ケミカルタンカーの転覆・沈没事故の事例解析と再発防止

黒田 貴子¹・庄司 邦昭²・田口 晴邦³・田村 兼吉¹

Analysis and Remarks for Prevention of Recurrence on the Capsizing and Sinking Accident of a Chemical Tanker

Takako KURODA, Kuniaki SHOJI,

Harukuni TAGUCHI and Kenkichi TAMURA

Abstract

The present paper describes an example analysis and recurrence prevention of capsizing and sinking accident of a chemical tanker which occurred off Niigata Sado Island in January, 2011. In this accident, heel angle of the chemical tanker running in quartering sea from port side became large, and finally the chemical tanker capsized and sank. Authors analyzed the situation of the chemical tanker during accident. The cause of this accident is sea water flooded to the ballast tank by the defect of the flood prevention function of the air pipe. Firstly, steady heel occurred because the shipping water stagnated on the upper deck and expansion trunk of the chemical tanker, and it was also flooded to the ballast tank due to the defect of the air pipe. A repetition of these phenomena increased the heel angle and caused capsizing and sinking. Based on this analysis result, Japan Transport Safety Board proposed to the minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism that the air pipe head must be serviced regularly.

Keywords : Accident analysis, Chemical Tanker, Capsizing, Sinking, Air pipe

キーワード: 事故解析, ケミカルタンカー, 転覆, 沈没, 空気管

1. 緒言

平成 24 年度までの過去 5 年間の海上保安統計年報救難統計の要救助海難種類別統計によると、毎年 1800 件以上の要救助海難に対して転覆によるものは約 100 隻前後であり、転覆事故の件数は毎年ほぼ同じである。このような事故を減らすには事故の解析と、解析結果に基づく再発防止の提言が不可欠である。

海上技術安全研究所では、運輸安全委員会より船舶事故原因の解析等の一部の委託を受けて事故解析を実施しており、解析結果は再発防止等に活かされ

ている。

本論文では、その海難事故の解析事例として、平成 23 年 1 月に新潟県佐渡島南西方沖で発生したケミカルタンカーの転覆・沈没事故⁽¹⁾を取り上げ、事故発生時の転覆に至る大傾斜を引き起こした状況を解析した結果と、結果に基づいて実施された再発防止について述べる。

2. 事故の概要と経過

解析した海難事故の概要と事故の経過について以下に述べる。

¹ 正会員 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6 丁目 38 番 1 号)

² 名誉会員 運輸安全委員会 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-2)

³ 非会員 海上技術安全研究所

2.1 事故の概要

ケミカルタンカーS号は船長ほか4名が乗り込み、酢酸ビニルモノマー約 1,000 t を積載し、大分県大分空港沖から石川県珠洲市（能登半島）禄剛埼沖を経て新潟県佐渡市（佐渡島）赤泊港に向けて東北東進中に転覆し、平成 23 年 1 月 9 日 9 時 22 分頃沈没した。乗組員の内、機関長が死亡し、船長が行方不明になった。

2.2 事故の経過

本事故が発生するまでの経過を以下に示す。また、事故の経過地点を図 1 に示す。

(1) 地点Ⅰ 1月9日 2時20分ごろ

波高約 2.5～3.0m の追い波と西方から風速約 20m/s の風を受けながら船速約 11.0kn で航行中、左舷側約 2deg. ～7deg. の範囲で横揺れを繰り返していた。

(2) 地点Ⅱ 1月9日 4時00分ごろ

左斜め後方約 40deg. から波高約 2.5m の波と西方から風速約 12m/s の風を受けながら船速約 9.8kn で航行中、右舷側に約 5deg. ～左舷側 20deg. の範囲で横揺れをしていた。また、左舷膨張トランク上が左斜め後方からの波に洗われ、左舷バラストタンクの空気の管の管頭金物（以後、空気管頭）が海水を被っていることを認めた。S号は平成 22 年 11 月の同航路の航海において、バラストタンクに海水が流入した事例があったことから、バラスト水の排水を試みたが、船尾楼甲板前方左舷側に設けられたポンプルームの出入り口ハッチが海水に没していたため、排水を断念した。さらに燃料サービスタンクに海水が浸水していることを認めた。

