

MA2012-9

船 舶 事 故 調 査 報 告 書

平成24年9月28日

## (東京事案)

- 1 ケミカルタンカー豊徳丸乗組員負傷
- 2 貨物船MEDEA 漁船孝盛丸衝突
- 3 ケミカルタンカー日祥丸乗組員死傷

## (地方事務所事案)

### 仙台事務所

- 4 漁船第七八興丸浸水
- 5 廃棄物排出船第五扇栄丸ケミカルタンカー第八十二東洋丸衝突

### 横浜事務所

- 6 モーターボートASK水上オートバイBlue Diamond衝突
- 7 漁船福昭丸衝突 (岸壁)
- 8 貨物船MASASHIMA MARU 乗組員負傷
- 9 モーターボートくまい丸乗組員死亡
- 10 水先船いらご8転覆

### 神戸事務所

- 11 プレジャーモーターボートまっちゃん水上オートバイDeep-S被引浮体  
搭乗者負傷
- 12 遊漁船蛭子丸プレジャーボート第3黒崎丸衝突
- 13 漁船蛭子丸モーターボートTWO RIVER衝突
- 14 プレジャーボート誠進丸乗揚
- 15 モーターボートDesperado同乗者負傷
- 16 水上オートバイヴィーナス ライフ乗揚
- 17 モーターボートホープ衝突 (導流堤)
- 18 引船丸友丸はしけ㊦812漁船漁吉丸衝突
- 19 水上オートバイSTONE同乗者負傷
- 20 漁船日進丸プレジャーボート岩田丸衝突
- 21 モーターボート釣キチ4号モーターボートD. A. S. 衝突
- 22 水上オートバイフェアレディー同乗者負傷
- 23 プレジャーボート和周丸乗組員死亡
- 24 遊漁船第三豊洋丸遊漁船豊裕丸衝突
- 25 コンテナ船あしや乗揚
- 26 水上オートバイリブ同乗者死亡
- 27 遊漁船海漁丸ミニボート (船名なし) 衝突
- 28 漁船和光丸プレジャーボート幸代丸衝突
- 29 モーターボート第二さる島丸漁船鳳丸衝突

- 30 遊漁船海遊人モーターボートゆーとぴあⅡ衝突
- 31 砂利採取運搬船第十住吉丸乗揚
- 32 貨物船 LIVADIA 衝突 (岸壁)
- 33 漁船秀丸乗組員死亡
- 34 モーターボート E R I N A のり養殖施設損傷

#### **広島事務所**

- 35 旅客船宮島火災
- 36 漁船第七十八興洋丸乗組員死亡
- 37 水上オートバイミルク号被引浮体搭乗者負傷
- 38 押船すびなー3バージすびなー3乗組員死亡
- 39 漁船義恵丸乗組員死亡
- 40 液体化学薬品ばら積船さいわい丸乗揚
- 41 プレジャーボート第一ふじ乗組員死亡
- 42 ケミカルタンカー CHISHU 漁船豊丸衝突
- 43 押船ふじ丸台船1205号沈没
- 44 ケミカルタンカー勇幸丸衝突 (灯浮標)
- 45 漁船宝春丸プレジャーボートしおかぜ丸衝突
- 46 液体化学薬品ばら積船第八長門丸漁船金比羅丸衝突

#### **門司事務所**

- 47 貨物船 VERDANT ISLAND 漁船第二十二全功丸衝突
- 48 漁船第十八新漁丸プレジャーボート多賀丸衝突
- 49 漁船勢作丸火災

#### **長崎事務所**

- 50 貨物船愛宕丸乗組員死亡
- 51 漁船五十六明澄乗揚
- 52 遊漁船咲希モーターボート亜希衝突
- 53 モーターボート第二太陽丸乗組員死亡

本報告書の調査は、本件船舶事故に関し、運輸安全委員会設置法に基づき、運輸安全委員会により、船舶事故及び事故に伴い発生した被害の原因を究明し、事故の防止及び被害の軽減に寄与することを目的として行われたものであり、事故の責任を問うために行われたものではない。

運輸安全委員会  
委員長 後藤 昇 弘

《参 考》

本報告書本文中に用いる分析の結果を表す用語の取扱いについて

本報告書の本文中「3 分 析」に用いる分析の結果を表す用語は、次のとおりとする。

- ① 断定できる場合  
・・・「認められる」
- ② 断定できないが、ほぼ間違いない場合  
・・・「推定される」
- ③ 可能性が高い場合  
・・・「考えられる」
- ④ 可能性がある場合  
・・・「可能性が考えられる」  
・・・「可能性があると考えられる」

### 3 ケミカルタンカー日祥丸乗組員死傷

# 船舶事故調査報告書

船種船名 ケミカルタンカー 日祥丸

船舶番号 137240

総トン数 499トン

事故種類 乗組員死傷

発生日時 平成23年6月28日 11時27分ごろ

発生場所 愛知県名古屋港北航路

名古屋市名古屋金城信号所東方沖所在の名古屋港北航路第3号  
灯浮標から真方位173° 250m付近

(概位 北緯35° 02.0' 東経136° 51.2')

平成24年9月6日

運輸安全委員会(海事部会)議決

委員長 後藤昇弘

委員 横山鐵男(部会長)

委員 庄司邦昭

委員 石川敏行

委員 根本美奈

## 要旨

### <概要>

ケミカルタンカー<sup>にっしょう</sup>日祥丸は、船長、機関長、一等航海士、一等機関士及び次席一等航海士が乗り組み、名古屋港内の荷主の岸壁において、水酸化ソーダを揚荷後、離岸して名古屋港北航路を航行中、平成23年6月28日11時27分ごろ、タンククリーニング作業に従事していた乗組員4人のうち一等航海士、一等機関士及び次席一等航海士が船首楼甲板右舷側で倒れ、機関長は船尾方で意識もうろうとなった。

一等航海士及び一等機関士は死亡し、次席一等航海士と機関長は負傷した。

## <原因>

本事故は、日祥丸が名古屋港を航行しながらタンククリーニング作業中、水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）の洗浄を終了し、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したため、水酸化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水が化学反応を起こして硫化水素ガスが発生した際、タンククリーニング作業に従事していた一等航海士、一等機関士及び次席一等航海士が、開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引し、また、機関長が、スロップタンクの排気管放出口及び開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引したことにより発生したものと考えられる。

日祥丸が2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したのは、松田汽船株式会社が、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったことから、日祥丸乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことによるものと考えられる。



# 1 船舶事故調査の経過

## 1.1 船舶事故の概要

ケミカルタンカー日祥丸<sup>にっしょう</sup>は、船長、機関長、一等航海士、一等機関士及び次席一等航海士が乗り組み、名古屋港内の荷主の岸壁において、水酸化ソーダを揚荷後、離岸して名古屋港北航路を航行中、平成23年6月28日11時27分ごろ、タンククリーニング作業に従事していた乗組員4人のうち一等航海士、一等機関士及び次席一等航海士が船首楼甲板右舷側で倒れ、機関長は船尾方で意識もうろうとなった。

一等航海士及び一等機関士は死亡し、次席一等航海士と機関長は負傷した。

## 1.2 船舶事故調査の概要

### 1.2.1 調査組織

運輸安全委員会は、平成23年6月28日、本事故の調査を担当する主管調査官ほか2人の船舶事故調査官を指名した。

### 1.2.2 調査の実施時期

平成23年6月29日、30日、7月1日、2日、6日、7日 現場調査及び口述聴取

平成23年7月8日、26日、27日、12月13日 口述聴取

平成23年8月8日、9月5日、10月17日、11月28日、平成24年6月4日 回答書受領

### 1.2.3 調査の委託

本事故に関し、一般社団法人日本海事検定協会理化学分析センターへ日祥丸のスロップタンク内の発生物質及び物質発生状況の解析を、独立行政法人海上技術安全研究所にスロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響についての解析をそれぞれ委託した。

### 1.2.4 情報提供

平成23年8月4日、その時点までの事実調査結果に基づき、国土交通省海事局に対して事実情報の提供を行った。

### 1.2.5 原因関係者からの意見聴取

原因関係者から意見聴取を行った。

## 2 事実情報

### 2.1 事故の経過

本事故が発生するまでの経過は、日祥丸（以下「本船」という。）の船長（以下「本件船長」という。）、機関長、次席一等航海士（以下「次席一航士」という。）及び名古屋市消防局特別消防隊員（以下「消防局隊員」という。）の口述並びに名古屋海上保安部（以下「名古屋保安部」という。）の情報によれば、次のとおりであった。

本船は、本件船長ほか4人が乗り組み、平成23年6月28日08時30分ごろ、名古屋港内の荷主の岸壁に着岸し、08時55分ごろから、2番貨物タンクに積載していた250m<sup>3</sup>の水酸化ソーダの揚荷作業を開始した。

本船は、揚荷を終了して11時10分ごろ荷主の岸壁を離岸し、積荷のために和歌山県和歌山下津港に向けて航行を開始した。

本件船長は、離岸操船に続いて1人で船橋当直に当たり、和歌山下津港で積載する貨物と残貨によるコンタミネーション<sup>\*1</sup>を防止する目的で2番貨物タンクのタンククリーニング作業を乗組員に行わせるため、主機駆動の貨物ポンプの回転数毎分（rpm）が270～280になるように主機関を微速力前進～半速力前進とした後、タンククリーニング作業の開始を一等航海士（以下「一航士」という。）に指示した。

機関長は、出港作業終了直後にボイラの蒸気出口の元弁を開放し、2番貨物タンク（右、左）に測深管を通じて蒸気を送入していた。

次席一航士は、揚荷で使用した工具類を片付け、タンククリーニング作業に備えて両舷バタワース洗浄機<sup>\*2</sup>を準備していた。

一航士は、膨張トランク<sup>\*3</sup>上でタンククリーニング作業の準備を行っていた機関長、次席一航士及び一等機関士（以下「一機士」という。）にタンククリーニング作業を開始することを伝えた。

本船は、11時17分ごろ、名古屋港北航路を南南西進中、一航士が、甲板倉庫内にある清水洗浄ポンプを運転し、2番貨物タンク（右、左）に設置された4基のバタワース洗浄機を使用してタンククリーニング作業を開始した。

膨張トランク上の乗組員は、11時22分ごろ、一航士が清水洗浄ポンプを停止し、2番貨物タンク（右、左）の洗浄が終了したので、2番貨物タンク（右、左）の‘タンク洗浄で発生した洗浄水’（以下「タンク洗浄水」という。）をスロップタンク（右、

---

\*1 「コンタミネーション」とは、前航海に積載した種類の違う液体貨物の残液などが、新たに積載した貨物に混じることをいう。

\*2 「バタワース洗浄機」とは、貨物タンク内に装備され、回転しながら高圧の水をタンク内にまんべんなく噴射して内壁を洗浄する装置をいう。

\*3 「膨張トランク」とは、温度上昇による貨物の膨張やガスの発生によるタンク圧力の上昇による危険を防ぐために貨物タンクの上部に設けられた空間をいう。

左) に移送する準備を行った。

機関長は、11時25分ごろ、2番貨物タンク(右、左)のタンク洗浄水をスロップタンク(右、左)に移送するため、貨物ポンプ室の上方にある船尾楼甲板右舷側に装備した操作盤で貨物ポンプを始動した。

本件船長は、一航士、一機士及び次席一航士が2番貨物タンク付近にいるのを確認した。

機関長は、貨物ポンプを始動した後、吐出圧力を調整するため、4番貨物タンク(左)上にあるバイパス弁操作ハンドルに向かって船尾楼甲板左舷側の階段を降りようとしたとき、排気管放出口から白っぽい物が「ポー」と噴いたのを見た。

本件船長は、11時26分ごろ、船橋から貨物ポンプが始動されるのを確認して間もなく排気管放出口から「パン」と液状のようなものが噴き上がるのを見た。

次席一航士は、一機士と共に2番貨物タンク(右)のサクシヨンバルブ操作ハンドル付近で、一航士は、2番貨物タンク(左)のサクシヨンバルブ操作ハンドル付近で、タンク洗浄水の移送のバルブ操作を行うためにそれぞれ待機していたとき、次席一航士は、貨物ポンプが運転されて間もなく、スロップタンクの排気管放出口から「ゴー」という音と共に白煙が噴出したのを見た。次席一航士は、ディーゼルエンジンから出る排気ガスのような白煙が噴出したのを見て気体なのか、液体なのかはすぐに判別できなかったが、作業服に液体が付いたようには感じなかったので、気体に近いのではないかと思った。

一航士、一機士及び次席一航士は、風上の船首楼甲板右舷側に避難する途中、一航士が左舷側スロップタンクのマンホールハッチの蓋を、避難した乗組員のうちの1人が右舷側スロップタンクのマンホールハッチの蓋をそれぞれ開放した。

機関長は、数秒間、排気管放出口から物質が噴出したのを見た後、ボイラの元弁を閉めなければならないと思い、船尾方に向かった時に意識がもうろうとなり食堂に座り込んだ。

本船は、11時27分ごろ、名古屋港北航路第3号灯浮標付近を針路約213°(真方位、以下同じ。)、約8ノット(kn)の速力(対地速力、以下同じ。)で航行中、一機士が船首楼甲板右舷側ボラード前に、次席一航士が船首楼甲板右舷側清水蛇口付近に、一航士が二人の間にそれぞれ座り込み、間もなく一機士が倒れた。本件船長は、一機士が倒れたのを見て一航士と次席一航士にマイクを使って「服を脱がせて水をかけろ」と指示した。

次席一航士は、近くにあったホースを取って一航士に渡したが、直後に一航士が倒れた。

本件船長は、一機士及び一航士が倒れた後、更に次席一航士が倒れたのを見て11時33分ごろ、本船の携帯電話で118番通報し、11時37分ごろ松田汽船株式会

社（以下「A社」という。）に連絡した。

本船は、12時05分ごろ、名古屋港高潮防波堤中央堤南方沖に投錨した。

本件船長は、投錨作業から戻り、食堂で座り込んでいた機関長に対し、次席一航士が右舷船首楼甲板上で苦しんでもがいていたので、服を脱がせて水をかけるよう指示した。

機関長は、意識が回復してきたので本件船長の指示に従い、船首楼甲板に向かった。

機関長は、一航士と一機士に最初に水をかけたが全く反応がなかった。機関長は、次席一航士が少し動いていたので、船首楼甲板から下に落ちないように抱き抱えるようにし、清水で口の中や体を洗い続けた。

名古屋保安部職員は、12時35分ごろ、本船に乗り込み、12時45分～12時55分の間に倒れていた3人を巡視艇に移し、搬送を開始した。

消防局隊員は、海上で巡視艇と合流し、名古屋保安部職員と合同で負傷者に救命措置を施しながら、名古屋港ガーデン埠頭まで搬送した。負傷者は、待機していた救急車で名古屋市内の病院に搬送された。

本事故の発生日時は、平成23年6月28日11時27分ごろで、発生場所は、名古屋港北航路第3号灯浮標から173°250m付近であった。

（付図2 事故発生場所 参照）

## 2.2 人の死亡及び負傷に関する情報

機関長、次席一航士及び病院の担当医師の口述並びに名古屋保安部の情報、死体検案書及び診断書によれば、次のとおりであった。

一航士と一機士は、心肺停止状態で本船から救助され、心肺蘇生を実施しながら病院に搬送されたが死亡が確認された。死因は、硫化水素中毒であった。次席一航士は、歩行が困難な状態で本船から救助され、病院に搬送されて硫化水素中毒と診断され、8日間の入院加療を要した。

機関長は、本事故発生当日、病院に行き、硫化水素中毒及び化学性肺炎と診断され、7日間の入院加療を要した。

## 2.3 船舶の損傷に関する情報

船体に損傷はなかった。

## 2.4 乗組員に関する情報

- (1) 性別、年齢、海技免状等  
本件船長 男性 60歳

四級海技士（航海）

免 許 年 月 日 昭和59年2月10日

免 状 交 付 年 月 日 平成20年5月9日

免状有効期間満了日 平成26年2月9日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成28年10月13日

本件船長と交代した船長（以下「専任船長」という。） 男性 57歳

三級海技士（航海）

免 許 年 月 日 昭和56年11月24日

免 状 交 付 年 月 日 平成20年5月27日

免状有効期間満了日 平成25年10月20日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成28年9月29日

一航士 男性 64歳

四級海技士（航海）

免 許 年 月 日 昭和56年10月7日

免 状 交 付 年 月 日 平成21年1月29日

免状有効期間満了日 平成26年9月7日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成26年6月26日

次席一航士 男性 42歳

五級海技士（航海）

免 許 年 月 日 平成3年8月8日

免 状 交 付 年 月 日 平成19年2月21日

免状有効期間満了日 平成24年7月22日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成25年8月11日

機関長 男性 62歳

四級海技士（機関）

免 許 年 月 日 昭和51年10月22日

免 状 交 付 年 月 日 平成20年12月9日

免状有効期間満了日 平成26年7月19日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成27年8月29日

一機士 男性 62歳

五級海技士（機関）

免 許 年 月 日 昭和50年3月14日

免 状 交 付 年 月 日 平成20年2月5日

免状有効期間満了日 平成25年9月15日

甲種危険物等取扱責任者（石油、液体化学薬品）

証印有効期限 平成24年4月1日

(2) 配乗状況

本件船長及び専任船長の口述並びに有限会社宝海運（以下「B社」という。）の責任者の回答書によれば、次のとおりであった。

本船の運航は、5人の専任船員がそれぞれ約3か月乗船し、約25日間休暇を取る形態であった。専任船員が休暇の間、交代船員が乗船していた。本件船長は、交代船員の船長であり、一航士は専任船員であった。

(3) 主な乗船履歴等

本件船長

本件船長の口述によれば、次のとおりであった。

本件船長は、乗船経歴が約40年あり、その大半の期間はケミカルタンカーに乗船していた。本船には平成22年11月から交代船長として3回の乗船経験があり、本事故発生時の乗船は平成23年6月22日からであった。

一航士

B社の回答書によれば、一航士は、平成15年12月B社に入社し、一等航海士、次席一等航海士として本船に乗船していた。今回は、平成23年4月8日から乗船していた。

一機士

B社の回答書によれば、一機士は、平成23年5月B社に入社し、同年5月28日から一等機関士として本船に乗船していた。

専任船長

専任船長の口述によれば、専任船長は、約37年の乗船経験があり、そのうちの約20年間はケミカルタンカーに乗船していた。本船には平成15年11月から専任船長として乗船し、本事故直前は、平成23年3月22日～6月22日まで乗船していた。

2.5 船舶に関する情報

2.5.1 船舶の主要目

船 舶 番 号 137240

船 籍 港 大阪府大阪市

船舶所有者	A社、マツダマリン株式会社（以下「C社」という。）
運航者	A社
総トン数	499トン
L×B×D	64.95m×10.00m×4.50m
船質	鋼
機関	ディーゼル機関1基
出力	1,029kW
推進器	固定ピッチプロペラ1個
進水年月	平成15年10月

