない人命が失われた大事故が発生してしまった²⁾。

タイタニック号は構想から完成まで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月中旬は流水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一時遅れた。もし出来事の原因が全て一時間早まっていたならば、衝突後救難無線を發した時刻が夜中の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事は無かったと言われている。

当時無線技術は実用化されて間もない新しい技術であった。当時の無線技術は珍しく、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無線で他船から受信していたが、船長はそれほど深刻には受け止めていなかった。4月14日午後5時50分、進路をやや南に変更した。南に変針後、流水原があるという警告を更に受けるが、速力を減速することなく現在の船舶でも相当の高速である20.5ノットで航行を続けた。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。この夜は月齢26.1の新月に近い暗闇であった事と、珍しいほどの無風で鏡の様な水面で氷山の周囲に白波が全く立っていないことも発見が遅れた要因である。

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、浸水をもたらし沈没に至ってしまった。この損傷の発生は鋼の材質の問題があったとの指摘もある。タイタニック号の操縦性能の検証をシミュレーション解析³⁾により実施した例も見られる。氷山の回避行動の判断に対する批判として破損区画数を最小に抑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かという意見もある。氷山との衝突の後、速やかに救難無線を出さず午前零時14分になって初めて救難無線を發している。その時は午前零時過ぎとなり、19海里の距離に

いたカリフォルニア号は無線を切つてしまっていた。幸いにもやや遠方の58海里の距離にいたカルパチア号は救難無線を受信した。

午前零時44分信号灯を打ち上げ、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つた。沈没まで約2時間半の時間的余裕があつたが、救命艇は定員の約半数の1178名分しか備えられていなかった。

カルパチア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、沈没前に救助船が到着し接舷に成功していれば多数の人命が救われた事は明らかであろう。

以上がタイタニック号沈没事故の経緯であるが、この事故に到るシーケンスの各々の時点で“もし・・・・でなかったら”という他の可能性が多数存在する。この起こり得たシーケンスを全て列挙して定量的に評価するイベント・ツリー手法を用いた解析^③を実施してみた結果、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ではなく、あの様な状況ではある程度必然的に事故に至つたのであり、当時の海上交通の安全確保には不十分な面が多分にあつたことがわかつた。

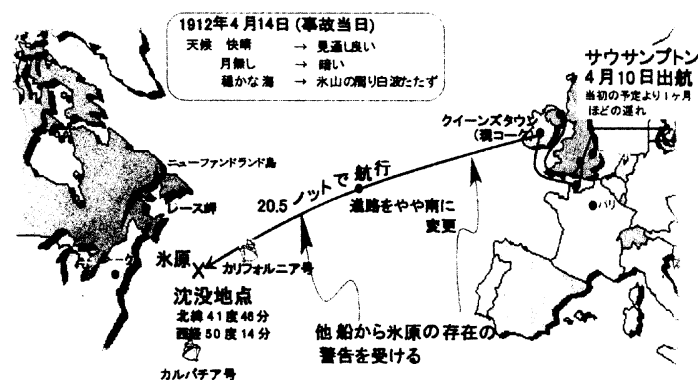


図1 タイタニック号事故発生の際の経緯

安全確保の面から見たタイタニック号事故の要因としては、無線技術の活用不十分、安全文化の未成熟（船長の判断）、隔壁区画設計の不完全さ（多数区画への浸水）、操縦性能、鋼の材質、救命設備の不十分さ（定員数に満たない救命艇の数）、救難体制・設備の未発達等があげられる。また、当時の科学技術レベルでは実現されていなかったものに、レーダー技術、気象予報、流水情報、航空機による探索、電子海図、GPS等がある。

現在の日本の海難事故数を種類別に見ると、衝突事故、座礁・乗り揚げ事故、機関損傷、転覆・沈没・浸水事故、

火災事故の順になっている。タイタニック号事故はその中の衝突事故に分類される。

3. 安全確保のための国際的な取り決め・組織

このタイタニック号事故を契機として、それまで各国がそれぞれの国内法により規定していた船舶の安全性確保について、国際的に取り決める気運が高まった。1914年、欧米主要海運国13カ国の出席のもとに国際会議が開催され採択された条約がSOLAS条約（The International Convention for the Safety of Life at Sea：海上における人命の安全のための国際条約）である。その後、技術革新・社会情勢等を考慮し6回の改正を受けて現行1974年のSOLAS条約となった。1974年SOLAS条約では改正手続きが簡素化されたこともあり28回の改正が行われながら現在に到っている。