(3) 地点Ⅲ 1月9日 6時10分ごろ

船体が左舷側に約 25deg. 傾斜していることを海上保安庁に連絡し、救助を要請した。

(4) 地点Ⅳ

6時30分ごろに主機が停止し、7時5分ごろ左舷側への傾斜が約 50deg. 以上になり、まもなく転覆した。その後 9 時 22 分頃に沈没した。

図 1 事故の経過地点

3. 事故解析

S 号の事故発生時の復原力及び当時の海象条件下での船体運動と船体姿勢を推定し、転覆・沈没の可能性について検討した。

3.1 事故解析対象船

S 号の主要目を表 1 に、一般配置図を図 2 に、中央横断面図を図 3 に示す。S 号は貨物タンクの側面及び底面をバラストタンクで囲まれた二重船殻構造で、貨物タンクの上には膨張トランクを有している。膨張トランク及び上甲板上は強度部材によって水が滞留しやすい構造になっている。バラストタンクの空気管頭は上甲板上に、燃料サービスタンクの空気管頭は船尾楼甲板上にある。

表 1 S 号の主要目

総トン数	499 トン
全長	64.80m
型幅	10.00m
型深さ	4.50m

図 2 S 号の一般配置図

図3 S号の中央横断面図

3.2 事故発生時の気象・海象

事故発生時の対象海域での気象及び海象は、一般財団法人日本気象協会の日本沿岸局地波浪推算データベースを用いて推定した。推定日は2011年1月9日、時間と地点は①2時20分に禄剛埼を通過した地点、②4時00分にS号の傾斜が増大した地点、③4時00分と沈没する7時00分の間の5時30分の地点、④7時00分にS号が沈没した地点の各地点で時間を内挿して求めた。表2に推定した気象・海象の推定値を示す。事故発生時の波は西北西から波高2～3m、風速は西から12～13m/sである。

表2 事故発生時の気象・海象の推定値

番号	波高 (m)	波周期 (sec)	波向 (deg.)	風速 (m/s)	風向 (deg.)
①	2.22	5.3	288	13.0	268
②	2.66	7.2	293	12.8	274
③	2.79	7.4	293	12.8	279
④	2.95	7.3	285	12.3	285

3.3 事故発生当時の復原力

出港時の喫水、貨物の積載状況及び出港時の燃料油量から事故発生時の排水量を1751.55tと推定し、その時の復原力を計算した結果を図4に示す。図中、実線は自由水影響を考慮した場合、破線は自由水影響を無視した場合である。船舶復原性規則にある30deg.以上の横傾斜角において、0.2m以上の復原てこを有することとする規定に対し、横傾斜角30deg.の時の復原てこは0.19mとなり、0.01m下回ることが分かる。

図4 事故発生時の復原力曲線

3.4 風による横傾斜角

S号の風による横傾斜角を計算した。風圧面積は船長の為の復原性資料で用いられた船体の風圧面積に、甲板上の艀装品等の側面投影面積を加え、作用する風圧力は成分分離型モデルによる藤原の式⁽²⁾を用いて計算した。その結果、船舶安全法の規定で復原性計算に用いられる風速26m/sにおいて横傾斜角は約0.7deg.であった。よって風による横傾斜はほとんど発生しないということが分かる。

3.5 波浪中の船体運動

事故の経過によるとS号は徐々に左舷側への定傾斜を増しており、左舷に浸水していると推測される。S号は事故前の航海でバラストタンクに海水が浸水していたが、その後、空気管頭の整備等浸水対策が講じられていなかった。よって、今回の事故は浸水防止機能に不具合のある空気管頭から海水が浸水したと推測される。そこで、波浪中の船体の横揺れ及び相対水位を計算し、相対水位と空気管頭の位置関係からバラストタンクへの浸水及びデッキや膨脹トランク上の海水の滞留による船体の姿勢等を検討した。空気管は1つのバラストタンクに2つ設置されており、その2つの口径はそれぞれφ100mmとφ80mmである。船体運動計算はストリップ法の一つであるSalvesen-Tuck-Faltinsen法(STF法)⁽³⁾で行った。このSTF法は特異点分布法であることから左右非対称の船型を扱うことが可能である。横揺れ減衰力は速度影響を考慮した成分分離法⁽⁴⁾で推定した。

