

船舶事故調査報告書

船種船名 旅客フェリー 万葉

船舶番号 141350

総トン数 1,551トン

事故種類 船体傾斜

発生日時 平成23年11月18日 08時05分ごろ

発生場所 長崎県五島市福江島北東方沖

五島市所在の赤ハエ鼻灯台から真方位098° 1.4海里付近

(概位 北緯32° 44.8' 東経128° 54.5')

平成25年2月14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>

旅客フェリー^{まんよう}万葉は、船長ほか13人が乗り組み、旅客316人を乗せ、車両21台などを積載して福江島北東方沖を北東進中、平成23年11月18日(金)08時05分ごろ船体が左舷側に大傾斜した。

万葉では、旅客3人が負傷し、トラック10台及び乗用車2台に凹損などを生じるとともに、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉が曲損するなどの損傷を生じた。

<原因>

本事故は、万葉が、福江島北東方沖を北東進中、南東風を右舷側に受けて左舷側に

傾斜を生じていたところ、右舷正横の後方から波高約4～5 mの波を受けたため、左舷側に最大で約27°の傾斜を生じ、旅客が、長椅子から投げ出され、また、壁に当たるとともに、車両が横移動したことにより発生したものと考えられる。

万葉が、波高約4～5 mの波を受けたのは、本事故発生場所付近の海域においては、潮流が南東方へ流れ、波向南東方の波高約2～3 mの波が発生していたことから、他の海域に比べて高波高の波が発生し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

旅客フェリー万葉^{まんよう}は、船長ほか13人が乗り組み、旅客316人を乗せ、車両21台などを積載して福江島北東方沖を北東進中、平成23年11月18日（金）08時05分ごろ船体が左舷側に大傾斜した。

万葉では、旅客3人が負傷し、トラック10台及び乗用車2台に凹損などを生じるとともに、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉が曲損するなどの損傷を生じた。

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11月18日、本事故の調査を担当する主管調査官（長崎事務所）ほか1人の地方事故調査官を指名した。

なお、後日、主管調査官として新たに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11月21日、25日、平成24年6月19日、10月25日 口述聴取及び回答書受領

平成23年12月6日、7日、平成24年1月20日、23日、2月7日、9日、16日、17日、3月17日、5月23日、6月19日、9月25日 回答書受領

平成23年12月15日、16日、平成24年1月12日、13日 現場調査

平成23年12月26日、平成24年3月23日、6月20日、7月11日、18日 口述聴取

1.2.3 調査の委託

本事故に関し、独立行政法人海上技術安全研究所に万葉の船体傾斜及び荷崩れに関する調査を委託した。

1.2.4 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

2.1.1 船舶自動識別装置の情報記録による運航状況

民間会社が受信した船舶自動識別装置^{*1}の情報記録によれば、平成23年11月18日07時52分12秒から09時33分23秒までの間における万葉（以下「本船」という。）の運航状況は、次のとおりであった。

時刻 (時:分:秒)	緯度 (度-分-秒)	経度 (度-分-秒)	対地針路 (°) *	船首方位 (°) *	対地速力 (ノット・kn)
07:52:12	32-42-16.3	128-51-31.1	046.0	044	11.6
07:52:32	32-42-19.1	128-51-34.6	045.9	044	12.1
07:53:51	32-42-30.9	128-51-49.1	045.9	045	13.8
08:03:13	32-44-28.1	128-54-08.5	047.9	045	18.6
08:04:48	32-44-49.1	128-54-32.7	053.1	051	16.9
08:05:44	32-44-59.5	128-54-47.8	047.0	043	17.5
08:07:25	32-45-20.9	128-55-12.3	040.2	042	18.3
08:08:50	32-45-40.5	128-55-33.2	038.9	040	18.8
08:09:34	32-45-50.7	128-55-43.4	041.1	034	18.5
08:12:55	32-46-41.6	128-56-29.3	041.1	041	19.0
08:17:07	32-47-30.7	128-57-43.0	061.4	060	19.3
08:35:22	32-48-21.7	128-59-14.6	019.3	007	07.3
08:37:04	32-48-28.6	128-59-02.8	251.7	232	08.2
08:43:05	32-47-48.4	128-57-52.3	234.2	232	15.0