SOLAS条約採択後、このような国際的な取り決めのための機関としてIMO（国際海事機関）が1948年に国際連合の機関として設立された。最初の仕事はSOLAS条約の改訂版作成であり1960年に完成した。本部はロンドンに置かれ、300人の職員がおり、世界166の国、地域が加盟している。技術の進歩に合わせて、海上の安全、能率的な船舶の運航、海洋汚染の防止に関し最も有効な措置の勧告等を行うことを目的として活動し

ている。

各種の安全対策は船舶の航行支援に関するもの、船舶の機能・性能に関するもの、万一の事故時の対策・避難・通信に関するものおよび安全管理システム等に関するものに大別できる。以下、それぞれについて安全確保のためにどの様な技術が活用され、方策が取られているかを見ていこう。

4. 航行支援による安全確保

陸上交通の車両は線路や車線幅で大きさが制限されるが、船は長さLが数メートルから数百メートルと範囲が広く、種類も高速船、ひき船、作業船等多様で速力の範囲も広く、プレジャーボートの増加も見られる。さらに、船舶が航行する海は交通の場であるとともに漁業の場でもあり、しかも立体交差ができないうえに、船長の権限が非常に大きいという伝統もあつて交通管理が難しい状況にある。

海峡や岬の沖合、港付近には船が集中して交通事故が多発するようになってきたため、道路のように幅と長さ、更に進行方向も定めた航路が指定されるようになってきた。公海では国際海事機関が、わが国の領海では海上保安庁が航路を指定している。公海における指定航路の幅は、船の位置決定精度に関係し1〜3海里と広い。海峡などには、船の交通特性のため1レーンについて3L程度の幅が望まれ、わが国では700m、アメリカでは900m

が標準となつている。港内で低速の場合1レーン1.6Lが必要でこれらの条件が満たされなるときは一方通行または交通の管 が必要となる。

海上六 には航空交通と同様に国際的であるが、航空交通管制に比べて合意が遅れている。現在、次の四種類の代表的な海上交通管制方式がある。(1)国際海事機関による通行分離方式航路の設定。(2)強制水先制度と組み合わせ、水先人を通じて船舶位置通報方式で港湾局が管理。(3)コーストガードが船舶位置通報方式で管理。(4)交通信号による管理。河川や運河、港内の航路。

浦賀水道、明石海峡、備讃瀬戸などの沿岸ふくそう水域には、海上交通安全法により11の航路が設定されている。航路幅は700m、大部分において12ノットの速力制限が課せられている。

海上交通の安全を確保するために以下の様なさまざまな設備・システムが活用されている。航路、航路標識(灯台、灯浮標、霧信号所等)、電波標識、海図、海流図、潮流図、電子海図、水路通報、船舶気象通報システム、海水予報等。

船舶の航行安全と運行性能の向上のために船舶に各種の支援をするシステムとして1948年にイギリス、リバプール港に世界で初めてレーダーを用いたVTS (Vessel Traffic Service) が設置されて以来、現在では各種各様、大小あわせて500を越えるVTSが

世界中で運用されている。VTSの種類としては、レーダー局、港内交通管制室、海上交通センター等が設備の規模に応じてある。港内官制では、出入港や移動の届けを受け取り、電光信号板等を用いた信号で航行を官制する。

VTSの最も総合的なシステムが海上交通センターで、わが国では、関門海峡、来島海峡、備讃瀬戸、大阪湾、名古屋、東京湾に整備されている。観音崎の東京湾海上交通センター(東京マーチス)ではわが国で最も過密な海上交通の管理を行っている。通過船舶からの航路通報及び変更通報を受理するとともに、通過船舶にはレーダー情報、気象情報、航路状況、操業漁船の情報、船舶の動静、航行警報、気象警報等を提供する。巨大船に対しては指示、大型船・特殊船に対しては勧告を行う。図2には東京マーチスの位置および東京湾外へ出て行く場合に定められている航路を示す。

一方、船舶側では自動衝突予防援助装置 (ARPA: Automatic Radar Plotting Aids) の設置が総トン数10,000トン以上の船舶に義務づけられている。このARPAは船舶用レーダーをセンサーとして相手船舶等を補足し、3分以内に移動の予測をベクトル又は図形によりレーダー画面上に表示し、なおかつ、距離、方位、接近地点における距離、接近地点に至る時間、針路を判断し、数字又は文字により表示することができる装置である。さら