## 2.5.2 積載等の状況

### (1) 本航海

- ① 本件船長及び機関長の口述によれば、本船は、本事故当日、名古屋港内の荷主の岸壁で2番貨物タンク（右、左）に積載していた水酸化ソーダを全量揚荷後、船首喫水約1.20m、船尾喫水約3.20mの空船で離岸し、2番貨物タンク（右、左）に蒸気を入れながら清水を約5m<sup>3</sup>使用してタンク洗浄を行い、発生した水酸化ソーダ洗浄水<sup>\*4</sup>を2番貨物タンク（右、左）に残していた。
- ② A社担当者、本件船長及び機関長の口述によれば、2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニングの際、通常使用する蒸気量は約1m<sup>3</sup>（凝固水換算）であり、スロップタンクへの移送配管中に残る水酸化ソーダの量は約0.1m<sup>3</sup>であった。
- ③ 設備の操作手引書によれば、2番貨物タンク（右、左）のストリップング残量<sup>\*5</sup>は、合計約0.102m<sup>3</sup>であった。

### (2) 前航海

- ① 本件船長及び機関長の口述によれば、本船は、平成23年6月25日、三重県四日市市四日市港にある荷主の岸壁でアクリル酸を全量揚荷後、2番貨物タンク（右、左）及び4番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を行い、作業で発生したアクリル酸洗浄水<sup>\*6</sup>約4.9m<sup>3</sup>をスロップタンク（右、左）に貯留していた。

<sup>\*4</sup> 「水酸化ソーダ洗浄水」とは、揚荷後にタンク内に残った水酸化ソーダを清水で洗浄した混合水をいう。

<sup>\*5</sup> 「ストリップング残量」とは、揚荷の際、タンクをさらえた後に残る貨物の量をいう。

<sup>\*6</sup> 「アクリル酸洗浄水」とは、揚荷後にタンク内に残ったアクリル酸を清水で洗浄した混合水をいう。

- ② 設備の操作手引書によれば、2番貨物タンク（右、左）及び4番貨物タンク（右、左）のストリップング残量は、合計約0.205m<sup>3</sup>であった。
- (3) 本事故後のスロップタンク及び2番貨物タンクの状況  
本件船長及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。
- ① スロップタンク（右、左）には、アクリル酸洗浄水及び水硫化ソーダ洗浄水が入っており、その量は、合計約6m<sup>3</sup>であった。
- ② 2番貨物タンク（右、左）には、水硫化ソーダ洗浄水が合計約5m<sup>3</sup>入っていた。
- ③ スロップタンク（中）には、清水が約14.8m<sup>3</sup>残っていた。
- ④ 平成23年7月5日10時00分頃のスロップタンクのタンク洗浄水の温度は、29℃であった。
- (4) 過去のタンク洗浄水の混留状況等  
本件船長及び専任船長の口述並びにタンク洗浄記録簿によれば、次のとおりであった。
- ① アクリル酸洗浄水と水硫化ソーダ洗浄水
- a 本船は、平成22年12月12日、名古屋港外において、1～4番貨物タンクに貯留していたアクリル酸洗浄水約14m<sup>3</sup>をスロップタンク（右、左）に移送した。
- b 本船が、12月15日11時25分ごろ、スロップタンク（右、左）にアクリル酸洗浄水を積載したまま伊勢湾を針路約180°、約12knの速力で航行中、2番貨物タンク（右、左）の洗浄作業で発生した水硫化ソーダ洗浄水約11m<sup>3</sup>をスロップタンク（右、左）に移送してスロップタンク内は、混留状態となった。
- ② ①以外のタンク洗浄水  
本船においては、異なる2種類以上のタンク洗浄水をスロップタンク（右、左）に混留していた。

### 2.5.3 船体構造に関する情報

本件船長及び機関長の口述並びに本船の一般配置図によれば、次のとおりであった。

上甲板下は、船首側から、船首水タンク、1番清水タンク、スロップタンク、1～4番貨物タンク、空所、貨物ポンプ室、1番燃料油タンク、機関室及び船尾水タンクなどに区画され、スロップタンクから4番貨物タンクの二重底部及び両側部に1～3番清水タンク、1～5番バラスト水タンクが区画されていた。

上甲板上には、船首楼及び船尾楼が設けられ、船首楼は甲板長倉庫及び甲板倉庫



を配し、また、船尾楼には船尾から船首方にかけて順に、舵機室、上部機関室などが、その上方の甲板室には居住区が、更にその上方には航海船橋がそれぞれ設けられていた。

(写真1 本船 参照)

#### 2.5.4 スロップタンク及び貨物タンク並びに上甲板設備の情報

本件船長及び機関長の口述並びに本船の容積図によれば、次のとおりであった。

##### (1) スロップタンク

本船のスロップタンクは、船首楼後方にあり、縦隔壁で3個に分割され、それぞれスロップタンク（右）、（中央）、（左）と呼ばれていた。

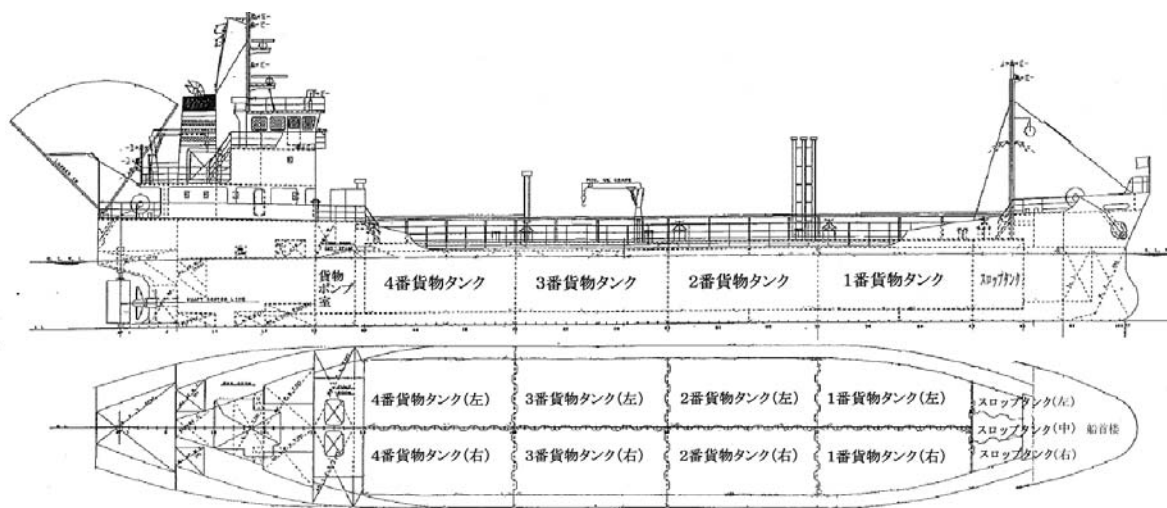
スロップタンクの容積は、スロップタンク（右）、（左）が同一の約15.3 m<sup>3</sup>、中央が約18.2 m<sup>3</sup>であり、合計約48.8 m<sup>3</sup>であった。

##### (2) 貨物タンク

本船の貨物タンクは、船首尾方向に縦通隔壁で左右2列に仕切られ、また、船首尾方向に横隔壁で4列に仕切られ合計8個に分割され、船首側から順に1～4の番号が付され、それぞれ、○番貨物タンク（右）、（左）と呼ばれていた。

各貨物タンクの容積は、次のとおりであった。

貨物タンク名	容積 (m <sup>3</sup> )
1 番貨物タンク (左)	約 1 3 3 . 7
1 番貨物タンク (右)	約 1 3 3 . 6
2 番貨物タンク (左)	約 1 6 1 . 3
2 番貨物タンク (右)	約 1 6 1 . 0
3 番貨物タンク (左)	約 1 6 1 . 5
3 番貨物タンク (右)	約 1 6 1 . 4
4 番貨物タンク (左)	約 1 5 8 . 7
4 番貨物タンク (右)	約 1 5 8 . 8



(図 2.5-1 貨物タンク等配置)

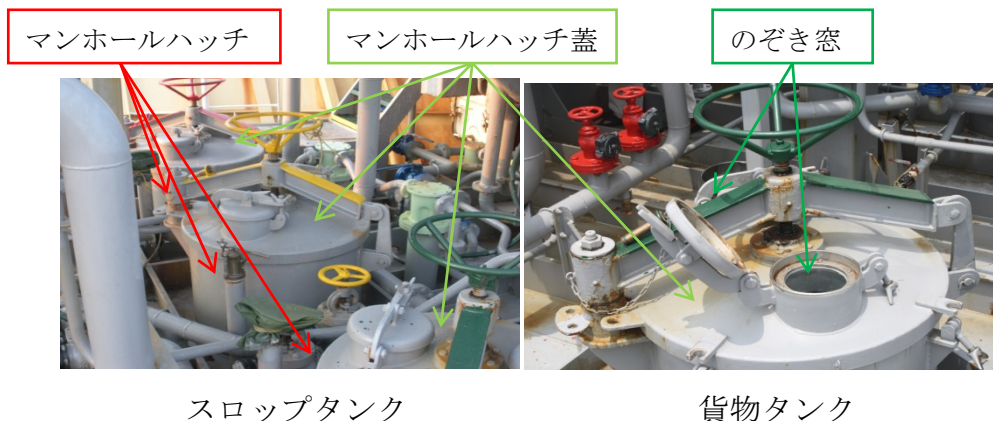
(3) 上甲板上の設備

① マンホールハッチ

各スロップタンク及び各貨物タンクには、それぞれ船尾側にマンホールハッチが1個設けられ、そのマンホールハッチの内側には、ハッチから底部に至る垂直はしごが設置されていた。

マンホールハッチの直径は、スロップタンクが約72cm、貨物タンクが約75cm、膨張トランクからマンホールハッチ口の高さは、スロップタンクが約59cm、貨物タンクが約62cmであった。

マンホールハッチの蓋は、直径約15cmのガラスがはめ込まれたのぞき窓が2個設けられ、タンク内の貨物液面などを監視できるようになっていた。

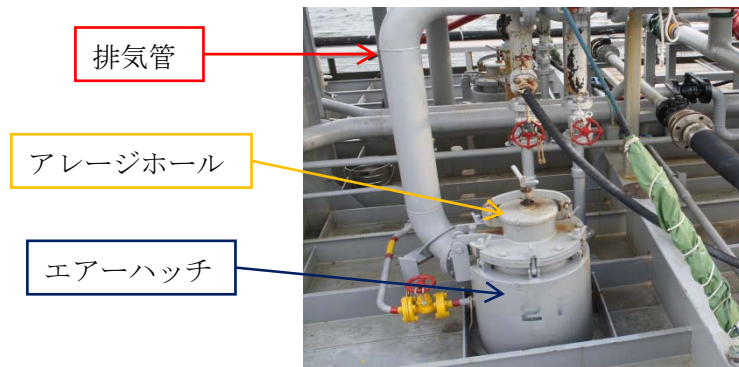


(写真 2.5-1 スロップタンク及び貨物タンクのマンホールハッチ)

② エアーハッチ

各貨物タンクには、船首側にエアーハッチが1個設けられ、同ハッチ蓋

には、アレージホール\*7が設置され、エアーハッチ側面には排気管\*8が接続されていた。

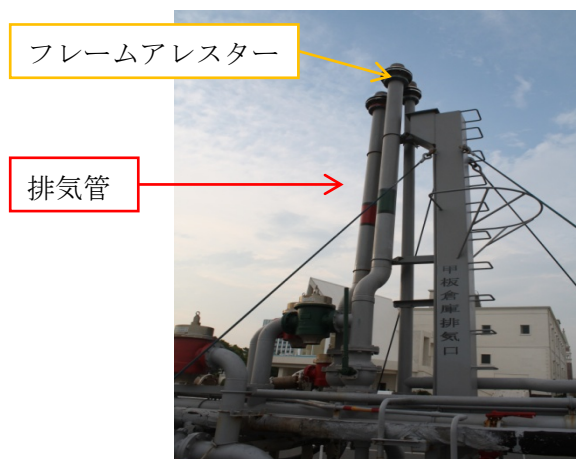


(写真 2.5-2 エアーハッチ)

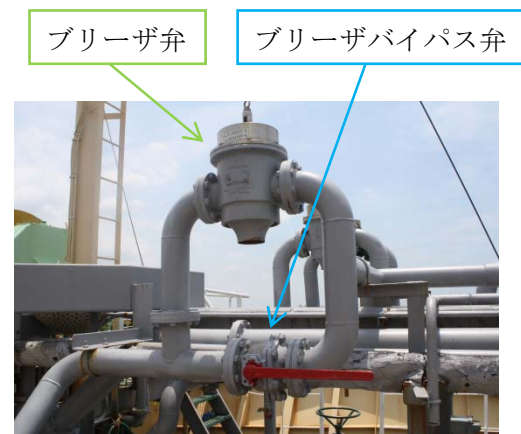
### ③ 排気管

排気管は、スロップタンク（右、中央、左）及び貨物タンク（右、左）に設置され、各スロップタンクのマンホールハッチから延びている管を1本に、1番及び3番の貨物タンク（右、左）のエアーハッチから延びている管を1本に、2番及び4番の貨物タンク（右、左）のエアーハッチから延びている管を1本にそれぞれ集合されており、その先端は、2番貨物タンク前端中央付近の膨張トランク上約6.5mの位置にあった。

排気管には、ブリーザ弁\*9、ブリーザバイパス弁が取り付けられ、先端には放出口としてフレイムアレスター\*10が取り付けられていた。



(写真 2.5-3 排気管等)



(写真 2.5-4 ブリーザバイパス弁等)

\*7 「アレージホール」とは、液体貨物の積載量を計測するため、貨物タンク内の貨物液面上の余積部分の高さを測定するための開口をいう。

\*8 「排気管」とは、タンク内の圧力が高くなった際、大気にガスを放出するなど、タンク内の過圧又は負圧を緩和する目的で設置された管をいう。

\*9 「ブリーザ弁」とは、タンク内の過大な圧力や負圧を自動的に防止するため、排気管に使用される装置をいう。

\*10 「フレイムアレスター」とは、密閉区間内に火炎の侵入を防ぐため、排気管に使用される装置をいう。

#### ④ バタワース洗浄機

各貨物タンクのタンククリーニング作業に使用するバタワース洗浄機は、マンホールハッチとエアーハッチの間のタンクトップから吊り下げて各貨物タンクに2台ずつ設置されていた。

#### ⑤ バイパス弁操作ハンドル

4番貨物タンク（左）のマンホールハッチの船首側には、2番及び4番貨物油バイパス管のバイパス弁操作ハンドルがあり、同ハンドルを操作して揚荷やタンク洗浄水をスロップタンクへ移送する際の流量調整を行っていた。

バイパス弁操作ハンドル



(写真 2.5-5 バイパス弁操作ハンドル)

#### ⑥ 液面指示装置

各タンクには、電気式液面指示装置が設置され、操舵室及び膨張トランクのデジタル表示でタンク内の液面高さ、圧力、温度などの監視が可能であった。

本事故発生当時使用した貨物装置には、不具合及び故障はなかった。

### 2.5.5 本事故発生後の本船の状況

- (1) 本件船長の口述によれば、本船は、スロップタンクのマンホールハッチの蓋が開いており、マンホールの周りは黒くなっていた。
- (2) 消防局隊員の口述によれば、次のとおりであった。

消防艇金竜は、消防局隊員を乗せ、本船の洗浄活動に従事するため、28日15時07分出動し、15時27分に本事故発生場所付近に到着した。

消防局隊員は、本船に接舷していた巡視艇ひだかぜの名古屋保安部職員と協議し、15時37分から消防艇金竜の消防ホースを使用して本船の船首から船尾方約10mの範囲に約5分間、2回放水した。

その後、消防局隊員4人と名古屋保安部職員3人は、硫化水素ガス濃度を測定しながら15時41分に本船に乗船した。

消防局隊員及び名古屋保安部職員は、マンホールハッチの蓋を閉めるため、ガス濃度を測定しながら船首方に向かって進んだ。ガス濃度は、スロップタ

ンク（左）マンホールハッチの船尾方3 m付近で約14 ppm、スロップタンク（左）マンホールハッチ下部膨張トランク上1～2 cmの所で約60 ppm、スロップタンク（左）マンホールハッチ蓋ハンドルの根元で100 ppm以上であった。スロップタンクのマンホールハッチは、右、中央、左の3か所共に開いた状態であり、左は、閉鎖状態から約3 cm浮き上がっていた。

（写真1 本船、写真2 船橋から見た膨張トランク上 参照）

## 2.6 気象及び海象に関する情報

### 2.6.1 観測値

- (1) 本事故発生場所の南西方約4.9 kmに位置する名古屋港高潮防波堤東信号所の平成23年6月28日11時30分の風向及び風速の観測値は、風向南西、風速3.9 m/sであった。
- (2) 東海市の荷主の担当者によれば、平成23年6月28日11時45分の本事故発生場所の北東方約3.6 kmに位置する工場内の風向及び風速の観測値は、風向南西、風速5.0 m/sであった。
- (3) 本事故発生場所の東方約5.0 kmに位置する東海地域気象観測所の観測値は、次のとおりであった。  
11時30分 風向 東南東、風速 1.0 m/s、気温 32.5℃
- (4) 本事故発生場所の西方約14.0 kmに位置する桑名地域気象観測所の観測値は、次のとおりであった。  
11時30分 風向 南、風速 3.1 m/s、気温 31.5℃
- (5) 国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）によれば、伊勢湾における平成23年6月28日の有義波<sup>\*11</sup>は、次のとおりであった。  
11時20分 有義波（波高0.29 m 波周期4.8秒）  
11時40分 有義波（波高0.29 m 波周期4.8秒）
- (6) 本事故時と同様にアクリル酸洗浄水を貯留していたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送した平成22年12月15日の本船の南方8.2 kmに位置する中部航空地方気象台の観測値は、次のとおりであった。  
11時20分 風向 西、風速 12.9 m/s、気温 9.5℃  
11時30分 風向 西、風速 12.7 m/s、気温 9.4℃

---

\*11 「有義波」とは、ある地点で連続する波を観測したとき、波高の高い方から順に全体の1/3の個数の波を選び、これらの波高及び周期を平均したものをいう。

## 2.6.2 乗組員の観測

本件船長及び専任船長の口述並びに航海日誌によれば、次のとおりであった。

- (1) 本事故発生時の天気、風向、風力及び波高は、天気晴れ、風向南西、風力2（風速約1.6～3.3m/s）、波高0.5m未満であった。
- (2) 本事故時と同様にアクリル酸洗浄水を貯留していたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送した平成22年12月15日12時00分の風向、風力は、風向北西、風力6（風速約11～14m/s）であった。

## 2.7 貨物等に関する情報

### 2.7.1 水酸化ソーダに関する情報

本船の製品安全データシート<sup>\*12</sup>によれば、水酸化ソーダの物理的及び化学的性質、必要な安全対策等は次のとおりであった。

- (1) 物理的状态  
形状：液体（水溶液）  
色：淡黄色～赤褐色  
臭い：不快臭、硫化水素臭  
pH：11以上の強アルカリ
- (2) 物理的状态が変化する特定の温度／温度範囲  
沸点：110℃（25%品）  
融点：5℃（25%品）
- (3) 引火点：なし
- (4) 発火点：なし
- (5) 爆発特性：発火性物質に該当せず。ただし、硫化水素としては以下のとおり。  
硫化水素の爆発限界 上限：46.0vol% 下限：4.0vol%
- (6) 密度：1.18g/cm<sup>3</sup>（25%品）
- (7) 臭いのしきい値（ただし、硫化水素として）：0.03ppm
- (8) 燃焼性：不燃性
- (9) 分子量：56.06（NaSHとして）
- (10) 安全対策（抜粋）
  - ① 酸と接触すると有害な硫化水素ガスが発生するため、酸との接触は必ず避けること。