3.5.1 定傾斜し始めた時の船体運動

S号の出港時の状態で地点Iの海象下を航行した場合の船体運動の計算結果から相対水位変動を計算した。この時の船の固有周期は8.76sec.、船速は11kn、海象は斜め追い波35deg.、波高2.22m、波周

期 5.3sec.、出会い周期 12.07sec.である。波上側(左舷側)の相対水位の計算結果を図5に示す。図中、○は相対水位を、△は空気管頭の高さを示す。なお、S.S. 1.9にある空気管頭は燃料サービスタンクの空気管頭である。相対水位は上甲板及び膨張トランクを超え、バラストタンクの空気管頭まで到達していることが分かる。

図5 相対水位計算結果(地点Ⅰ、出港状態)

3.5.2 地点Ⅰでの船体運動

S号は地点Ⅰを航行時には左舷側に約4.5deg. 定傾斜していたと推定される。そこで、3.5.1で求めた相対水位の計算結果を基に、左舷側に4.5deg.の定傾斜した状態になるよう海水が滞留する上甲板上及び膨張トランク上の海水滞留量約24.8tと、没水する空気管頭からバラストタンクへの浸水量約15.0tを設定した。バラストタンクへの浸水量設定については次章で詳細に述べる。この状態で地点Ⅰを斜め追い波35deg.、船速11.0knで航行時の運動計算結果を図6に示す。計算結果は左舷4.5deg.を中心に左舷1.2deg.から左舷7.8deg.の横揺れとなり、事故の経過情報と一致する。この時の波上側(左舷側)の相対水位の計算結果を図7に示す。波は膨張トランク上及びバラストタンクの空気管頭まで到達していることが分かる。

図6 横揺れ計算結果(地点Ⅰ、定傾斜左4.5deg.)

図7 相対水位計算結果(地点Ⅰ、定傾斜左4.5deg.)

3.5.3 地点Ⅱでの船体運動

S号は地点Ⅱでは左舷側に定傾斜を増し、燃料サービスタンクの空気管頭まで波が到達していたと推測される。そこで左舷側に定傾斜4.5deg.の状態地点Ⅰを航行した場合の相対水位の計算結果(図7)を用いて、没水するデッキや膨張トランク上の滞留水及び空気管頭からバラストタンクへの海水流入を増加させながら地点Ⅱを航行時の船体運動と相対水位を計算し、船尾楼甲板にある燃料サービスタンクの空気管頭が没水する状態を求めた。海象は斜め追い波35deg.、波高2.66m、波周期7.2sec.、船速9.8knである。左舷上甲板及び膨張トランク上に約24.8tの海水が滞留し、左舷バラストタンクに約17.1tの海水が浸水していた場合、左舷側への定傾斜は5.8deg.、横揺れ運動は左24.1deg.から右舷12.5deg.の横揺れとなり、相対水位は燃料サービスタンクの空気管頭に到達した。図8に左舷側に定傾斜5.8deg.の状態での相対水位の計算結果を示す。

一方、左舷バラストタンクに海水が流入せず定傾斜がない状態で地点Ⅱを航行した場合の相対水位の計算結果を図9に示す。波はバラストタンクの空気

管頭まで到達しないことが分かる。よって、バラストタンクの空気管頭の浸水防止機能が正常であり、バラストタンクに浸水がなければ、この海域は安全に航行できたことになる。