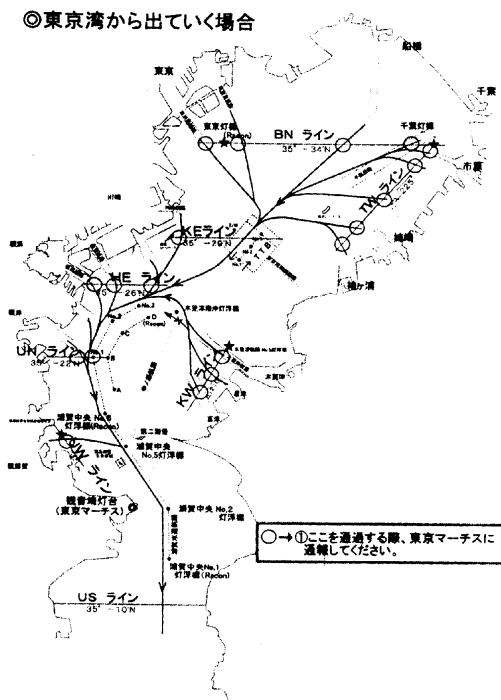


図2 東京マーチス及び東京湾からの出航時航路 (海難防止協会提供)

に、目標が一定距離に至った場合は警報を発し、船舶間の衝突を予防できる。

2002年7月には全ての旅客船及び300トン以上の貨物船に船舶自動

識別システム (AIS: Automatic Identification System) の搭載義務が課せられた。AISを各船舶に搭載する

事により船舶の識別符号(船名)、位置、進路、船速等のデータを自動的にVHFで送受信できるようにする。既存レーダーにはない特徴として、このシステムにより、航行船舶の船名、行き先、積み荷、大きさ、水路の屈曲部の背後・島の裏側にいる他船の存在がわかり、他船との見合い関係を予測し衝突回避などの航行の安全に役立てられる。図3にはレーダー画面上にAIS位置情報(△印)を表示した例を示す。画面中右側の数値情報はレーダー画面上で選択した船舶についてのAIS数値

情報である。この図ではARPAによる相手船のベクトルが○印の線(ベクトル)で表示されている。

さらに進んだシステムとして、電子海図とGPSを組み合わせたカーナビの船版が開発されている(三菱重工、海上技術安全研究所共同開発)。図4にその表示画面例を示す。自船の予定航路が細い実線で示されており、あらかじめ設定されたこの線に沿って自動航行を行うシステムとなっている。自船周囲の相手船はARPA機能により黒丸を起点とするベクトルで示され、衝突を自動的に回避する。また、電子海図情報をもとに座標も自動的に回避できる。画面例では実際の航路が黒点の連なりで示されており、危険回避のため予定航路より南側にずれて航行している。現在のところわが国内航船二十数隻にこの装置が装備されている。

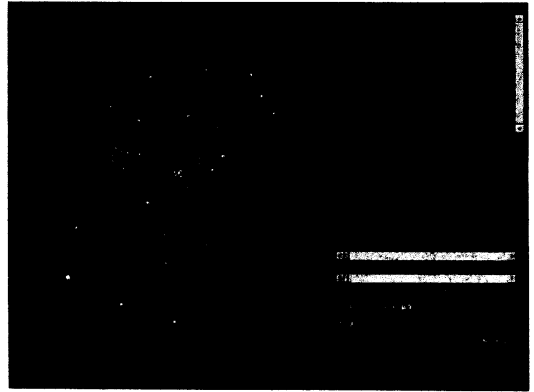


図3 AIS表示例（日本財団助成事業による日本造船研究協会（RR-S6部会）との共同研究成果）

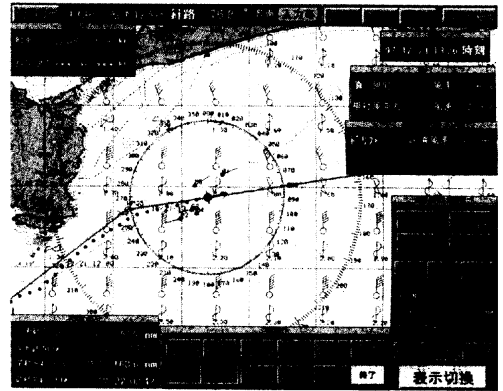


図4 内航船航海支援システムの画面表示例（三菱重工株式会社提供）

1992年より、300海里以内を航行する沿岸航行船舶に対して、気圧、風向、風速、波の高さ、航行警報等を自動印字により提供する地上系の海上安全情報システム（ナブテックスシステム）が運用されている。これには国際ナブテックス（英語：FIB電波、518kHz）と日本語ナブテックス（FIB電波、424kHz）があり、国際ナブテックスは、サービスエリア内であれば世界中でどこでも海上安全情報が受信できる。我が国では、5局のナブテックス海岸局から放送されている。