<sup>\*12</sup> 「製品安全データシート」とは、化学物質及びそれらを含む製品（通知対象物）の物理化学的性状、危険有害性、取扱上の注意等についての情報を記載したものであり、通知対象物を譲渡し、又は提供する者が作成し、譲渡し、又は提供する相手方に通知するものをいう。

- ② 酸化剤と接触すると激しく反応するため、酸化剤との接触は避けること。
- ③ 水酸化ソーダをふき取ったウエスや紙類などの可燃物をそのまま放置すると、酸化発熱が促進され、可燃物が燃える恐れがあるため、一度水に浸してから廃棄すること。
- ④  $pH$ の低下により有害な硫化水素ガスが発生するため、酸との接触の他、 $pH$ を下げる要因（例えば空気との接触、 $pH$ 緩衝作用のある物質との混合）は出来る限り排除する。

#### (11) 応急措置

##### ① 吸入した場合

被災者を直ちに空気の新鮮な場所に移す。鼻孔または口内を充分洗浄する。呼吸が停止している場合や弱い場合は人工呼吸を行う。直ちに医師の診断を受ける。

##### ② 皮膚に付着した場合

直ちに多量の清水で15分間以上洗浄すること。皮膚の刺激やぬるぬるした感じがなくなるまで洗い続ける。洗浄が終わるまでは被災者を移動させてはいけない。直ちに医師の手当てを受ける。

#### 2.7.2 アクリル酸に関する情報

本船の製品安全データシートによれば、アクリル酸の物理的及び化学的性質並びに必要な安全対策は次のとおりであった。

- (1) 物理的状态、形状、色など：無色の液体
- (2) 臭い：酢酸様強い刺激臭
- (3)  $pH$ :データなし
- (4) 融点：13.5℃
- (5) 沸点：141℃
- (6) 引火点：51.4℃
- (7) 爆発範囲：下限：2vol%、 上限：17vol% (空气中)
- (8) 蒸気圧：400Pa (20℃)
- (9) 蒸気密度 (空気=1)：2.49
- (10) 比重 (密度)：1.05
- (11) 溶解度：水と混和する。
- (12) 自然発火温度：428℃
- (13) 臭いのしきい値：0.1ppm
- (14) 粘度：1.25mPa・s (25℃)
- (15) 避けるべき条件：加熱、あるいは、光、酸素

- (16) 混触危険物質：酸化剤、強塩基、アミン類、鉄塩銅、ニッケル、鉄などの金属を侵すので接触を避ける。
- (17) 危険有害な分解生成物：燃焼により有害ガス（一酸化炭素、二酸化炭素）を発生する。火災時に刺激性もしくは有害なヒュームやガスを放出する。

### 2.7.3 硫化水素ガスに関する情報

製品安全データシートによれば、硫化水素ガスを吸入した場合等の応急措置は次のとおりであった。

#### (1) 吸入した場合

- ① 被災者を新鮮な空気のある場所に移動し、呼吸しやすい姿勢で休息させること。
- ② 直ちに医師に連絡すること。

#### (2) 目に入った場合

- ① 水で数分間注意深く洗うこと。次にコンタクトレンズを着用していて容易に外せる場合は外すこと。その後も洗浄を続けること。
- ② 目の刺激が維持する場合は、医師の診断、手当てを受けること。

#### (3) 飲み込んだ場合

- ① 口をすすぐこと。
- ② 気分が悪い時は、医師に連絡すること。

### 2.8 本船のタンククリーニング作業に関する情報

本件船長、専任船長、機関長、次席一航士及び交代一等航海士（以下「交代一航士」という。）の口述並びに有害液体物質記録簿によれば、次のとおりであった。

- (1) 一航士は、名古屋港出港前、タンククリーニング作業についての作業前ミーティングを行い、作業計画、作業手順等を乗組員に周知し、本件船長の許可を取っていた。
- (2) 乗組員は、本事故当日も通常どおり、本件船長が船橋、機関長が船尾楼甲板右舷側に装備した操作盤付近におり、一航士、一機士及び次席一航士が膨張トランク上でバルブの開閉作業等を行った。
- (3) バイパス弁操作ハンドルは、本事故直前の揚荷終了後、半開としていた。
- (4) バイパス弁操作ハンドルは、名古屋港を出港後、乗組員がタンククリーニング作業を開始し、2番貨物タンク内のタンク洗浄水をスロップタンクへ移送する際も半開のままであった。
- (5) 本事故時タンク洗浄水の移送に使用した貨物ポンプの回転数は、約280rpmであり、ふだん使用している回転数250～280rpmの範囲内であった。



- (6) 本船は、本事故時、アクリル酸洗浄水が貯留されているスロップタンク（右、左）に貨物ポンプを使用して水酸化ソーダ洗浄水を移送した。
- (7) 本船は、スロップタンクにタンク洗浄水を貯留する際、船体が傾かないように両舷のスロップタンクにタンク洗浄水を貯留していた。
- (8) 本船の乗組員は、以前、洗剤を使用したタンク洗浄作業中、スロップタンクの排気管放出口からタンク洗浄水が漏えいした際に付近航行中の巡視艇を認めため、スロップタンクマンホールハッチの蓋を開放し、その後の排気管放出口からの漏えいを防いでいた。また、漏えいしたタンク洗浄水が人体に炎症を引き起こす場合もあったため、スロップタンクのマンホールハッチの蓋を開放していた。
- (9) 本船は、本事故時、清水をスロップタンク（中）に貯留し、約60℃に温めて洗浄水として使用していた。
- (10) 本件船長、機関長、専任船長及び交代一航士は、貨物である水酸化ソーダ自体の危険性については認識していたが、水酸化ソーダ洗浄水、アクリル酸洗浄水などのタンク洗浄水の混合によって化学反応が起こることは認識していなかった。

## 2.9 他の事業者のスロップタンクの使用状況

ケミカルタンカーを運航する内航海運業者4社に対し、スロップタンクの使用状況及び使用方法に関する乗組員への指示について調査を行ったところ、全ての内航海運業者が管理している船舶において、スロップタンクでのタンク洗浄水の混留が行われていることが判明した。

また、半数の事業者では、スロップタンクの使用について、会社からの指示は行わず、乗組員の判断に任せていた。

## 2.10 ケミカルタンカーのタンク洗浄水の取扱いに係る法規制について

国土交通省海事局によれば、次のとおりである。

ケミカルタンカーのタンク洗浄水の取扱いについて①危険物取扱規程の船長への供与義務及び同規程に記載された事項の遵守義務②危険な相互反応をする物質を同時積載する場合のタンク洗浄水の取扱い及びビルジ保管のためのスロップタンクに関する要件などを船舶安全法の関係法令、通達において定めている。

関係法令、通達は、以下のとおりである。

- (1) 危険物船舶運送及び貯蔵規則（昭和三十二年運輸省令第三十号。以下「危規則」という。）  
(危険物取扱規程の供与)

第五条の八 第百十一条第一項各号に掲げる危険物を運送する船舶及びばら積み液体危険物（有害液体物質を除く。）を運送する船舶（引火性液体物質にあつては、タンカー、タンク船及びタンクを据え付けたはしけ）の船舶所有者は、当該危険物の運送により発生する危険を防止するため、当該危険物に関する性状、作業の方法、災害発生時の措置その他の注意事項（以下「危険を防止するための注意事項」という。）を詳細に記載した危険物取扱規程を作成し、当該船舶の船長に供与しなければならない。ただし、別表第四に定める災害対策緊急措置手引書を備え付けた場合において、当該災害対策緊急措置手引書に危険を防止するための注意事項を記載したときは、危険物取扱規程に当該事項を記載することを要しない。

2 船長は、前項の危険物取扱規程に記載された事項を当該船舶の乗組員及び当該作業を行う作業員に周知させ、かつ、遵守させなければならない。

（貨物ポンプ室）

第二百六十一条

一～三（略）

四 室内のビルジが、次に掲げるものにより構成されるビルジ排水設備により処理されるように措置されているものであること。

イ 室外から操作することができるビルジ排出ポンプ

ロ 排出されたビルジを貯蔵するためのスロップタンク

ハ スロップタンクに貯蔵されているビルジを陸上に移送するための適当な継手

2～5（略）

(2) 船舶検査心得（海事局長通達）

（貨物ポンプ）

261. 1. 4

(C) スロップタンクの要件は次に掲げるところによること。

(1)～(3)（略）

(4) 危険な相互反応をする物質を2種類以上同時積載する場合には、これらの物質を含んだタンクの洗浄水及びビルジは同一のスロップタンクに積載してはならない。従って、危険な相互反応をする物質で同時積載されるものと同じ数のスロップタンクを設けなければならない。

(5)（略）

## 2.11.1 本船の安全管理等に関する情報

### 2.11.1 本船の船舶所有者等

A社の安全統括管理者及びB社の担当者の口述によれば、次のとおりであった。本船は、A社とC社の共同所有であり、船舶管理人としてC社を選任していた。本船は、B社が船員を配乗し、運航はA社が行っていた。

このため、本船のタンククリーニング作業等における具体的な安全管理は、運航していたA社が行っていた。

### 2.11.2 安全管理規程に関する情報

- (1) A社の安全管理規程には、乗組員に対して行われる教育について次のとおり定められている。

安全統括管理者及び運航管理者は、運航管理補助者、船舶所有者等、乗組員、安全管理に従事する者、内部監査を行う者に対し、安全管理規程、船員法及び海上衝突予防法等の関係法令その他輸送の安全を確保するために必要と認められる事項について、具体的な安全教育を定期的実施し、その周知徹底を図らなければならない。

- (2) 安全管理規程には、危険物等の取扱いについて、次のとおり定められている。

危険物その他の乗務員等の安全を害するおそれのある物品の取扱いは、法令に定めるところによる。

### 2.11.3 A社の安全管理に対する情報

安全統括管理者の口述、タンククリーニング作業の手順書及び安全教育実施記録によれば、次のとおりであった。

- (1) A社は、海上運送法上の内航海運業者として輸送の安全を確保するため、安全管理規程を作成し、本船に備え付けていた。
- (2) A社は、タンククリーニング作業中における酸欠、ガス中毒、火災、爆発等の事故を防止するため、貨物タンク、荷役系統ライン、ポンプ等の洗浄方法等についてタンククリーニング作業の手順書を作成して本船に備え付けていたが、同作業の手順書には、タンク洗浄水の移送作業については記載されていなかった。
- (3) A社は、安全荷役の徹底、任意ISMの推進等8項目の基本方針を掲げ、それぞれ年間計画を作成し、実施していた。
- (4) A社は、1年に1回以上及び必要な時期に本船に対して安全教育を実施していた。平成23年1月31日に行われた安全教育では、タンク洗浄作業と

して設備の操作手引書の内容、有害液体物質記録簿の記入方法、排出基準、排出作業の分担、スロップタンクへのタンク洗浄水移送作業と分担及び窒素張込み品への注意（酸欠）についての説明を行っていたが、タンク洗浄水の危険性、タンク洗浄水の混合によって危険な化学反応が起こること、及びスロップタンクの使用方法については、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、教育を行っていなかった。

- (5) A社の運航管理補助者は、原則、1か月に1回訪船し、A社の月間重点目標の安全チェックを行い、必要があれば指導を行っていた。
- (6) A社は、A社及び他社で発生した事故事例の資料を本船に送付し、事故防止のために注意喚起を行っていた。

#### 2.11.4 危険物取扱規程等に関する情報

- (1) 本船には、危規則に定める危険物取扱規程が作成され、供与されていた。
- (2) 本船の危険物取扱規程には、貨物に関する特性、ケミカル相互反応表、貨物の取扱いなどが記載され、タンク洗浄水の処理については、次のとおり記載されている。

##### 5.9.3 タンク洗浄水の処理

##### (5) 相互反応を起こす貨物のスロップ

前回積載貨物が相互反応を起こす場合、そのスロップをスロップタンクに残してはならない事に注意を払うこと。

##### 5.9.7 その他の注意事項

港内での作業は行わないこと。海上では、蒸気が居住区に入ること防ぐように船を回頭すること。タンク洗浄水及びスロップタンクの処理は、5.9.3に述べた事項を遵守して行うこと。

#### 2.11.5 船長による乗組員に対する教育等の情報

本件船長及び専任船長の口述並びに船内会議記録及び安全担当者記録簿によれば、次のとおりであった。

- (1) 本件船長及び専任船長は、船長及び安全担当者の職務として年間計画表に基づき1か月に1回、船内会議を開催し、説明等を行っていた。
- (2) 本件船長及び専任船長は、船内会議において、静電気対策、荷役設備、係船機等の点検整備、マスク等の使用、作業基準の徹底などの説明を行っていたが、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の処理、スロップタンクの使用方法などの危険物取扱規程の内容については認識がなく、説明を行っていなかった。

2.12 硫化水素ガス濃度と人体への影響に関する情報

「新酸素欠乏症等の防止」（平成19年中央労働災害防止協会刊行）には、次のように記載されている。

硫化水素の毒作用

濃度 ppm	部位別作用・反応		
0.025	<b>臭覚</b> 鋭敏な人は特有の臭気を感じることができる 誰でも臭気を感じることができる 不快に感じる中程度の強さの臭気		
0.3			
3~5			
10		許容濃度（目の粘膜の刺激下限界）	
20~30	耐えられるが臭気の慣れ（臭覚疲労）でそれ以上の濃度に、その強さを感じなくなる	<b>呼吸器</b> 肺を刺激する最低限界	
50			<b>眼</b>
100~300	2~15分で臭覚神経麻痺でかえって不快臭は減少したと感ずるようになる	8~48時間連続ばく露で気管支炎、肺炎、肺水腫による窒息死	結膜炎（ガス眼）、眼のかゆみ、痛み、砂が眼に入った感じ、まぶしい、充血と腫脹、角膜の混濁、角膜破壊と剥離、視野のゆがみとかすみ、光による痛みの増強
170~300		気道粘膜の灼熱的な痛み1時間以内のばく露ならば、重篤症状に至らない限界	
350~400		1時間のばく露で生命の危険	
600		30分のばく露で生命の危険	
700	<b>脳神経</b> 短時間過度の呼吸出現後直ちに呼吸麻痺		
800~900	意識喪失、呼吸停止、死亡		
1000	昏倒、呼吸停止、死亡		
5000	即死		

## 2.13 救助機関への通報及び救助に関する情報

### 2.13.1 本件船長の通報

本件船長の口述及び名古屋保安部の情報によれば、本件船長は、一機士、一航士及び次席一航士が船首楼甲板上で倒れたのを見て平成23年6月28日11時33分ごろ、本船の携帯電話で118番通報し、「船内でタンククリーニング中、水酸化ソーダを吸い込んだ3人が倒れた。意識がないようで救助を頼む。名古屋港に向かう」と伝えた。

### 2.13.2 救助機関の対応

#### (1) 海上保安庁の対応状況

名古屋保安部の情報によれば、次のとおりであった。

第四管区海上保安本部は、平成23年6月28日11時33分ごろ、本件船長から118番通報を受け、名古屋保安部、四日市海上保安部（以下「四日市保安部」という。）に救助の指示を行った。名古屋保安部は、12時10分ごろ、巡視艇ひだかぜを、四日市保安部は、12時28分ごろ、巡視艇いせぎくをそれぞれ出港させた。

巡視船ひだかぜは、12時35分ごろ本船に接舷し、本船に乗り込んだ名古屋保安部職員が、船首右舷側で倒れている乗組員3人を確認した。

倒れていた3人は、2人が心肺停止状態、他の1人が意識レベル3（自分の名前、生年月日が言えない状態）であり、自立歩行が困難な状態であった。

名古屋保安部職員は、12時45分～12時55分ごろ3人を巡視艇ひだかぜに移し、救命措置を施しながら、名古屋港ガーデン埠頭に向かった。

巡視艇ひだかぜは、13時26分ごろ、名古屋港ガーデン埠頭に到着し、救助者を救急車に引き継いだ。

#### (2) 名古屋市消防局の対応状況

消防局隊員の口述によれば、次のとおりであった。

消防艇金竜は、消防局隊員を乗せ、南消防署大同出張所を出航し、13時14分ごろ海上保安庁の巡視艇ひだかぜと接舷して消防局隊員4人が巡視艇ひだかぜに乗り込んだ。

消防局隊員が乗り込んだとき、救助された3人のうち2人は、心肺停止状態で名古屋保安部職員が心臓マッサージ等の心肺蘇生を行っていた。他の1人は、意識はあったが、意識障害で言葉が話せない状態であった。消防局隊員は、心肺蘇生を継続して実施した。

## 2.14 スロップタンク内の発生物質及び物質発生状況に関する調査及び実験

本件船長、機関長及びA社担当者の口述、設備の操作手引書、有害液体物質記録簿及びタンク洗浄記録簿並びに現場調査により、本船は、アクリル酸と濃度45%の水酸化ソーダを積載した貨物タンクを洗浄した後、その洗浄水がスロップタンクで混合された際に本事故が発生したことから、本事故当日のスロップタンク内のアクリル酸洗浄水の量及び2番貨物タンクから移送された水酸化ソーダ洗浄水の量を以下のとおり特定し、これらに基づき、スロップタンク内で発生した物質及び物質発生状況に関する調査及び実験を一般社団法人日本海事検定協会理化学分析センター（以下「NKKK分析センター」という。）に委託した。

### 2.14.1 スロップタンク内のアクリル酸洗浄水の量、移送された水酸化ソーダ洗浄水の量等の特定

#### (1) アクリル酸洗浄水の量

本船は、本事故発生前の航海時、アクリル酸を積載していた2番貨物タンク（右、左）及び4番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を行い、発生したアクリル酸洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送していた。

##### ① アクリル酸の量

アクリル酸の残留量は、2.5.2(2)②より合計約0.205m<sup>3</sup>とした。

##### ② 洗浄水の量

アクリル酸の洗浄水量は、2.5.2(2)①に記載したアクリル酸洗浄水量から上記アクリル酸の残留量を除いた4.7m<sup>3</sup>とし、水温は、2.5.2(3)④より29℃とした。

#### (2) タンク内の水酸化ソーダ洗浄水の量

本事故は、本船が2番貨物タンク（右、左）のタンク洗浄水の一部をスロップタンクに移送したときに発生した。

##### ① 2番貨物タンク内の水酸化ソーダの量

2番貨物タンク内の水酸化ソーダの残留量を2.5.2(1)③より合計約0.102m<sup>3</sup>とした。

##### ② 2番貨物タンク内の洗浄水の量

水酸化ソーダの洗浄水量は、2.5.2(1)①、②から6.0m<sup>3</sup>とした。

#### (3) スロップタンクに移送した水酸化ソーダ洗浄水の量

##### ① 水酸化ソーダの量

本船のスロップタンク（右、左）に移送した水酸化ソーダの量は、2.5.2(1)②より移送配管内の残留量0.1m<sup>3</sup>と2番貨物タンク（右、左）のストリップング残量合計0.102m<sup>3</sup>のうちスロップタンク（右、左）