図 8 相対水位計算結果（地点Ⅱ、定傾斜左 5.8°）

図 9 相対水位計算結果（地点Ⅱ、定傾斜無）

3.5.4 地点Ⅲ、Ⅳでの船の傾斜角

S 号は地点Ⅲでは左舷側への定傾斜が 25deg. になり、地点Ⅳでは 50deg. まで傾斜して転覆した。左舷側への定傾斜 5.8deg. の状態で地点Ⅱを航行した場合の相対水位の計算結果（図 8）を用いてバラストタンクへさらに浸水を想定し、転覆直前の定傾斜約 50deg. が発生しうる状態の復原性計算を行った。

左舷膨張トランク上及び左舷船尾楼甲板上に 31.5t の滞留水と、左舷バラストタンクに 52.1t の海水が浸水した場合の実質的な復原力曲線を図 10 中の実線で示す。この時、滞留水及び浸水による左舷側への傾斜は 16.5deg. であり、20deg. を超えると最大復原てこを超えてしまい転覆することになる。復原力がほとんどなくなる状態であったが、船尾楼甲板上の出入口が閉じられていたことから、船尾楼甲板にある甲板室の浮力を加えて計算した。計算

結果を図 10 中の破線で示す。左舷側への定傾斜が約 16.5deg. から 47.0deg. まで復原てこが 0.0m 付近で一定であり、この範囲のいずれかの傾斜になりえる状態にあることが分かる。傾斜角が 47.0deg. を超えると船は転覆する状態であり、事故時の状況と一致する。

図 10 定傾斜 16.5deg. の時の復原力曲線

3.5.5 沈没時の船の状態

S 号は転覆後浸水が進み、浮力を喪失して沈没したと考えられるため、浮力喪失時の浸水状態を検討した。S 号の復原力計算に考慮している容積分の排水量は約 2480t である。

両舷すべてのバラストタンクと清水タンクに浸水率 0.95、機関室、舵機室に浸水率 0.85 を乗じた浸水量約 750t を出港時の排水量 1751.55t と合わせると排水量の合計は約 2500t になり、浮力を上回って沈没に至る結果が得られた。

4. 空気管頭からの浸水の検証

今回の事故では浸水防止機能に不具合がある空気管頭からの海水の浸水が事故の発生につながったと推測される。そこで空気管頭没水時の浸水状況を検証するために実機を用いて実験を行った。

4.1 実験概要

使用した管頭金物は S 号に設置されていたディスクフロート式（径 100mm）と同型の実機である。図 11 に実験で使用した管頭金物の側面図を示す。没水時には管頭金物内のディスクフロートが浮上することによりバラストタンクへの海水の浸水を防ぐ構造である。実験装置は管頭金物下のフランジより塩ビのフランジで管を繋ぎ、径 200mm の塩ビ管（長さ

530mm) をタンクとして模擬したものを製作した。なお、この塩ビ管のタンク上部には水面上に延びた空気管を設けている。実験装置の外観を図 12 に示す。

実験では地点Ⅱで左舷側定傾斜 5.8 deg. での相対水位の計算結果 (図 8) にある船首から 3 番目の空気管頭と波面との関係を再現し、浸水量を計測した。この時の空気管頭と波との関係を図 13 に示す。管頭金物下のフランジ部より没水深度 1.02m、運動周期 4.2sec. の運動を、実験装置を上下運動させることで事故当時の状況を再現した。また、ディスクフロートは正常の場合と、ディスクフロートを固定し浸水防止機能が働かない場合の 2 状態、没水時の空気管頭の傾斜角は 0deg.、15deg.、30deg. (開口部を下向き) の 3 状態とした。実験は 2 回繰り返し、1 回あたりの浸水量はその平均値とした。

図 11 管頭金物側面図 (ディスクフロート式)

図 12 実験装置の外観

図 13 実験で再現した波と空気管頭の関係 (地点Ⅱ、定傾斜左 5.8deg.)