5. 船舶の機能・性能の向上による安全確保

水山と衝突したタイタニック号の例からもわかるように、船舶の航行の安

全を確保する観点で操縦性能は重要である。しかし現実には、経済性の観点から推進性能が優先され、経済性と安全性との兼ね合いで操縦性能が決められている。船舶の操縦性能に関する研究は1950年代半ばから急速に進展し数理解的な取り扱いがなされるようになった。1990年には操縦性の基準を定めるべしとの提案が日本からIMOへ出され1993年以降の暫定基準の期間を経て2003年には正式に操縦性基準が採択された。

船舶の航行環境は必ずしも平穏な場合だけではない。そのため想定される海象条件下で安全に運航できる性能が要求される。また、長期間使用している場合の材質の劣化をも考慮した安全性も検討もなされなければならない。船舶の航行時に横波、横風があつた

場合でも十分な復原性を有するような設計とする規則が40年以上前から決められているが、近年、豪華客船、新形式船の出現、コンテナ船の大型化により規則が合わなくなつて来ている。より現実的な規則を制定するための検討がIMOにて現在進められている。

また、1994年9月28日深夜のバルト海で、荒天の海を航行中のROR客船「エストニア」号が、突然船首から車両甲板に浸水して転覆し854人の人命が失われる大惨事が起こってしまった。原因としては、航行中に船首部の出入口扉が波浪により破損し、車両甲板に浸水した大量の海水により復原力を喪失し転覆したと言われている。この事故が契機となり現在では船体損傷時の復原性についても検討・研究が進められている。

1980年には英国の鉱石運搬船が沖繩沖で台風に遭遇し沈没するという事故が発生してしまった。原因としては船首部分に波が打ち込みハッチカバーが破損してしまったのではないかと考えられている。さらに極端な波浪により船底露出が発生し、露出した船底が水面に再突入し大きな衝撃荷重を受けるスラミングと呼ばれる現象もある。同じ1980年には野島崎沖で尾道丸がこのスラミングにより船首部を折損するという事故に遭遇している。そのため、海象としては20年間での最大波を想定した船首高さ、船体強度とした設計がなされている。

波浪により船倉内液体の自由表面が大きく揺れるスロッシング現象が発生しタンクを破損する危険もある。また、波浪周期との共振により船体が30度以上大きく傾斜してしまう現象も観測されている。これらを有効に防ぐ方策についても研究が実施されている。

また、タンカーの油流出事故を防ぐため二重船体構造（ダブルハル）とする規則がIMOで採択され、現在では中型・大型タンカーの新造船は全てダブルハル構造となっており、2015年以降はダブルハルでないタンカーは使用できなくなる予定となっている。

波浪荷重の予測精度を向上させる研究も進められているが、全ての波浪に耐える船体強度を設計することは不可能であるため、荒天時はその海域を回避するという対処方法を取っている。不運にも荒天海域に遭遇した場合に船体に働く異常な大荷重の推定、それに対する船体折損の有無を解析するプログラムが開発されている。また、波浪荷重が長期間にわたり繰り返し加わるのが船舶の宿命であり、そのため構造部材に疲労が発生する。船舶の初期損傷の大部分が疲労によるものであるが、その対策として、シミュレーションによる評価が行われ、適正な船体構造となるような設計を行っている。

船舶の後期損傷の大部分は腐食が原因と言われている。1997年に油流出を起こしたナホトカ号は腐食により板厚が磨耗して船体強度が著しく低下



図5 船舶へ打ちつける波浪

したところに波浪荷重が加わり船首部が破断・分離してしまった事故である。鋼材に硫黄分が含有されていると靱性が低下する傾向にあり、特に低温での強度が著しく低下してしまう。タイタニック号事故当時はこのような鋼の特性について何ら注意が払われていない、氷山と接触した際に多数区画に多くの穴が開いたのはこれが原因であるとも言われている。船体構造の溶接部の脆性破壊も過去においては問題となっていたが、破壊力学などを用いた評価法の発展とともに鋼材の破壊靱性を向上させることにより解決している。ただ、腐食疲労の現象が未だ正確には把握されておらず現在研究中の課題となっている。