へ移送した量となる。2番貨物タンク（右、左）からスロップタンク（右、左）への移送量については、(2)①、②より本事故前に2番貨物タンク（右、左）に残されていたタンク洗浄水の量が約 $6.1\text{ m}^3$ であり、2.5.2(3)②より本事故後の2番貨物タンク（右、左）のタンク洗浄水の残量が約 $5\text{ m}^3$ であったことから、2番貨物タンク（右、左）のタンク洗浄水のうち約 $1/6$ がスロップタンク（右、左）に移送されたと考えられ、水酸化ソーダの移送量は、(2)①に記載した量の約 $1/6$ の $0.017\text{ m}^3$ とした。したがって、スロップタンク（右、左）への水酸化ソーダの合計移送量（配管内の残留量 $0.1\text{ m}^3$ 及び2番貨物タンクからの移送量 $0.017\text{ m}^3$ ）は、 $0.117\text{ m}^3$ とした。

## ② 洗浄水の量

(3)①により、2番貨物タンクに残された洗浄水の約 $1/6$ の量がスロップタンクに移送されたことから、スロップタンクに移送された洗浄水の量を $1.0\text{ m}^3$ とした。洗浄水の温度については、2.8(9)より $60^\circ\text{C}$ とした。

## (4) 追加の条件設定

アクリル酸及び水酸化ソーダの残留量は、新造時の水試験値を参考としているため、上記の量を約1.2倍としたものを条件2とし、約1.5倍としたものを条件3とした。また、アクリル酸洗浄水の量が $5\text{ m}^3$ という口述もあったため、アクリル酸の洗浄水の量を $0.3\text{ m}^3$ 増やして $5\text{ m}^3$ としたものを条件4として設定した。

## 2.14.2 調査及び実験の概要

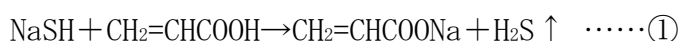
### (1) 調査概要

アクリル酸、45%水酸化ソーダ及びそれぞれの洗浄水を混合することで発生する物質を調査した。

アクリル酸洗浄水と水酸化ソーダ洗浄水を混合することで発生するガス成分の種類及び容量を明らかにするため、以下の考察を行った。

#### ① 発生物質の推定

水酸化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水の化学反応式を以下に示す。



当該化学反応式は、弱酸塩と中酸とを混合した場合の一般的な化学反応を示すものであり、このケースでは揮発性の弱酸である硫化水素ガスが発生することになる。

#### ② 発生物質量の算出

算出に用いたデータ（タンク内残液量及び洗浄水量）を表2.14-1に示



す。

a 化学反応

表2.14-1に示すとおり、水硫化ソーダとアクリル酸のモル数を比較すると、アクリル酸のモル数が多い。したがって、水硫化ソーダは全量反応し、①式の化学反応は右辺に向けて完了すると考えられる。

b 発生量の算出

全ての混合条件（表2.14-1）においては、①式は100%進行することから、硫化水素ガス発生量は、水硫化ソーダの量に依存することが明らかである。

それぞれの混合条件における混合液中の水硫化ソーダ量及び発生する硫化水素ガス量は表2.14-1に示すとおりである。

表2.14-1 実験条件と発生ガス量

船内タンクの残液と洗浄水		混合実験での条件			
		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
水硫化ソーダ (濃度45%)	タンク残液①	0.117m <sup>3</sup>	0.120m <sup>3</sup>	0.123m <sup>3</sup>	0.117m <sup>3</sup>
	洗浄水②	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>	0.9m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>
	①+②	1.117m <sup>3</sup>	1.120m <sup>3</sup>	1.023m <sup>3</sup>	1.117m <sup>3</sup>
	溶質濃度	6.3wt%	6.5wt%	7.3wt%	6.3wt%
		1220mol/g	1252mol/g	1283mol/g	1220mol/g
アクリル酸	タンク残液③	0.205m <sup>3</sup>	0.246m <sup>3</sup>	0.308m <sup>3</sup>	0.205m <sup>3</sup>
	洗浄水④	4.7m <sup>3</sup>	4.7m <sup>3</sup>	4.7m <sup>3</sup>	5.0m <sup>3</sup>
	③+④	4.905m <sup>3</sup>	4.946m <sup>3</sup>	5.008m <sup>3</sup>	5.205m <sup>3</sup>
	溶質濃度	4.4wt%	5.2wt%	6.6wt%	4.4wt%
		2989mol/g	3587mol/g	4492mol/g	2989mol/g
	溶質重量	68445g	70200g	71955g	68445g
硫化水素ガス発生値	計算値	27.3m <sup>3</sup>	28.0m <sup>3</sup>	28.7m <sup>3</sup>	27.3m <sup>3</sup>

注1)：溶質濃度の算出では、水流化ソーダ濃度45wt%、比重1.3、アクリル酸純度100wt%とし、それぞれの洗浄液は純水とみなした。

注2)：硫化水素ガス発生量の計算値は、水硫化ソーダ量 (m<sup>3</sup>) × 1000 × 比重 × 0.45 / 56.063 (モル質量) × 1000 × 22.4 (標準状態：絶対0°、1気圧) / 1000

注3)：タンク残液とは、スロップタンクへの移送配管内の残留量とスロップタンクに移送した貨物タンク内のストリップング残量の合計量をいう。

(2) 実験概要

推定される発生物質やその発生ガス濃度の確認実験を行った。ただし、発生ガス濃度測定は、表2.14-1の条件を全量反応させることができないため、混合量を約2万分の1に縮小し測定した。各条件の縮尺及びその液量を表2.14-2に示す。

表 2.14-2 各条件の縮尺及びその液量

条件	縮尺	水硫化ソーダ (ml)	洗浄水 (60℃) (ml)	アクリル酸 (ml)	洗浄水 (29℃) (ml)
条件 1	1/20893	5.6	48	10	225
条件 2	1/21426	5.6	47	12	219
条件 3	1/21964	5.6	41	14	214
条件 4	1/20893	5.6	48	10	239

(3) 混合条件

- ① 混合比：水硫化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水とを表2.14-1の条件の割合で混合した。
- ② 混合時の溶液温度：水硫化ソーダ洗浄水は60℃、アクリル酸洗浄水は29℃とした。
- ③ 反応装置：ガラス製反応ビン（580ml）に溶液を注入することで硫化水素ガスを発生させた。
- ④ 発生ガスの捕集：各溶液を混ぜた後、約5分後に発生したガスの初めの数百mlを廃棄し、その後のガスについて濃度を測定した。発生したガスの初めの数百mlには、ガス流路に残った空気が多く含まれているためである。
- ⑤ 発生ガス濃度の測定：真空法ガス採取器を用いてガス採取を行い、北川式ガス検知管120SH（測定範囲0.1～4%）（以下「検知管」という。）で硫化水素ガスの濃度を測定した。

2.14.3 調査及び実験の結果

(1) 調査結果

① 硫化水素ガスの量

それぞれの混合条件における混合液中の水硫化ソーダ量及び発生する硫化水素ガスの量は、表2.14-1に示すとおりである。

② 硫化水素発生量と排気管等の残容積<sup>\*13</sup>との比較

2.14.2(1)②で算出した硫化水素ガス発生量と残容積とを比較した。

条件1では、残容積が約25.3m<sup>3</sup>（スロップタンク：約24.6m<sup>3</sup>、マンホールハッチ：約0.5m<sup>3</sup>、排気管：約0.2m<sup>3</sup>）であり、発生するガスが27.3m<sup>3</sup>であるので、発生量が約2.0m<sup>3</sup>多くなる。

このため、水硫化ソーダ洗浄水中の水硫化ソーダが全量反応し、硫化水

\*13 「残容積」とは、スロップタンクの全容積から貯留されているタンク洗浄水の容積を除いた空間及びスロップタンクハッチの容積、排気管の容積の総和をいう。

素ガスが発生した場合、発生した硫化水素ガスの量は、スロップタンク（右、左）の残容積を超えるので、硫化水素ガスの一部は、スロップタンクの排気管放出口から大気中へ排出される可能性があり、他の条件も同様に発生した硫化水素ガスの一部が排気管放出口から大気中へ排出される可能性がある。

(2) 実験の結果

水酸化ソーダ洗淨水とアクリル酸洗淨水は共に透明な液体であるが、混合すると反応して白濁色となった。発生したガスは無色であり、腐卵臭がした。ガスは混合直後から発生し始めた。ガスを採取すると検知管が変色し、硫化水素ガスが発生したことが分かった。硫化水素ガス測定結果を表2.14-3に示す。また、今回の実験では検知管の測定範囲を大きく上回る結果となってしまうため、試料採取量を12.5mlとし、測定結果は100ml換算とした。

表2.14-3 硫化水素ガス測定結果

条件	H <sub>2</sub> S 測定値	
	(採取量 12.5ml) (%)	(採取量 100ml換算) (%)
条件1	2.8	22.4
条件2	3.0	24.0
条件3	3.2	25.6
条件4	2.7	21.6

(3) まとめ

本調査によって以下の事項が明らかとなった。

① 発生物質の推定

アクリル酸 (CH<sub>2</sub>=CHCOOH) と水酸化ソーダ (NaSH) を混合することで「硫化水素ガス」が発生する。

② 発生物質量の算出

水酸化ソーダ洗淨水中の水酸化ソーダが全量反応して硫化水素ガスが発生し、硫化水素ガス発生量はスロップタンク等の残容積より大きくなり、スロップタンクの排気管放出口から、発生した硫化水素ガスが噴出した可能性がある。

③ 発生物質の確認実験

硫化水素ガスが発生することを確認した。また、各洗淨水を混合し、発生したガスの硫化水素ガス濃度を測定した。高濃度の硫化水素ガスが検出された。

(別添1 スロップタンク内の発生物質及び物質発生状況に関する委託調査 参照)

## 2.15 スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響についての調査

本件船長、次席一航士及び機関長の口述並びにNKKK分析センター委託調査結果及び一般配置図等により、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したときの乗組員の配置、噴出量、相対風向、風力等を以下のとおり特定し、これらに基づき、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響についての調査を独立行政法人海上技術安全研究所に委託した。

### 2.15.1 乗組員の配置、スロップタンクの排気管放出口からの硫化水素ガスの噴出量、相対風速等の特定

#### (1) 乗組員の配置

一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口から船尾方に約7.5m、機関長は、約27.5mにそれぞれ位置し、一航士、一機士及び次席一航士は、膨張トランク上に、機関長は、膨張トランク上約1.3mにある船尾楼甲板上にそれぞれ立っていた。

上記乗組員の左右舷方向の位置は、船体中心線より、一航士が左舷方に約2.5m、一機士が右舷方に約2.3m、次席一航士が右舷方に約3.0m、機関長が左舷方に約2.5mであった。

#### (2) 硫化水素ガスのスロップタンクの排気管放出口からの噴出量、噴出時間

① 噴出量：2.0m<sup>3</sup> (2.14.3(1)② 参照)

② 全量が噴出するのに要した時間：乗組員の口述によれば約3秒

#### (3) スロップタンクの排気管放出口の膨張トランク上の高さ、管口面積及び管口の向き

① 膨張トランク上の高さ：6.5m

② 管口の面積：0.0095m<sup>2</sup>

③ 管口の向き：垂直上方

#### (4) 乗組員の身長：170cm (本件船長を除く乗組員の平均値)

#### (5) 相対風向、相対風速、天気、気温

① 相対風向：右舷船首5° 相対風速：7.4m/s

② 天気：晴れ 気温：約32℃

#### (6) 硫化水素ガスの比重：1.18

#### (7) 漏えいする硫化水素ガスの濃度：100%

#### (8) 喫水：船首約1.25m、船尾約3.30m

## 2. 15. 2 調査概要

### (1) 調査概要

2. 15. 1のデータを使用し、流れ場の基礎方程式に基づき数値シミュレーション方法、いわゆる数値流体解析を行い、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスの拡散状況を計算し、ガス濃度の時空間変化を求めた。

計算結果の初期値依存性を排除するため、計算領域内の気流場が十分発達した状態に到達するまでの最初の15秒間は空気のみの流れ場の計算を行い、計算開始後15～18秒までの3秒間に放出口から硫化水素ガスを噴出させた。噴出終了後の硫化水素ガスの挙動を解析するため、更に7秒間の計算を行い、全体として25秒間のシミュレーションを実施した。

### (2) 解析対象

本解析で用いる数値シミュレーション方法は、図2. 15-1に示すように船体の一部を解析対象とした。船首尾方向にはスロップタンクの排気管放出口から船首方に6m、船尾方に28mとし、左右舷方向には海面上も含め20mとした。本事故時の喫水は船首で約1.25m、船尾で約3.30mであったことから、対象範囲での喫水は2.3mで一定であると仮定し、鉛直方向には海面上から上空20mまでを計算対象とした。計算対象を簡略化するため、甲板上の機器、設備等は無視し、一様な平面であると仮定した。ただし、硫化水素ガスの漏えい源であるスロップタンクの排気管1本分については計算モデルに含めた。また、本事故前に機関長が立っていた船尾楼甲板の一部（船尾方向に1m分）を考慮し、その高さ分（1.3m）のみを計算モデルに含めた。本解析で用いた計算対象のモデルを図2. 15-2に示す。

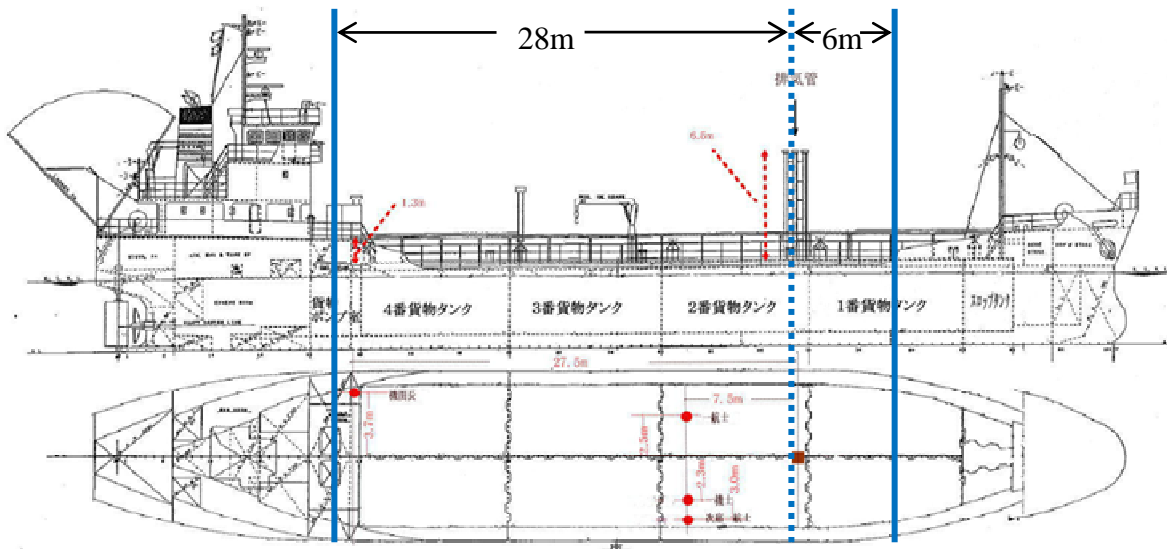


図2. 15-1 計算対象とする船首尾方向の範囲（青色の実線の範囲）

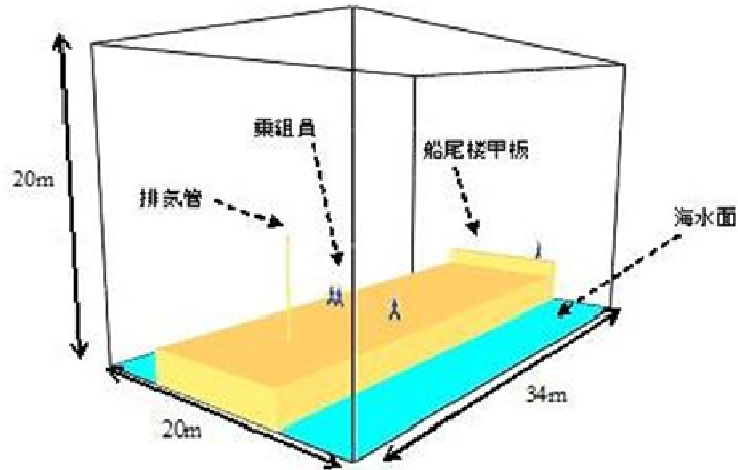


図2.15-2 計算対象のモデル図

### 2.15.3 調査結果

#### (1) 水平断面上の濃度分布

スロップタンクの排気管放出口を含む水平断面上での硫化水素ガスの濃度分布を図2.15-3に示す。硫化水素ガスの漏えい開始から3秒後の結果を除き、1秒ごとに7秒後までの濃度分布を示している。硫化水素ガスによる人的影響の有無を判断する指標の一つとして労働安全衛生法で規制されている管理濃度10ppmを取り上げ、10ppm以上の高濃度領域を全て赤色で表わしている。漏えいした硫化水素ガスは、船尾方に進むにつれて周囲空気との混合作用により分布形状が乱れ、高濃度領域（赤色）の幅が拡大している様子が観察される。