4.2 実験結果

実験結果を表 3 に示す。ディスクフロートが正常に機能する場合では浸水量は約 0.2～0.6ℓ 程度と少量であったが、ディスクフロートを固定した場合、浸水量は約 16～20 ℓ になることが分かる。

ここで、タンクの容量は十分に大きく、一回の浸水で内部の圧力は変化しないとすると、1 周期で空気管頭から入る浸水量 Q_0 を次式とする。

$$Q_0 = \int_{t_1}^{t_2} C \frac{D^2}{4} \sqrt{2g(h_w \sin \frac{2\pi t}{T_e} - h_a)} dt \quad (1)$$

ここで C は浸水量係数 0.6、 D は開口部の直径、 h_w は相対水位の最大値、 h_a は喫水から管頭部高さ、 T_e は出会い周期である。

(1) 式で実験状態を計算した場合、浸水量は約 16 ℓ となり、ディスクフロートを固定した場合の実験結果とほぼ一致することが分かる。

表 3 事故発生状態を想定した浸水実験結果

傾斜角 [deg.]	正常状態 [ℓ]	固定状態 [ℓ]
0	0.56	16.46
10	0.47	19.54
15	0.21	17.86

前章でのバラストタンクへの浸水量設定は、この (1) 式と S 号の相対水位の計算結果を用いて左舷側の没水する空気管頭から入る浸水量を 1 周期分で計算し、S 号の出会い波周期と航行時間から推定した波に出会う回数より管頭金物の浸水防止機能に不具

合がある場合に十分にあり得る浸水量を設定している。事故発生時にはS号のディスクフロートのいくつかは完全には機能していなかったことが推測される。

5. 再発防止

本事故の解析により、乾舷が小さく、膨張トランク上に波が打ち込む状態で航行する船舶は、上甲板及び膨張トランク上に波が打込み、海水が滞留して船体が傾斜し、上甲板上に設置された空気管頭の浸水防止機能が正常に働かない場合はバラストタンクに海水が浸水することがあることが分かった。今回の船舶事故を受けて、運輸安全委員会は同じディスクフロート式の空気管頭を設置した他の船舶に対して空気管頭内部の状態を調査した⁽¹⁾。その結果、ディスクフロートを覆う鋳物内部に厚い錆が生じ、その錆によりディスクフロートの動きが制限されて浸水防止機能が働かない空気管頭があった。そこで、再発防止策として空気管頭の整備を十分に行うよう平成24年6月29日に運輸安全委員会より国土交通大臣に対して意見が提出された。また、同日に国土交通省海事局より一般社団法人日本船主協会及び日本内航海運組合総連合会に対して上記意見を会員に周知するよう通知された。

6. 結言

本論文では転覆・沈没事故の解析事例として平成23年1月に転覆・沈没したケミカルタンカーについて事故発生時の復原性や船の浸水、傾斜状態及び船体運動を解析した結果を述べた。左斜め追い波中を航行中、左舷上甲板および膨張トランク上に海水が打込み、滞留状態が継続し、その滞留水が定傾斜を生み、さらに左舷バラストタンクの空気管の管頭金物の浸水防止機能の不具合により左舷バラストタンクへ海水が浸水して左舷側への定傾斜が大きくなり、この繰り返しが定傾斜を増大させ、転覆して沈没した状況を示した。また、解析結果より空気管頭の浸水防止機能の不具合が事故の要因であることから、再発防止策として空気管頭の整備を実施するよう周知された。この解析結果と再発防止策により、今後事故が軽減されることを期待したい。

謝辞

本研究で実施した空気管頭からの浸水実験を行うにあたり、海上技術安全研究所流体設計系沢田博史主任研究員（研究当時）及び流体性能評価系塚田吉昭主任研究員にご協力いただいた。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 運輸安全委員会：船舶事故調査報告書，MA2012-12，2012. 12.
- (2) 藤原敏文，上野道雄，池田良穂：成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法，日本船舶海洋工学会論文集第2号，pp. 243-255，2005. 12.
- (3) Nils Salvesen, E. O. Tuck and Odd Faltinsen : Ship Motions and Sea Loads, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 250-288, 1970.
- (4) 池田良穂：横揺れ減衰力，運動性能研究委員会第1回シンポジウム，日本造船学会，pp. 241-250，1984. 12.