6. 事故時の対策・避難・通信

船舶が海難事故に遭遇したときは、まず海難事故の発生を知らせる必要が

ある。海上保安庁では緊急通報電話として「118」番を導入し、船舶電話や携帯電話からの通報を入手する体制を整備している。

より遠方での海難位置を通報する装置として非常用位置指示無線標識 (EPIRB: Emergency Position Indicating Radio Beacon) が開発、運用されている。船舶が沈んだときには水深4m以上で水圧センサーが作動し自動浮遊し、遭難警報を自動発信する。その遭難警報は極軌道周回衛星で中継し、陸上において遭難位置 (5km内の精度)・船名を特定できる。遭難時に手動によりEPIRBをはずし救命いかだ等に持ち込み遭難信号を発信させることもできる。遭難信号は406.025MHzで衛星を経由し地上局に送信されると同時に、121.5MHzで航空機に向けての電波も発信される。衛星経由で信号が届くため世界中どこで遭難しても信号の受信が可能である。図6に本体から上方にアンテナが伸びたEPIRBが自動離脱装置に取り付けられた状態の写真を示す。

不幸にして海難が発生してしまった場合には事故原因を調査し、再発防止に役立てることは安全性向上にとり重要なことである。航空機におけるボイス・レコーダー、フライト・レコーダーに相当するものとして船舶においてはVDR (Voyage Data Recorder) が開発されている。VDRとは船舶の航行中に、航行に関する諸データと船

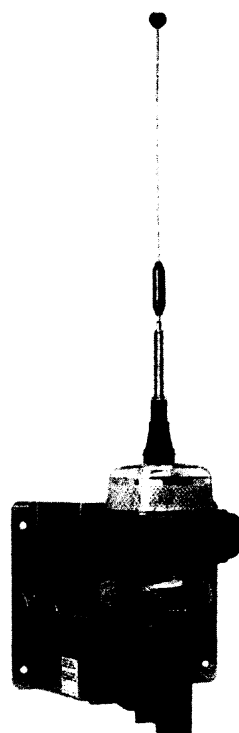


図6 EPIRBが自動離脱装置に取り付けられた状態 (写真日本無線株式会社提供)

船運航に関する指示応答の音声を蓄積し、海難が起きた後にカプセルを回収し、それらの記録を再生する目的のための記憶装置のことである。カプセルに要求される性能は、260℃10時間、1100℃1時間の耐加熱性と水深6000m相当の水圧に耐えることとされている。事故後の位置探査のため水中音響ビーコンは内部電池により30日間以上作動することとし、浮揚型カプセルの場合はさらに7日間以上の無線発信機作動が要求されている。SOLAS条約で2002年7月以降に建造する客船には装備義務が課せられている。

海難時、旅客船においては速やかに避難退船ができることが人命損失を最小限に抑えるために有効である。そのため、RORO客船は設計段階において避難解析を実施し安全が確保されていることを示すことが義務付けられている。旅客船においては船体放棄命令が出てから全員が海上まで脱出する総退船時間は30分以下と規定されている。

個人用の救命設備としては救命浮

環、救命胴衣がある。救命胴衣は全ての乗船者に備えることとされ、全旅客の10%以上の数の小児用救命胴衣も確保されている。特にわが国では、2003年6月から20トン未満の小型船舶に乗船する、12歳未満の小児、一人で漁労をする者、水上オートバイ乗船者に救命胴衣の常時着用が義務付けられている。

救命艇、救命筏、についてはタイタニック号事故の事例にも見られる様に十分な数が備えられていることが必要である。収容能力が総乗船者数の50%以上となるように救命艇 (12.5%までは救命筏でも良い) を各舷に積載し、合計で定員の125%用意することとなっており、そのほかに浸水時間、保守・点検、乗船装置、訓練等についても細かく規定されている。図7には救命艇の一例を示す。

従来から船舶の防火対策は、以下に示す8つの基本原則に基づき実施されてきている。①船体を防火構造でいくつかのゾーンに区分する。②居住区域を防火構造で他の区画から分離する。③可燃材料の使用を制限する。④火災