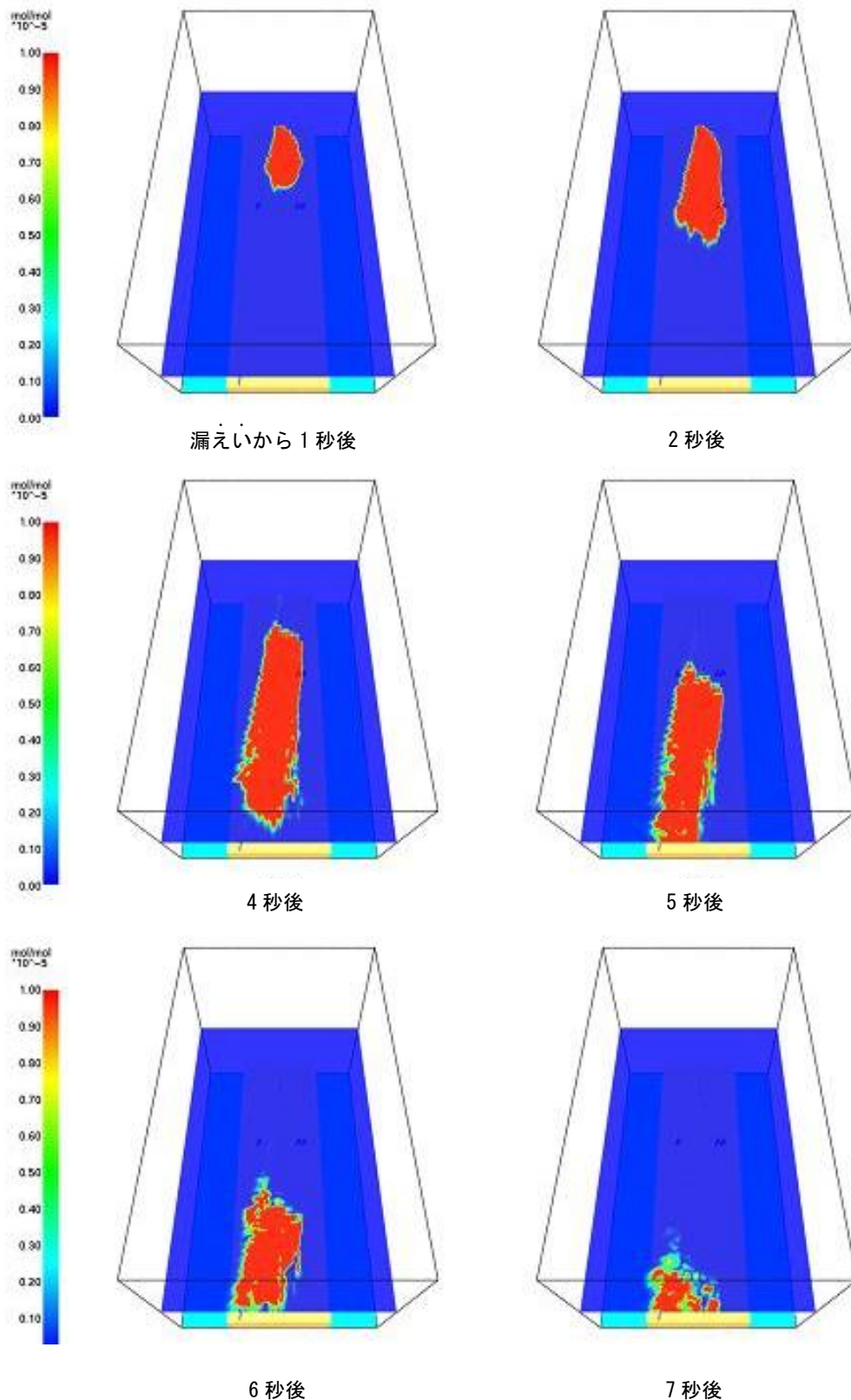


図 2.15-3 排気管放出口を含む水平断面上での硫化水素ガスの濃度分布

(2) 硫化水素ガス濃度 10 ppm の等値面の時間変化

高濃度の硫化水素ガスが占める空間範囲を 3 次的に確認するため、管理濃度 10 ppm の等値面の時間変化を図 2.15-4 に示す。スロップタンクの排

気管放出口から噴出した硫化水素ガスは、細長いガス塊を形成しながら航海船橋等のある風下側に流されて行くことが分かる。このガス塊の先端部にはボア (bore) \*14が形成されており、一般に空気よりも重い高密度ガスの重力流\*15で見られる現象と一致している。

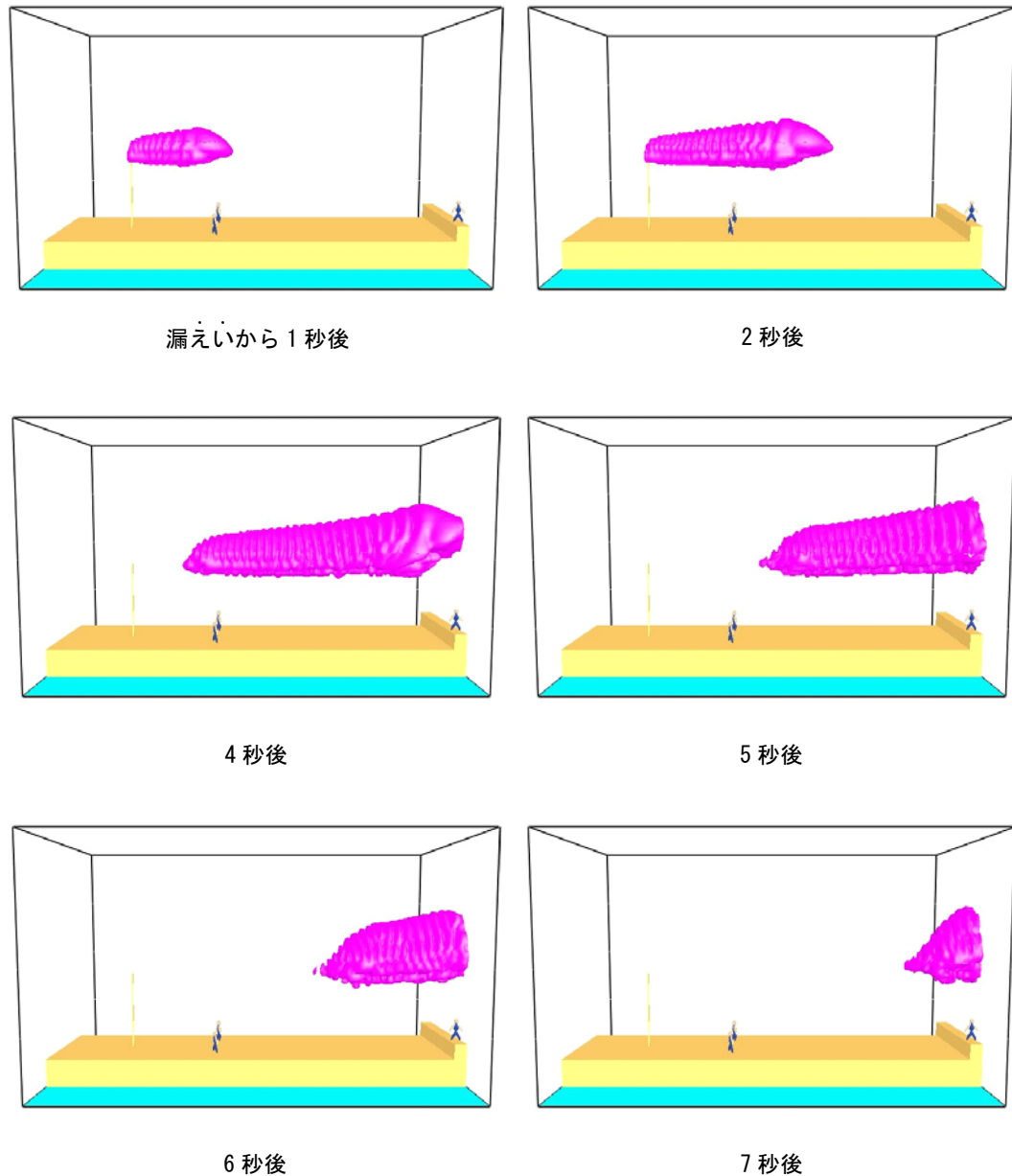


図 2.15-4 硫化水素ガス濃度が 10 ppm の等値面の時間変化

(3) まとめ

噴出した硫化水素ガスは、船首楼甲板のある風上側に移流拡散する現象は再現されず、また 10 ppm 以上の高濃度の硫化水素ガスが甲板近傍まで拡散

\*14 「ボア (bore)」とは、密度界面にできる一種の衝撃波で密度の大きい違い (不連続面) を保ったまま移動していく現象をいう。

\*15 「重力流」とは、重い流体が軽い流体の下側に潜り込む際に形成される流れをいう。



する現象は再現されないことが分かった。本解析調査の数値シミュレーションは多くの仮定に基づいていることを考慮しても、スロップタンクの排気管放出口の比較的近傍に配置していた乗組員3人については、仮に避難することなく、各人がその場に留まっていたとしても被害を受ける可能性は極めて低いことから、本死傷事故の発生は別の原因によるものと考えるのが妥当である。しかし、スロップタンクの排気管放出口の船尾方にいた乗組員1人については、船の後方で乱れの影響が大きくなること、前方3人の乗務員より位置が高かったこと、貨物ポンプ室コンパニオン等周囲に複雑な形状の構造物があったことなどから、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスの一部が到達した可能性を完全に否定はできない。

(別添2 スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響についての委託調査 参照)

## 3 分析

### 3.1 事故発生の状況

#### 3.1.1 事故発生に至る経過

2.1、2.2、2.5.2(2)及び2.13.2から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、6月25日、四日市港にある荷主の岸壁でアクリル酸を全量揚荷後、離岸してタンククリーニング作業で発生したアクリル酸洗浄水をスロップタンク（右、左）に貯留していた。
- (2) 本船は、6月28日、名古屋港内の荷主の岸壁で水酸化ソーダを全量揚荷後、離岸して名古屋港を航行中、一航士が、本件船長からタンククリーニング作業開始の指示を受けた。一航士は、機関長、一機士及び次席一航士と共に清水洗浄ポンプを運転し、4基のバタワース洗浄機を使用して2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を開始した。
- (3) 機関長は、2番貨物タンク（右、左）の洗浄が終了したので、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送するため、貨物ポンプを運転し、水酸化ソーダ洗浄水がスロップタンク（右、左）へ移送され始めたので、吐出圧力の調整のため、11時26分ごろ、4番貨物タンク（左）上にあるバイパス弁操作ハンドルに向かおうとして船尾樓甲板左舷側の階段を降りようとしたとき、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した。

- (4) 一航士、一機士及び次席一航士は、風上の船首楼甲板右舷側に避難する途中、一航士がスロップタンク（左）のマンホールハッチの蓋を、避難した乗組員のうちの1人がスロップタンク（右）のマンホールハッチの蓋を開放した。
- (5) 一航士、一機士及び次席一航士は、11時27分ごろ船首楼甲板右舷側で倒れ、機関長は、食堂でしばらくの間、意識がもうろうとしていた。
- (6) 一航士、一機士及び次席一航士は、来援した名古屋保安部職員等に救助されて病院に搬送されたが、一航士及び一機士は、死亡が確認された。次席一航士は、硫化水素中毒で、本事故当日に病院で診察を受けた機関長は、硫化水素中毒及び化学性肺炎でそれぞれ入院した。

### 3.1.2 事故発生日時及び場所

2.1から、本事故の発生日時は、平成23年6月28日11時27分ごろで、発生場所は、名古屋港北航路第3号灯標から173°250m付近であったものと考えられる。

### 3.1.3 死傷者等の状況

2.1、2.2、2.14.2、2.14.3及び2.15から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 機関長、一航士、一機士及び次席一航士は、タンククリーニング作業中、アクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水が移送されたことから、硫化水素ガスが発生し、一航士、一機士及び次席一航士が、開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して甲板上で倒れ、また、機関長が、スロップタンクの排気管放出口及び開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して意識がもうろうとなり、食堂に座り込んだ。
- (2) 一航士及び一機士は、心肺停止状態で本船から救助され、搬送先の病院で死亡が確認された。死因は、硫化水素中毒であった。次席一航士は、歩行が困難な状態で本船から救助されて病院に搬送され、硫化水素中毒で入院した。機関長は、本事故発生当日、病院に行き、硫化水素中毒及び化学性肺炎と診断され、入院した。両人はいずれも重傷であった。

### 3.2 事故要因の解析

#### 3.2.1 乗組員の状況に関する解析

2.4(1)から、本船の乗組員及び専任船長は、いずれも適法で有効な海技免状及び資格を有していた。

#### 3.2.2 船舶の状況

2.5.3及び2.5.4から、本事故発生当時、本船は、使用した貨物装置及び船体に不具合又は故障はなかったものと考えられる。

#### 3.2.3 気象及び海象の状況

2.6から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本事故発生当時、天気晴れ、風向南西、風速約3.3m/s、気温約32.0℃、波高約0.3mであった。
- (2) 本事故時と同一作業（アクリル酸洗浄水を貯留していたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送した）が行われた平成22年12月15日12時00分の風向、風速は、風向北西、風速約13m/sであった。

#### 3.2.4 スロップタンクの使用に関する解析

2.1、2.5.2、2.8及び2.14.1から、次のとおりであった。

- (1) タンク洗浄水は、日頃からスロップタンク（右、左）に貯留していたものと考えられる。
- (2) 本船は、日頃からスロップタンクに異なった2種類以上の洗浄水を混留していたものと考えられる。
- (3) 本船は、25日にアクリル酸の荷揚げ後のタンククリーニング作業で発生したアクリル酸洗浄水約4.9m<sup>3</sup>をスロップタンク（右、左）に貯留していたが、本事故時、水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業で発生した水酸化ソーダ洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。

スロップタンク（右、左）では、アクリル酸洗浄水と水酸化ソーダ洗浄水が混合されることになったものと考えられる。なお、2番貨物タンク（右、左）には、水酸化ソーダ洗浄水約6.1m<sup>3</sup>が貯留されており、また、本事故後のスロップタンク（右、左）の貯留量は、約6m<sup>3</sup>であったものと考えられる。

- (4) 本船のスロップタンク（右、左）に移送した水酸化ソーダ洗浄水の量は、約1.1m<sup>3</sup>であった可能性があると考えられる。

- (5) 本船乗組員は、後記 3.2.10 及び 3.2.11 のとおり、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことから、アクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送したものと考えられる。
- (6) 本船乗組員は、スロップタンクの排気管放出口からタンク洗浄水が漏れるとタンク洗浄水の人体への影響を考慮し、漏れを止めようとしてスロップタンクのマンホールハッチの蓋をこれまで開放していたものと考えられる。
- (7) 本船は、本事故時、名古屋港内でタンククリーニング作業中、次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した際、次席一航士等の 3 人は、風上の船首楼甲板右舷側に避難する途中、噴出を止めようとしてスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開放したものと考えられる。

3.2.5 タンククリーニング作業の実施及び硫化水素ガス発生時の状況に関する解析  
2.1、2.6、2.8 及び 3.2.3 から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、名古屋港内を航行中、2 番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を開始したものと考えられる。
- (2) 一航士は、スロップタンク（中）に貯留していた温水でバタワース洗浄機を使用してタンククリーニング作業を行ったものと考えられる。
- (3) 本船は、2 番貨物タンク（右、左）の洗浄が終了し、機関長が、2 番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送するため、貨物ポンプを運転した後、水酸化ソーダ洗浄水がスロップタンク（右、左）へ移送され始めたので、吐出圧力の調整のために 4 番貨物タンク（左）上にあるバイパス弁操作ハンドルに向かおうとして船尾楼甲板左舷側の階段を降りようとしたとき、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。
- (4) 本船は、本事故時の針路、速力、風向及び風速から推算すると、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したとき、右舷船首約 5° の方向より約 7.4 m/s の風を受けていた可能性があると考えられる。
- (5) 本船は、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したとき、本件船長が船橋、機関長が船尾楼甲板左舷側の階段付近、次席一航士と一機士が 2 番貨物タンク（右）のサクシヨンバルブ操作ハンドル付近、一航士が 2 番貨物タンク（左）のサクシヨンバルブ操縦ハンドル付近に位置し、乗組員とスロップタンクの排気管放出口からの距離は、機関長が船尾方に約

27.5 m、一航士、一機士及び次席一航士が船尾方に約7.5 mであったものと考えられる。

### 3.2.6 硫化水素ガスの発生及びスロップタンクの排気管放出口等からの同ガスの噴出状況の解析

2.1、2.8及び2.14から、次のとおりであった。

- (1) スロップタンク（右、左）において、アクリル酸洗浄水と水酸化ソーダ洗浄水が混合され、化学反応を起こして硫化水素ガスが発生したものと推定される。
- (2) スロップタンク（右、左）内で発生した硫化水素ガスの量は、スロップタンク（右、左）及び排気管等の残容積より多くなったことから、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。
- (3) 次席一航士等の3人は、船首楼甲板右舷側に避難する途中、スロップタンクの排気管放出口からの噴出を止めようとしてスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開けたことから、各マンホールハッチから硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。

### 3.2.7 スロップタンクの排気管放出口及びマンホールハッチから噴出した硫化水素ガスの影響

2.15より、一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口付近においては噴出した硫化水素ガスの影響を受けなかったものと考えられることから、開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒に陥ったものと考えられる。また、機関長は、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが貨物ポンプ室のコンパニオン、居住区、船橋前面壁等で反射されたもの及びスロップタンクのマンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒に陥ったものと考えられる。

### 3.2.8 過去のアクリル酸洗浄水と水酸化ソーダ洗浄水の混留状況等

- (1) 2.5.2(4)から、本船は、平成22年12月12日、名古屋港外において、1番、2番、3番及び4番貨物タンクに貯留していたアクリル酸洗浄水約14 m<sup>3</sup>をスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。
- (2) 2.5.2(4)及び2.14から、本船は、12月15日11時25分ごろ、伊勢湾を針路約180°、約12 knの速力で航行中、2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業で発生した水酸化ソーダ洗浄水約11 m<sup>3</sup>を

スロップタンク（右、左）に移送したことから、タンク洗浄水が化学反応を起こしてスロップタンク内で硫化水素ガスが発生したものと考えられる。

- (3) 2.5.2(4)、2.6及び3.2.3から、本船は、15日11時25分ごろの針路、速力、風向及び風速から推算すると、本船は、右舷正横後約18°から約9.7m/sの風を受けていた可能性があり、この風向、風速により、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスは、短時間に船外に拡散し、作業中の乗組員は、硫化水素ガスの発生に気付かず、スロップタンクのマンホールハッチの蓋の開放を行わなかった可能性があるものと考えられる。

### 3.2.9 本件船長を含む乗組員等のタンク洗浄水に対する認識の状況

2.8から、本件船長を含む乗組員及び専任船長は、貨物単体の危険性については認識していたが、タンク洗浄水の混合によって危険な化学反応が起こるとは認識していなかったものと考えられる。

### 3.2.10 本船の安全管理に関する解析

2.11.3から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) A社は、タンククリーニング作業中における酸欠、ガス中毒、火災、爆発等の事故を防止するため、貨物タンク、荷役系統ライン、ポンプ等の洗浄方法等についてタンククリーニング作業の手順書を作成して本船に備え付けていたが、手順書には、タンク洗浄を実施した後のタンク洗浄水の移送作業については記載されていなかった。
- (2) A社は、安全荷役の徹底、任意ISMの推進等8項目の基本方針を掲げ、それぞれ年間計画を作成し、実施していた。
- (3) A社は、1年に1回以上及び必要な時期に本船に対して安全教育を実施していた。

A社が行った平成23年1月31日の安全教育では、タンク洗浄に係る設備の操作手引書の内容、有害液体物質記録簿の記入方法、排出基準、排出作業の分担等の説明が行われていたが、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法については、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、教育を行っていなかった。このため、本件船長等の本船乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことから、アクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送し、本事故に至ったものと考えら

れる。

(4) A社の運航管理補助者は、原則、1か月に1回訪船し、A社の月間重点目標の安全チェックを行い、必要があれば指導を行っていた。

(5) A社は、A社及び他社で発生した事故発生事例の紹介資料を本船に送付し、事故防止のために注意喚起していた。

### 3.2.11 本件船長等による乗組員への教育等に関する状況

2.7.3及び2.11.5から、次のとおりであったものと考えられる。

(1) 本件船長及び専任船長は、船長及び安全担当者の職務として年間計画表に基づき1か月に1回、船内会議を開催し、説明等を行っていた。

(2) 本件船長及び専任船長は、船内会議において、静電気対策、荷役設備、係船機等の点検整備、マスク等の使用、作業基準の徹底などの説明を行っていたが、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の処理、スロップタンクの使用方法などの危険物取扱規程の内容については、認識がなく、説明を行っていなかった。