図7 救命艇 (写真石原造船所提供)

を発生したゾーン内で感知する。⑤火災を発生した区画内に閉じ込め消火する。⑥避難と消火活動のための経路を確保する。⑦消火設備をすぐに使用できるようにしておく。⑧貨物から発生する可燃ガスへの着火を防ぐ。しかし、1990年4月に旅客フェリー「スカンジナビアン・スター」号がオスローコペンハーゲン間で火災を引き起こし150名を超える死者を出してしまった。この事故の教訓の一つとして火災時に発生する煙を排出あるいは適切にコントロールすることが重要であることが認識され、煙排出に関してSOLAAS条約が改正された。現在、積極的な煙制御がIMOの議題として検討されている。

7. 安全管理システムおよび安全評価

1987年12月フリッピンのフェリーDona Paz号事故が発生し実に4386人の死者を出してしまった。こ

れは定員の2倍以上の人間を乗せていたということ、安全対策をきちんとやっていないための事故である。前章までに述べたような安全確保のための対策を種々規定しても、実際に守られていなければ何もならない事例である。

海難事故の原因は、概ね80%が「人的要件」によるものと言われ、海難事故防止のためには船舶の安全運航を確保する体制を構築することが最も重要であるということから、船舶だけでなく陸上の管理部門も含めた全社的な取り組みとしてのISM Code (International Safety Management Code) が1993年に制定された。安全確保のためには船舶の運航に携わる者の質の向上も重要な要素となるので、人と物の「品質管理」が必要となるとの考えのもと、ISO9002 (製造、据付及び付帯サービスにおける品質保証モデル) を船舶管理用に修正して制定したものと云える。ISO9002は任意取得の規格であるが、ISMは強制要件であるところが大きく異なっている。

適時、各国政府・機関により船舶の安全対策、安全設備の検査が実施されており、安全が確保される体制となっている。

海上交通においては、過去種々の事故が発生しそれらに対し安全対策の検討が行われてきて相当の蓄積となっている反面、「政治的・社会的影響の大

きな事故については過剰規制となっている。」「各種安全対策の効果や機能にオーバーラップが存在する。」という指摘もなされている。規制される側からすると不必要あるいはあまり意味のない規制が存在するという立場である。

事故要因・シナリオを体系的に整理し、確率論的方法を基盤として定量的リスク評価を実施しようという動きが船舶分野においても出てきた。1993年に英国がこの確率論的安全評価法に基づいた総合的安全評価(FSA: Formal Safety Assessment)の導入を提案し、以後IMOにおいて討議が重ねられ、2001年にFSA指針が採択された。この方法により、費用便益評価に基づく適正な安全対策(規制)の策定や、事故低減のための対策(RC O: リスクコントロールオプション)の評価が実施でき、効果的な安全性向上が望める。

8. まとめ

海上交通の安全確保のためには多様な側面から種々の対策が取られていることがわかり頂けたと思う。それにより、タイタニック号当時と比較して現在では比較にならない程の高い安全性が達成されている。わが国の国内航旅客船の個人リスクとしては概ね0.05/人・kmが達成されており、旅客船は最も安全な乗り物の一つとなっている。より高い安全を目指した高度なシステ

ムの開発が更に進められており、近い将来実用化される見込みのものに、①ウエザール・ティンクシステム・航路先方の嵐を避け最適なルートを選択する。②離着陸・港内操船支援システム・港の離着陸には高度な技術が要求される。これを容易に素早く行うための支援システム。③フリートサポートシステム・船舶のエンジン等の設備の診断・故障時の対応を陸上から支援するシステムがある。

参考文献

- (1) 運輸省：「平成10年度運輸経済年次報告」、平成10年11月
- (2) 江田治三：「アメリカ便り(2) タイタニックの氷山衝突回避は可能だったか?」、船と海のサイエンス、Vol.12、pp.56-60(2002)。
- (3) 松岡猛他：「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」、船舶技術研究所報告、第37巻、pp.77-141(2000)。

(著者略歴)

松岡猛(まつおかたけし) 1946年生まれ、出身：埼玉県
所属：独立行政法人海上技術安全研究所海上安全研究領域長
学歴等：1973年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。1979～1980年マサチューセッツ工科大学留学。1993年科学技術庁長官賞受賞(研究功績者表彰)。1998年運輸大臣表彰(特殊功績)。2000年船舶技術研究所システム技術部長を経て現在に在る。