### 3.2.12 本件船長が指示した応急措置の状況

2.7.1及び2.7.3から、本件船長が機関長に指示した応急措置は、水酸化ソーダを吸入及び付着した場合の措置だった可能性があると考えられる。

### 3.2.13 事故発生に関する解析

2.1、2.5.2、2.5.5、2.8、2.11、2.14.3、2.15.1、2.15.3、3.1.1、3.1.2及び3.2から、次のとおりであった。

(1) 本船は、名古屋港を航行中、機関長、一航士、一機士及び次席一航士が水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を行い、2番貨物タンク（右、左）の洗浄を終了し、発生した水酸化ソーダ洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送したのと考えられる。

(2) 本船のスロップタンク（右、左）には、アクリル酸洗浄水が貯留されていたのと考えられる。

(3) 本船は、スロップタンク（右、左）において、アクリル酸洗浄水と水酸化ソーダ洗浄水を混合させたことから、化学反応を起こして硫化水素ガスが発生したものと推定される。

(4) スロップタンク（右、左）で発生した硫化水素ガスは、発生量がスロップタンク（右、左）及び排気管等の残容積より多くなり、スロップタンクの排気管放出口から噴出したのと考えられる。

- (5) 本船の乗組員は、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した際、本件船長が船橋、機関長が船尾楼甲板左舷側の階段付近、次席一航士及び一機士が2番貨物タンク（右）のサクシヨンバルブ操作ハンドル付近、一航士が2番貨物タンク（左）のサクシヨンバルブ操作ハンドル付近に位置し、スロップタンクの排気管放出口から、一航士、一機士及び次席一航士が船尾方に約7.5m、機関長が船尾方に約27.5m離れていたものと考えられる。
- (6) 本船は、本事故時、右舷船首約5°の方向より約7.4m/sの風を受けていた可能性があると考えられる。
- (7) 一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した際、風上の船首楼甲板右舷側へ避難する途中、スロップタンクの排気管放出口からの噴出を止めようとしてスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開けたことから、各マンホールハッチから硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。
- (8) 一航士、次席一航士及び一機士は、スロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒に陥ったものと考えられる。また、機関長は、スロップタンクの排気管放出口及びスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒等に陥ったものと考えられる。
- (9) 本船乗組員は、後記(11)のとおり、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことから、水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されているスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。
- (10) 本件船長及び専任船長は、乗組員に対し、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の処理、スロップタンクの使用方法などの危険物取扱規程の内容についての認識がなく、説明を行っていなかったことから、乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生するとは認識していなかったものと考えられる。
- (11) A社は、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったことから、本船乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったものと考えられる。



### 3.2.14 被害発生に関する解析

一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口からの白煙を認め、風上側の船首楼甲板右舷側に避難する途中、タンク洗浄水の人体への影響を考慮し、噴出を止めようとしてスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開放したことから、マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒に陥ったものと考えられるが、各マンホールハッチの蓋を開放していなければ、同ガスはスロップタンクの排気管放出口の風上側に拡散しないことから、同中毒に陥ることを回避できたものと考えられる。

したがって、万一、硫化水素ガスが発生した場合は、スロップタンクの排気管放出口付近にいるときは速やかにスロップタンク排気管放出口の風上側に避難し、スロップタンク（右、左）のマンホールハッチの蓋を開放しないことが必要なものと考えられる。

また、機関長は、食堂に入ったが、居住区付近にいるときは速やかに閉鎖された居住区に避難することが必要なものと考えられる。

## 4 結 論

### 4.1 分析の要約

#### (1) 事故発生に至る経過

- ① 本船は、名古屋港を航行中、水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）のタンククリーニング作業を行い、同タンクで発生した水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されているスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。(3.1.1) \*16
- ② 本船は、水酸化ソーダ洗浄水をスロップタンク（右、左）に移送したとき、両洗浄水が化学反応を起こして硫化水素ガスが発生し、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。(3.2.6)
- ③ 一航士、一機士及び次席一航士は、風上の船首楼甲板右舷側に避難する途中、スロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開放したものと考えられる。(3.1.1(4))
- ④ 一航士、一機士及び次席一航士は、船首楼甲板右舷側で倒れ、機関長は、食堂でしばらくの間、意識がもうろうとしていたものと考えられる。

---

\*16 本項の各文章末尾に記載した数字は、当該記述に関連する「3 分析」及び「5 再発防止策」以下の主な項番号を示す。

(3. 1. 1(5))

(2) 事故発生状況

- ① A社は、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったものと考えられる。

このため、本船の乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことから、アクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に水酸化ソーダ洗浄水を移送したものと考えられる。

(3. 2. 13(11))

- ② 本船は、機関長、一航士、一機士及び次席一航士がタンククリーニング作業に従事し、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した際、スロップタンクの排気管放出口から、一航士、一機士及び次席一航士が船尾方に約7.5m、機関長が船尾方に約27.5mの甲板上に位置していたものと考えられる。(3. 2. 5(5))

(3) 事故発生の要因

- ① 本船は、名古屋港を航行しながらタンククリーニング作業中、水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）の洗浄を終了し、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したことから、水酸化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水が化学反応を起こして硫化水素ガスが発生した際、タンククリーニング作業に従事していた一航士、一機士及び次席一航士が、開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引し、また、機関長が、スロップタンクの排気管放出口及び開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して一航士及び一機士が硫化水素中毒で死亡するとともに、機関長が硫化水素中毒等に、次席一航士が硫化水素中毒に陥ったものと考えられる。

(3. 2. 13(1)～(4)、(8))

- ② 一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口から硫化水素ガスが噴出した際、風上の船首楼甲板右舷側へ避難する途中、スロップタンクの排気管放出口からの噴出を止めようとしてスロップタンク（右、左）のマンホールハッチの蓋を開けたことから、各マンホールハッチから硫化水素ガスが噴出したものと考えられる。(3. 2. 13(7))

- ③ A社は、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク

洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったことから、本船乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり、危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことから、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。

(3.2.13(9)、(11)、5)

#### 4.2 原因

本事故は、本船が名古屋港を航行しながらタンククリーニング作業中、水酸化ソーダを荷揚げした2番貨物タンク（右、左）の洗浄を終了し、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したため、水酸化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水が化学反応を起こして硫化水素ガスが発生した際、タンククリーニング作業に従事していた一航士、一機士及び次席一航士が、開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引し、また、機関長が、スロップタンクの排気管放出口及び開放されたスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引したことにより発生したものと考えられる。

本船が2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したのは、A社が、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったことから、本船乗組員は、タンク洗浄水の混合によって化学反応が起こり危険な物質が発生することを知らず、また、危険物取扱規程の内容についての認識がなかったことによるものと考えられる。

#### 4.3 その他判明した安全に関する事項

一航士、一機士及び次席一航士は、スロップタンクの排気管放出口からの白煙を認め、風上側の船首楼甲板右舷側に避難する途中、タンク洗浄水の人体への影響を考慮し、漏れを止めようとしてスロップタンク（右、左）の各マンホールハッチの蓋を開放したことから、マンホールハッチから噴出した硫化水素ガスを吸引して硫化水素中毒に陥ったものと考えられるが、各マンホールハッチの蓋を開放していなければ、同ガスはスロップタンクの排気管放出口の風上側に拡散しないことから、同中毒に陥る

ことを回避できたものと考えられる。

したがって、万一、硫化水素ガスが発生した場合は、スロップタンクの排気管放出口付近にいるときは速やかにスロップタンクの排気管放出口の風上側に避難し、スロップタンク（右、左）のマンホールハッチの蓋を開放しないことが必要なものと考えられる。

また、機関長は、食堂に入ったが、居住区付近にいるときは速やかに閉鎖された居住区に避難することが必要なものと考えられる。

## 5 再発防止策

本事故は、本船がタンククリーニング作業中、水酸化ソーダを積載していた2番貨物タンク（右、左）の洗浄を終了し、2番貨物タンク（右、左）の水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されていたスロップタンク（右、左）に移送したことから、水酸化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水が化学反応を起こして硫化水素ガスが発生して同ガスを吸引した乗組員2人が死亡し、2人が硫化水素中毒等に陥ったものと考えられる。

A社は、タンク洗浄水の混合による危険性についての認識がなく、タンク洗浄水の移送作業についてタンククリーニング作業の手順書に記載せず、また、混ぜると化学反応を起こすタンク洗浄水の危険性やスロップタンクの使用方法について乗組員に教育を行っていなかったことから、本船乗組員が水酸化ソーダ洗浄水をアクリル酸洗浄水が貯留されているスロップタンク（右、左）に移送したものと考えられる。

また、本事故の調査において、硫化水素ガスが風上側に拡散する現象は認められなかったことを考えると万一の場合には、スロップタンクの排気管放出口付近にいるときは速やかにスロップタンク排気管放出口の風上側に避難するか、居住区付近にいるときは速やかに閉鎖された居住区に避難し、スロップタンクのマンホールハッチの蓋を開放しないことが必要なものと考えられる。

### 5.1 運輸安全委員会が行った情報提供

運輸安全委員会は、平成23年8月4日、同種事故の再発が懸念されるため、運航者及び船舶所有者に対する注意喚起の目的として国土交通省海事局に対し、別紙のとおり情報提供した。

## 5.2 事故後に講じられた事故等防止策

### 5.2.1 情報提供に対して国土交通省海事局が講じた措置

国土交通省海事局（安全・環境政策課、運航労務課、検査測度課）は、運輸安全委員会からの情報提供を受け、平成23年9月26日、日本内航海運組合総連合会に対し、ケミカルタンカーにおけるタンククリーニング洗浄水の取扱いについて注意喚起するため、以下の点を含む通達を発出した。

スロップタンクにおいて異なる貨物の洗浄水を保管する場合は、洗浄水の混合によって人体に有害な物質が発生する可能性があることに留意し、適切な管理、運用を行うことが必要であること。

このため、ケミカルタンカーの洗浄水の保管等に関し、以下の事項に留意し適切な管理、運用を行うよう、貴会傘下のケミカルタンカーの運航事業者及び船舶所有者に対して周知徹底を図ること。

- ・「スロップタンク内に貯留されている洗浄水にどのような物質が含まれているか」を正確に把握できるよう、洗浄水の性状管理を適切に行うこと。
- ・有害物質の発生の危険性を確認できるよう、「危険物取扱規程」や「製品安全データシート（MSDS）」などにより物質の反応性に関する情報を船舶に提供すること。
- ・「既に貯留されている洗浄水に新たな洗浄水を加えた場合に有害物質が発生する危険がないか」を「危険物取扱規程」や「製品安全データシート（MSDS）」などを用いて確認を行うこと。
- ・洗浄水を海洋に排出できる場合には、こまめな排出を行うこと。
- ・万一、タンク内で何らかの反応が発生した際には、人命に対する危害の恐れに注意して対応すること。

### 5.2.2 A社が講じた措置

A社は、本事故発生後、平成23年7月11日、乗組員及び陸上監査員など合計8人が参加する安全教育会議を開催し、水酸化ソーダ洗浄水の移送方法、タンククリーニング作業中の貨物タンク及びスロップタンクの各マンホールの蓋の開放禁止、スロップタンクの排気管放出口からのガス噴出等緊急時の対応などのタンク洗浄作業についての注意点及び貨物の製品安全データシートを使用した水酸化ソーダを含む貨物の物性について周知した。

また、平成23年9月1日には、上記安全教育会議で周知した水酸化ソーダ洗浄水の移送方法、タンククリーニング作業中の貨物タンク及びスロップタンクの各マンホールの蓋の開放禁止、スロップタンクの排気管放出口からのガス噴出等の緊急時対応等についてタンククリーニング作業手順書に記載し、A社の陸上職員及び運

航しているケミカルタンカーの乗組員に周知した。

### 5.3 事故等防止策

上記のとおり措置が講じられたが、事故の再発を防止するためには、内航海運業者、船舶所有者及び船長は、継続して以下の事項を乗組員に周知し、遵守させる必要がある。

#### (1) タンク洗浄水の危険性の把握及び取扱方法

タンク洗浄水には積載されている貨物が含まれ、貨物と同様の性状特性を有していることを認識し、危険な化学反応を起こすタンク洗浄水を混ぜないため、危険物取扱規程、製品安全データシートの内容を参考に混ぜると危険な貨物の相互反応表を作成するなどして危険なタンク洗浄水を把握し、乗組員に周知するとともに、当該洗浄水を混留させないようにタンク洗浄水の処理方法、スロップタンクの使用方法についてマニュアルなどを作成して乗組員に周知し、遵守させること。

#### (2) 避難の徹底

スロップタンク内の状況を確認せずタンク洗浄水を移送し、化学反応により硫化水素ガス等の物質が発生した場合には、スロップタンクマンホールハッチの蓋の開放は行わず、スロップタンクの排気管放出口付近にいる乗組員は、排気管放出口の風上側に、居住区付近にいる乗組員は、速やかに閉鎖された居住区に避難すること。



運委船第59号  
平成23年8月4日

国土交通省海事局  
安全・環境政策課長 殿

運輸安全委員会事務局  
首席船舶事故調査官



事実調査で得られた情報の提供について

平成23年6月28日に発生した松田汽船株式会社が運航するケミカルタンカー日祥丸乗組員死傷事故の原因については、現在調査中ではありますが、事実調査の過程で下記の事項が確認されましたので、お知らせ致します。

記

1. 事故の概要

日祥丸（以下「本船」という。）は、船長ほか4人が乗り組み、愛知県東海市の東レ株式会社東海工場C4岸壁において、水酸化ソーダ（硫化水素ナトリウム）を揚荷後、平成23年6月28日11時10分ごろ、和歌山港に向けて出港した。

本船は、11時17分頃より清水によるタンククリーニング作業を開始して11時22分頃同作業を終了し、タンク内の洗浄水をスロップタンクに移送するため、カーゴポンプを運転したところ、排気管から白い煙のような物質が噴出した。

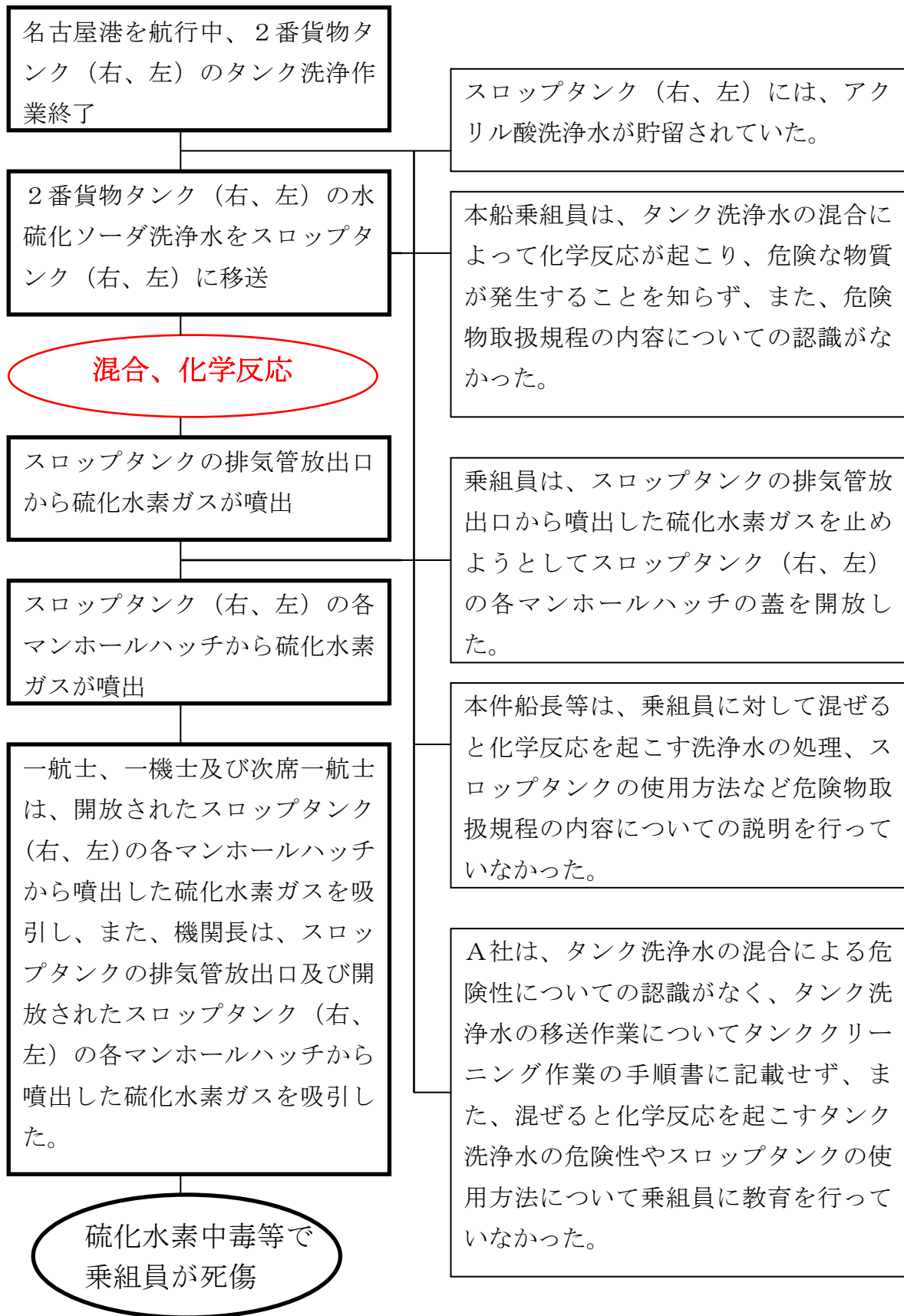
作業をしていた4人のうち3人（一航士、一機士、次席一航士）は、船首方に避難したが、船首楼甲板右舷側のボラード付近で倒れた。

一航士、一機士が硫化水素中毒で死亡し、次席一航士とポンプルームのそばにいた機関長が硫化水素中毒症で負傷した。

2. 事実関係

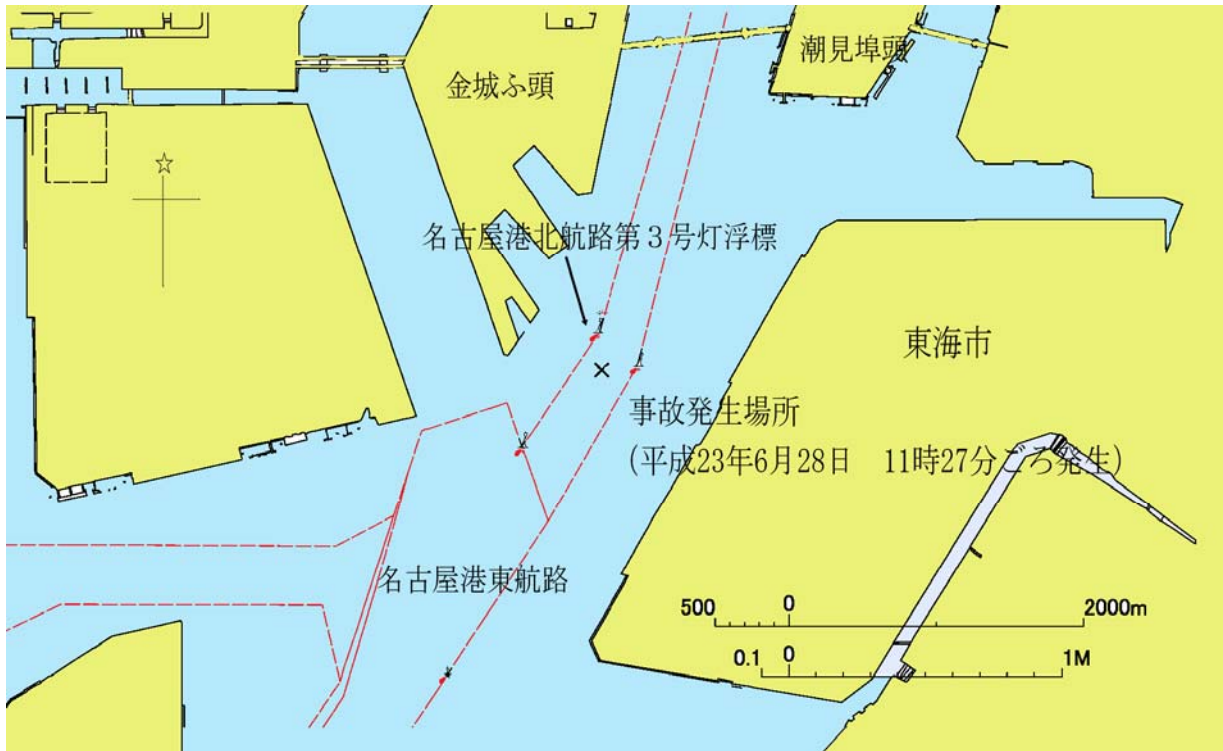
今後の調査により、事実関係を確定することとしておりますが、現在までの調査の結果、アクリル酸を含む洗浄水が入っていたスロップタンクに水酸化ソーダを含む洗浄水を入れた事実が明らかになっており、このことにより硫化水素ガスが発生した可能性が考えられます。また、本船は、以前からスロップタンクに異なる洗浄水を貯留しており、他の事業者のケミカルタンカーについても同様の事実が認められました。

## 付図1 乗組員の死傷に至る要因（まとめ）





付図2 事故発生場所



付図3 本事故発生時の乗組員配置等

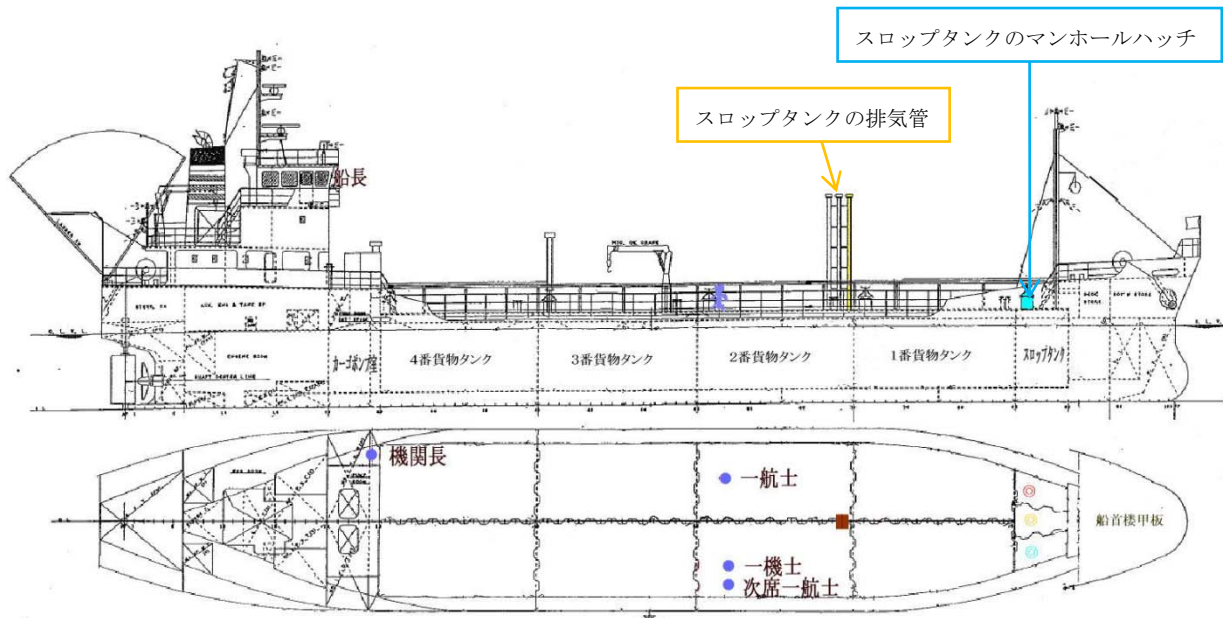


写真1 本船



写真2 船橋から見た膨張トランク上



# 別添1 スロップタンク内の発生物質及び物質発生状況に関する委託調査

## 1. 件名

ケミカルタンカー乗組員死傷事故に係る解析調査

## 2. 目的

アクリル酸 ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ )、45%水硫化ソーダ ( $\text{NaSH}$ ) 及びそれぞれの洗浄水を混合することで発生する物質について、以下の内容を調査する。

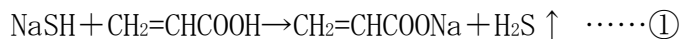
- (1) 発生物質の推定
- (2) 発生物質量の算出
- (3) 発生物質の確認実験

## 3. 調査方法と結果

対象の2液を混合することで発生するガス成分の種類及び容量を明らかにするため、以下の考察を行った。

### 3.1 発生物質の推定

水硫化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水の化学反応式を以下に示す。



当該化学反応式は、弱酸塩と中酸とを混合した場合の一般的な化学反応を示すものであり、このケースでは揮発性の弱酸である硫化水素ガスが発生することになる。

### 3.2 発生物質量の算出

算出に用いたデータ（タンク内残液量及び洗浄水量）を別表1-1に示す。

#### (1) 化学反応

別表1-1に示すとおり、水硫化ソーダとアクリル酸のモル数を比較すると、アクリル酸のモル数が多い。したがって、水硫化ソーダは全量反応し、①式の化学反応は右辺に向けて完了すると考えられる。

#### (2) 発生量の算出

全ての混合条件（別表1-1）においては、①式は100%進行することから、硫化水素ガス発生量は、水硫化ソーダの量に依存することが明らかである。

それぞれの混合条件における混合液中の水硫化ソーダ量及び発生する硫化水素ガス量は別表1-1に示すとおりである。

別表 1-1 実験条件と発生ガス量

船内タンクの残液と洗浄水		混合実験での条件			
		条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
水硫化ソーダ (濃度45%)	タンク残液①	0.117m <sup>3</sup>	0.120m <sup>3</sup>	0.123m <sup>3</sup>	0.117m <sup>3</sup>
	洗浄水②	1.0m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>	0.9m <sup>3</sup>	1.0m <sup>3</sup>
	①+②	1.117m <sup>3</sup>	1.120m <sup>3</sup>	1.023m <sup>3</sup>	1.117m <sup>3</sup>
	溶質濃度	6.3wt%	6.5wt%	7.3wt%	6.3wt%
		1220mol/g	1252mol/g	1283mol/g	1220mol/g
	溶質重量	68445g	70200g	71955g	68445g
アクリル酸	タンク残液③	0.205m <sup>3</sup>	0.246m <sup>3</sup>	0.308m <sup>3</sup>	0.205m <sup>3</sup>
	洗浄水④	4.7m <sup>3</sup>	4.7m <sup>3</sup>	4.7m <sup>3</sup>	5.0m <sup>3</sup>
	③+④	4.905m <sup>3</sup>	4.946m <sup>3</sup>	5.008m <sup>3</sup>	5.205m <sup>3</sup>
	溶質濃度	4.4wt%	5.2wt%	6.6wt%	4.4wt%
		2989mol/g	3587mol/g	4492mol/g	2989mol/g
	溶質重量	215455g	258546g	323708g	215455g
硫化水素ガス発生値	計算値	27.3m <sup>3</sup>	28.0m <sup>3</sup>	28.7m <sup>3</sup>	27.3m <sup>3</sup>

注1)：溶質濃度の算出では、水硫化ソーダ濃度45wt%、比重1.3、アクリル酸純度100wt%とし、それぞれの洗浄水は純水とみなした。

注2)：硫化水素ガス発生量の計算値は、水硫化ソーダ量 (m<sup>3</sup>) × 1000 × 比重 × 0.45 / 56.063 (モル質量) × 1000 × 22.4 (標準状態：絶対0°、1気圧) / 1000

注3)：タンク残液とは、スロップタンクへの移送配管内の残留量とスロップタンクに移送した貨物タンク内のストリップング残量の合計量をいう。

### (3) 発生量とスロップタンク (右、左) 等の残容積との比較

(2)で算出した硫化水素ガス発生量と残容積とを比較した。条件1では、残容積が約25.3m<sup>3</sup> (スロップタンク：約24.6m<sup>3</sup>、マンホールハッチ：約0.5m<sup>3</sup>、排気管：約0.2m<sup>3</sup>) であり、発生量が約2.0m<sup>3</sup> 多くなる。硫化水素ガスが全て発生した場合、排気管放出口から大気中へ排出される可能性があり、他の条件も同様に発生した硫化水素ガスが排気管放出口から排出される可能性があると考えられる。

### 3.3 発生物質の確認実験

推定される発生物質やその発生ガス濃度の確認実験を行った。ただし、発生ガス濃度測定は、別表1-1の条件を全量反応させることができないため、混合量を2万分の1に縮小し測定した。各条件の縮尺及びその液量を別表1-2に示す。実験の様子を別図1-1及び別図1-2に示す。

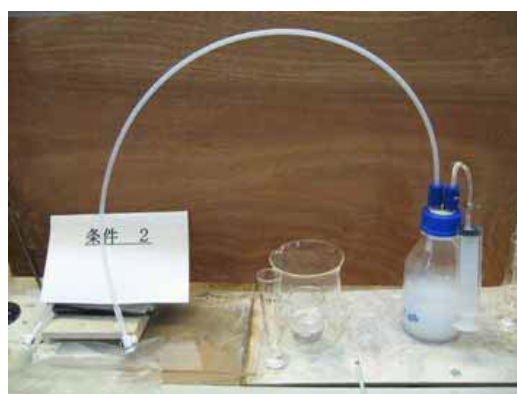
#### (1) 混合条件

- ① 混合比：水硫化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水とを別表1-1の条件の割合で混合する。
- ② 混合時の溶液温度：水硫化ソーダ洗浄水は60℃、アクリル酸洗浄水は29℃とした。

- ③ 反応装置：ガラス製反応ビン（580ml）に溶液を注入することで硫化水素ガスを発生させた。
- ④ 発生ガスの捕集：各溶液を混ぜた後、約5分後に発生したガスの初めの数百mlを廃棄し、その後のガスについて濃度を測定した。発生したガスの初めの数百mlにはガス流路に残った空気が多く含まれているためである。
- ⑤ 発生ガス濃度の測定：真空法ガス採取器を用いてガス採取を行い、北川式ガス検知管120SHで硫化水素ガスの濃度を測定した。
- ⑥ 北川式ガス検知管120SH：仕様は別図1-3に示すとおりである。

別表1-2 各条件の縮尺及びその液量

条件	縮尺	水酸化ソーダ (ml)	洗浄水(60℃) (ml)	アクリル酸 (ml)	洗浄水(29℃) (ml)
条件1	1/20893	5.6	48	10	225
条件2	1/21429	5.6	47	12	219
条件3	1/21964	5.6	41	14	214
条件4	1/20893	5.6	48	10	239



別図1-1 実験装置



別図1-2 反応ビン

●仕様

検知剤 (淡青色)	
測定範囲	0.1~4.0%
試料採取量	100mL
測定時間	1分間/100mL
検知剤の変色	淡青色 → 黒色
検知限度	50ppm
使用温度範囲	0~40℃
湿度の影響	なし
反応原理	硫酸銅と反応して硫化銅を生成する。 $H_2S + CuSO_4 \rightarrow CuS$

別図1-3 北川式検知管仕様

## (2) 実験の結果

水硫化ソーダ洗浄水とアクリル酸洗浄水は共に透明な液体であるが、混合すると反応して白濁色となる（別図1-2参照）。発生したガスは無色であり、腐卵臭がした。ガスは混合直後から発生し始めた。ガスを採取すると検知管が変色し、硫化水素ガスが発生したことが分かった。その様子を別図1-4に示す。

次に硫化水素ガス測定結果を別表1-3に示す。また、今回の実験では検知管の測定範囲を大きく上回る結果となってしまうため、試料採取量を12.5mlとし、測定結果は100ml換算とした。

別表1-3 硫化水素ガス測定結果

条件	H <sub>2</sub> S測定値 (採取量12.5ml) (%)	H <sub>2</sub> S測定値 (採取量100ml) (%)
条件1	2.8	22.4
条件2	3.0	24.0
条件3	3.2	25.6
条件4	2.7	21.6



別図1-4 検知管（変色の様子）

## 4. まとめ

本調査によって以下の事項が明らかとなった。

### (1) 発生物質の推定

アクリル酸 ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) と水硫化ソーダ ( $\text{NaSH}$ ) を混合することで「硫化水素ガス」が発生する。

### (2) 発生物質量の算出

水硫化ソーダ洗浄水が全量反応して硫化水素ガスが発生し、硫化水素ガス発生量はスロップタンク（右、左）等の残容積より大きくなり、スロップタンクの排気管放出口から、発生した硫化水素ガスが噴出した可能性があると考えられる。

### (3) 発生物質の確認実験

硫化水素ガスが発生することを確認した。また、各洗浄水を混合し、発生したガスの硫化水素ガス濃度を測定した。高濃度の硫化水素ガスが検出された。

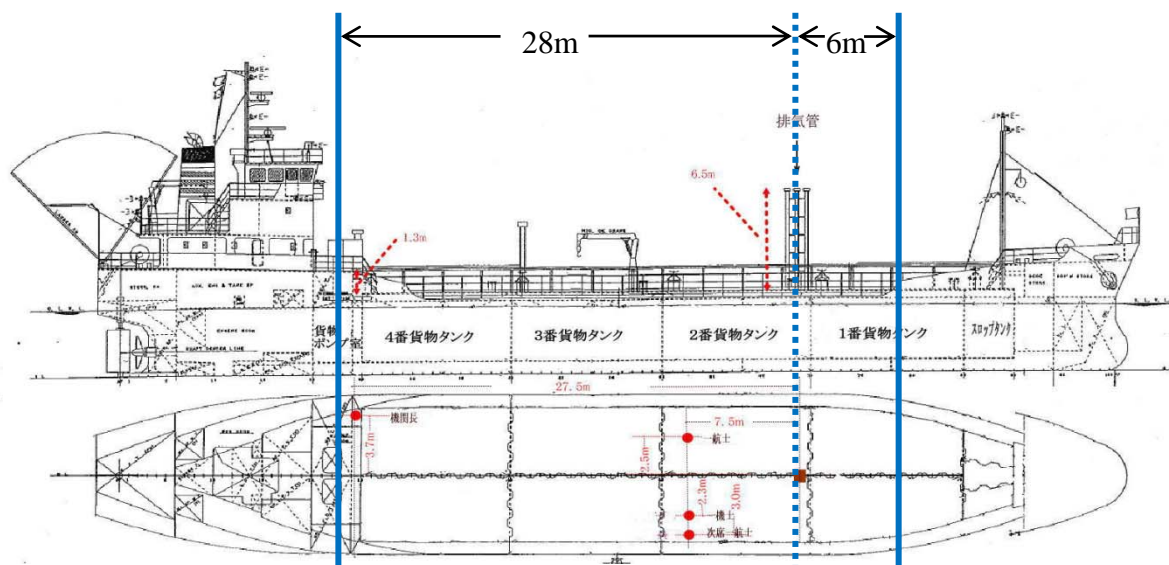
## 別添2 スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響についての委託調査

### 1. 調査の概要

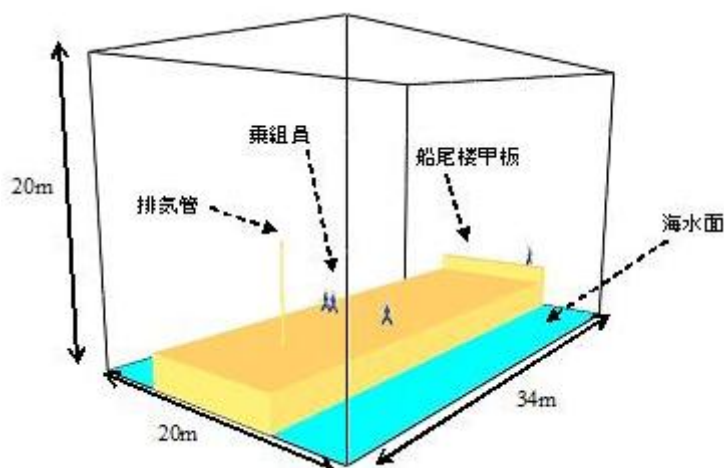
流れ場の基礎方程式に基づく数値シミュレーション方法、いわゆる数値流体解析により排気管放出口から噴出した硫化水素ガスの拡散状況を計算し、ガス濃度の時空間変化を求めた。

### 2. 解析対象

本解析で用いる数値シミュレーション方法は、一般に計算機負荷が高いため、当該船舶全体及びその周辺海域を解析対象とするのではなく、別図2-1に示すように船体の一部を解析対象とした。船首尾方向にはスロップタンクの排気管放出口から船首方に6m、船尾方に28mとし、左右舷方向には海面上も含め20mとした。事故時の喫水は船首で1.25m、船尾で3.30mであったことから、対象範囲での喫水は2.3mで一定であると仮定し、鉛直方向には海面上から上空20mまでを計算対象とした。計算対象を簡略化するため、甲板上の機器、設備等は無視し、一様な平面であると仮定した。ただし、硫化水素ガスの漏えい源であるスロップタンクの排気管1本分については計算モデルに含めた。また、事故前に機関長が立っていた船尾楼甲板の一部（船尾方向に1m分）を考慮し、その高さ分（1.3m）のみを計算モデルに含めた。本解析で用いた計算対象のモデルを別図2-2に示す。



別図2-1 計算対象とする船首尾方向の範囲（青色の実線の範囲）



別図 2-2 計算対象のモデル図

### 3. 数値計算方法

本計算で使用した CFD (Computational Fluid Dynamics) コードは、米国商務省 National Institute of Standards and Technology (NIST) で開発された Fire Dynamics Simulator (FDS) <sup>[1],[2]</sup> であり、その主な特徴を以下に示す。

- ・ 低 Mach 数近似が成り立つ流れ場を対象
- ・ 乱流場の解析は Large Eddy Simulation (LES) によって行い、SGS (Subgrid Scale) モデルとして Smagorinsky モデルを採用
- ・ 混合分率を用いた物質輸送を行い、渦消散モデルと酸素消費法を組み合わせた乱流拡散燃焼モデルを火源のモデルとして採用
- ・ 輻射伝熱の影響は、非散乱性気体の輻射輸送方程式を有限体積法的に解くことで評価
- ・ 空間微分項の離散化には 2 次精度中心差分スキーム、対流項には局所クーラン数をパラメータとした風上差分スキームが用いられている。時間積分は 2 次精度の予測子・修正子法による陽解法を使用、計算格子は矩形の直交格子であり、マルチブロック格子にも対応

・ MPI (Message Passing Interface) ライブラリを利用した並列計算が可能  
 本計算では燃焼現象を取り扱うことはなく、等温場の物質輸送現象を対象としているため、数値的に解かれる流れ場の支配方程式は、質量保存式、運動量保存式、発散拘束条件、質量分率の保存式及び状態方程式からなる。

乱流場の解析は Large Eddy Simulation (LES) によって行い、基礎 SGS (Subgrid Scale) モデルである Smagorinsky モデル<sup>[3]</sup>を使用している。Smagorinsky

[1]～[6]は、巻末の参考文献を示す。



モデルは、簡潔であることと数値計算の安定性が良いことから工学的に広く用いられているが、本解析調査で対象とするような実用解析では、計算領域に対して十分な計算格子数を確保することが難しいことから、局所的にモデル定数を決定することができるSGSモデルの一つであるコヒーレント構造 Smagorinsky モデル (CSM)<sup>[4]</sup>を採用した。層流場では、コヒーレント構造が無くなるため、自動的にモデル係数がゼロとなり、壁面近傍においてもSGSモデルが正しい振る舞いをすることが保証されている。CSMは、バックステップ流れ、ディフューザー流れ、千鳥格子流れ等の複雑物体周りの流れ場を対象に性能評価が行われ、実験とも良好に一致することが確認されている。<sup>[5]</sup>

本解析調査シミュレーションでは、上記のCSMをFDS Ver. 5.5のソースプログラムに独自に組み込んだものを使用した。

#### 4. 計算条件

計算に必要な条件は仕様書に従って設定した。ただし、気流の境界条件として鉛直方向の速度分布が必要であるため、次式で表わされるべき乗則から算出した。

$$u(z) = u_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

ここで、 $z_0$ は風速の計測点の高さ、 $u_0$ は $z = z_0$ での風速である。指数 $\alpha$ は大気安定度に依存するパラメーターであるが、事故時の天候に関する情報から判断すると大気安定度はC(やや不安定な状態)あるいはD(中立状態)と推測される。広範な空間領域が解析対象となる大気拡散現象とは異なり、本解析ではケミカルタンカー近傍の局所的な空間範囲を対象としているため、大気安定度がDの中立状態であるとみなし、 $\alpha = 0.15$ とした<sup>[6]</sup>。

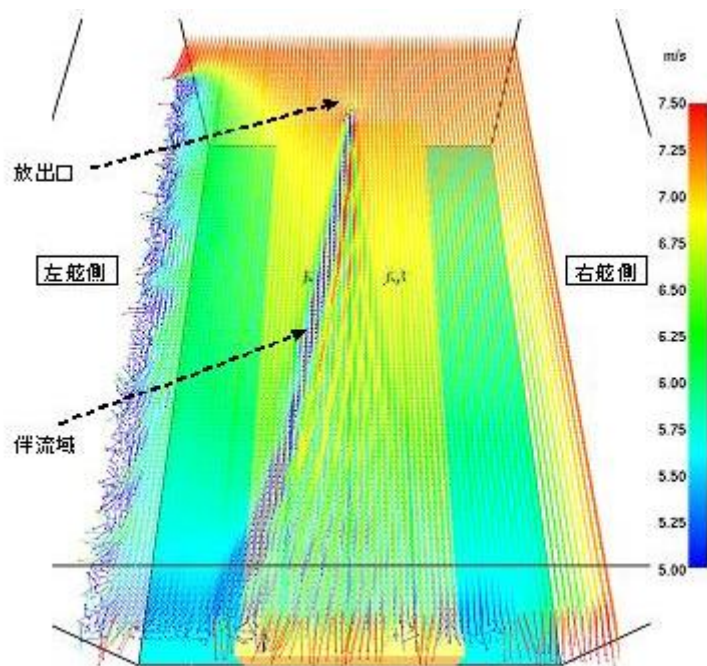
本解析で用いた計算格子は矩形の直交格子であり、水平方向の格子幅を0.125m、鉛直方向の格子幅を0.25mとした。それゆえ、使用した総格子数は $272 \times 160 \times 80 = 3,481,600$ 点である。また、排気管の水平断面には1格子分を割り当てたため、実際の排気管断面積(0.0095m<sup>2</sup>)よりも65%程度大きい設定となった。このため、硫化水素ガスの実際の流出速度は鉛直上方に約70m/sであったと考えられるが、本解析では断面積が大きい分流出速度が低下し、約42.7m/sとして計算を行った。放出口の高さよりも下方にいる乗組員への影響を調査するという観点からは、安全側(保守側)の評価を行う条件設定となっている。実際の流出速度に合わせた計算を行うには、より密な計算格子を用いる必要があるが、これによる計算時間の増大は好ましくないと考え、上述の計算格子を用いて計算を行った。

計算結果の初期値依存性を排除するため、計算領域内の気流場が充分発達した状態に到達するまでの最初の15秒間は空気のみ流れ場の計算を行い、計算開始後15

～18秒までの3秒間に放出口から硫化水素ガスを噴出させた。噴出終了後の硫化水素ガスの挙動を解析するため、更に7秒間の計算を行い、全体として25秒間のシミュレーションを実施した。

## 5. 計算結果及び考察

計算領域内の気流場の一例として、海面上8.5mにおける水平断面上の速度分布を別図2-3に示す。これは計算開始から15秒後の十分発達した気流場（瞬時値）を表わしている。排気管放出口から0.3m下方での速度分布であるため、排気管が障害物として気流場に作用し、その背後に低速の伴流域が形成されていることが分かる。風向を右舷船首5°として境界条件を設定しているため、伴流が左舷側に傾いている様子が観察される。また、この断面上の流速を前章で示したべき乗則から見積もると、 $7.4 \times (8.5/9.5)^{0.15} \approx 7.28$  [m/s]となり、別図2-3の排気管放出口周辺で同程度の流速が得られていることが確認できる。しかし、放出口より風下側では境界条件の影響により、想定している流速よりも低くなっている。この気流場を用いた漏えいガスの移流拡散解析は安全側の評価を行うことになるため、本解析調査に必要な気流場がおおむね再現されていると判断し、以下のシミュレーションを実施した。

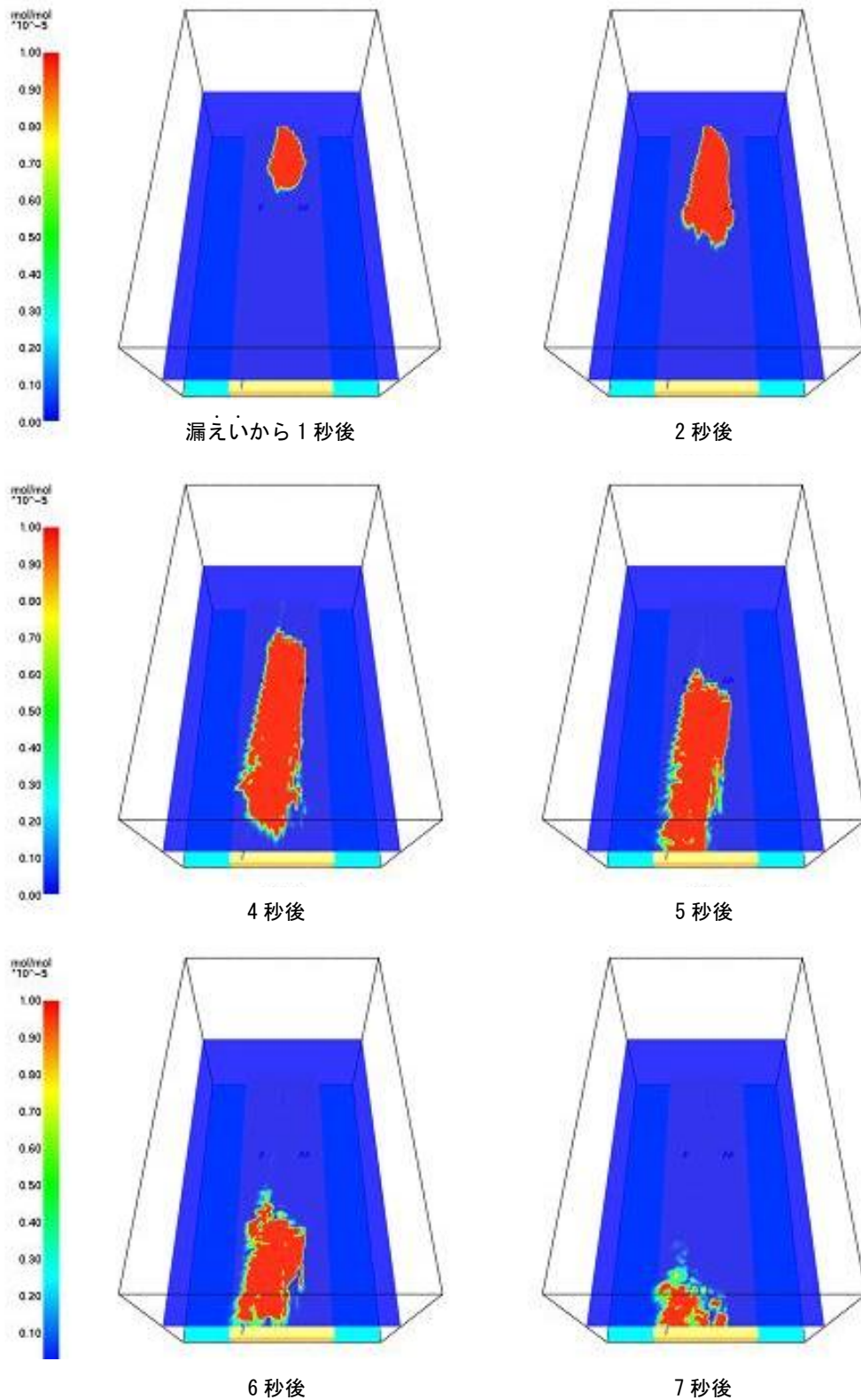


別図2-3 海面上8.5mにおける水平断面上の速度分布

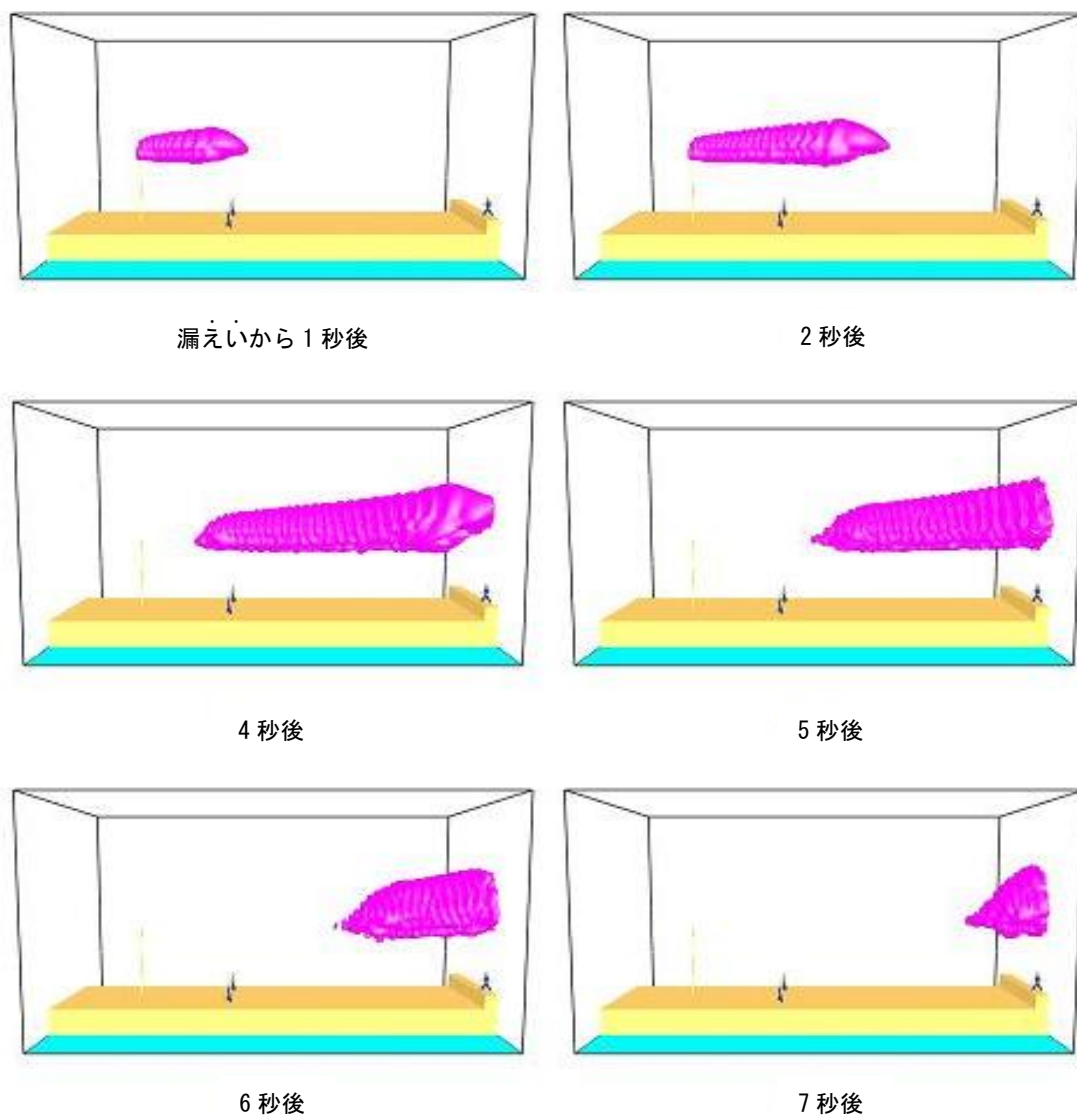
(計算開始から15秒後の十分発達した気流場（瞬間値）を表わしている)

まず、スロップタンクの排気管放出口を含む水平断面上での硫化水素ガスの濃度分布を別図2-4に示す。硫化水素ガスの漏えい開始から3秒後の結果を除き、1秒ごとに7秒後までの濃度分布を示している。硫化水素ガスによる人的影響の有無を判断する指標の一つとして労働安全衛生法で規制されている管理濃度10ppmを取り上げ、

10 ppm 以上の高濃度領域を全て赤色で表わしている。漏えいした硫化水素ガスは、風下側に進むにつれて周囲空気との混合作用により分布形状が乱れ、高濃度領域（赤色）の幅が拡大している様子が観察される。



別図 2-4 排気管放出口を含む水平断面上での硫化水素ガスの濃度分布



別図2-5 硫化水素ガス濃度が10 ppmの等値面の時間変化

次に、高濃度の硫化水素ガスが占める空間範囲を3次的に確認するため、管理濃度10 ppmの等値面の時間変化を別図2-5に示す。スロップタンクの排気管放出口から流出した硫化水素ガスは、細長いガス塊を形成しながら航海船橋等のある風下側に流されて行くことが分かる。このガス塊の先端部にはボア (bore) が形成されており、一般に空気よりも重い高密度ガスの重力流で見られる現象と一致している。それゆえ、別図2-4及び2-5に示した濃度分布は少なくとも定性的には妥当な計算結果であると考えられる。

また、図中に示している乗組員4人は避難前に立っていた位置（前方3人、後方1人）に配置しており、ケミカルタンカーの計算モデルの寸法と整合するように身長1.7 mとして大きさを設定している。別図2-4及び2-5に示した濃度分布からは、

仮に4人の乗組員全員が避難することなく、事故前の配置位置に留まっていたとしても排気管放出口から流出した硫化水素ガスは上を通り、影響を全く受けないことが分かる。実際、計算結果から4人の乗組員の頭部位置における濃度の時間履歴を調べたところ、硫化水素ガスの流出時刻 ( $t=15$  秒) からシミュレーションの終了時刻 ( $t=25$  秒) まで全て  $0$  ppm であった。しかし、本解析調査では当該船舶の船体の一部を解析対象とし、甲板上の機器、設備類を全て無視する等、多くの仮定に基づいた数値シミュレーションを行っており、実際には船体の船首部や甲板上の物体により船上の気流場は乱される可能性がある。前方3人の位置では、スロップタンクの排気管放出口に近いことから、そうした気流場の乱れは大きいとは考えられず、計算結果をそのまま適用して、被害を受ける可能性は極めて低いと考えても妥当であろう。しかし、スロップタンクの排気管放出口から離れた後方1人の位置では、①船首部から距離があり、船首部や甲板上の物体による乱れ(渦等)の影響が前方に比べて大きくなること、②前方3人の位置より若干高い位置で、硫化水素ガスが流れる高さに近づくこと、③すぐ後方には船尾楼甲板の壁、横にはポンプルームのコンパニオンと、周囲に複雑な形状の構造物があり、これらの影響も排除できないこと等の理由から空気の  $1.18$  倍の比重を持つ硫化水素ガスの一部が近傍に到達した可能性を完全には否定できない。

## 6. 結論

「ケミカルタンカーA丸」の乗組員死傷事故を想定し、スロップタンクの排気管放出口から噴出した硫化水素ガスが乗組員に与えた影響を調査するため、計算流体力学的手法を用いて排気管放出口から噴出した硫化水素ガスの拡散状況を数値的に再現した。その結果、噴出した硫化水素ガスは、船首楼甲板のある風上側に移流拡散する現象は再現されず、また  $10$  ppm 以上の高濃度の硫化水素ガスが甲板近傍まで拡散する現象は再現されないことが分かった。本解析調査の数値シミュレーションは多くの仮定に基づいていることを考慮しても、スロップタンクの排気管放出口の比較的近傍に配置していた乗組員3人については、仮に避難することなく、各人がその場に留まっていたとしても被害を受ける可能性は極めて低いことから、本死傷事故の発生は別の原因によるものと考えるのが妥当である。しかし、後方にいた乗組員1人については、船の後方で乱れの影響が大きくなること、前方3人の乗組員より位置が高かったこと、周囲に複雑な形状の構造物があったことなどから、漏えいした硫化水素ガスの一部が到達した可能性を完全に否定はできない。

## 7. 参考文献

- 1) K. McGrattan, S. Hostikka, and J. Floyd, 'Fire Dynamics Simulator (Version 5) User' s Guide' , NIST Special Publication 1019-5, (2009).
- 2) K. McGrattan, et al., 'Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model' , NIST Special Publication 1018-5, (2009).
- 3) J. Smagorinsky, 'General Circulation Experiments with the Primitive Equations' , Monthly Weather Review, Vol.91, No.3, pp.99-164, (1963).
- 4) H. Kobayashi, 'The Subgrid-Scale Models based on Coherent Structures for Rotating Homogeneous Turbulence and Turbulent Channel Flow' , Physics of Fluids, Vol.17, 045104, (2005).
- 5) H. Kobayashi, F. Ham, and X. Wu, 'Application of a Local SGS Model Based on Coherent Structures to Complex Geometries' , International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.29, pp.640-653, (2008).
- 6) 'Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases' , Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, (New York, 1999), ISBN:0-8169-0786-2.