^{*1} 「船舶自動識別装置 (AIS: Automatic Identification System)」とは、船舶の識別符号、種類、船名、船位、針路、速力、目的地及び航行状態等に関する情報を各船が自動的に送受信し、船舶相互間、陸上局の航行援助施設等との間で情報を交換することができる装置をいう。

08:45:29	32-47-23.6	128-57-21.3	224.0	223	15.2
08:49:11	32-46-43.2	128-56-35.8	223.9	224	15.0
08:56:05	32-45-21.7	128-55-51.8	197.7	195	11.6
09:28:18	32-42-31.8	128-51-40.3	244.6	243	13.4
09:29:06	32-42-27.2	128-51-29.4	244.5	242	12.9
09:33:23	32-41-50.2	128-51-17.0	191.4	198	06.1

*：対地針路及び船首方位は真方位を示す。以下同じ。

2.1.2 乗組員等の口述による事故の経過

本船の船長、一等航海士、次席甲板手、九州商船株式会社（以下「A社」という。）の安全統括管理者（常務）及び運航管理者の口述によれば、次のとおりであった。

(1) 出港から本事故発生までの経過

本船は、船長、一等航海士及び次席甲板手ほか11人が乗り組み、旅客316人を乗せ、車両21台及びコンテナ^{*2}4個を積載し、平成23年11月18日出港予定時刻である07時40分を約4分遅れて07時44分ごろ、視程約1海里（M）の状況の下、福江港を出港して長崎県新上五島町奈良尾港に向かった。

本船は、出港後、出港部署配置を解き、約4分の遅れを取り戻すために両舷の主機回転数を増し、プロペラを回転数毎分（rpm）176とした。

本船は、07時50分ごろ、船長の指揮の下、一等航海士及び二等航海士がレーダーによる見張りに就き、次席甲板手が手動操舵を行い、針路約043°～044°で航行した。

本船は、福江港外の防波堤を通過後、フィスタビライザ^{*3}を作動させた。

本船は、五島市屋根尾島と同市多々良島^{たたら}の間の南水道付近において、南東方からの波高約2～3mの波を右舷側に受けながら航行した。

船長は、波を右舷船尾方から受ける姿勢とするために波の到来に合わせて

^{*2} 「コンテナ」とは、反復使用できるような耐久性を有する箱型の輸送容器をいう。本船では、鋼製であり、縦×横×高さが1.6m×1.6m×1.6mのものを積載していた。

^{*3} 「フィスタビライザ」とは、船底近くの両舷外板から水中に翼を突き出し、航行中に翼に生じる揚力を利用して船体の横揺れを減少させる装置をいう。

左舵約 5° ～ 10° を次席甲板手に取らせながら航行した。

船長は、多々良島南東方沖において、視程が回復してきたので、二等航海士を休憩させるため、降橋させた。

本船は、多々良島東方の海域において、波高が低くなったので、それまで波の到来に合わせて取っていた左舵約 5° ～ 10° をやめ、手動操舵で針路約 044° として航行した。

本船は、多々良島と五島市^{ひさか}久賀島南岸の間の北水道付近で再び南東方からの波高約2～3mの波を右舷側に受けるようになったので、船長が、右舷船尾方から波を受ける姿勢とするために波の到来に合わせて左舵約 5° ～ 10° を次席甲板手に取らせながら航行した。

本船は、波の到来に合わせて左舵を取っており、柱瀬^{はしらせ}*4に近づいていたので一等航海士は、レーダー映像で柱瀬までの距離と方位を船長に報告していた。

船長は、右舷正横から来る波高約4～5mのうねりのような大きな波を認め、左舵 15° を次席甲板手に命じた。

次席甲板手は、左舵 15° を取り、舵角指示器の指針が振れ始めたことを確認した。

船長は、一等航海士から「左 30° 1.5Mに柱瀬があります」との報告を受け、左舵 15° を取るように命じた後、左旋回を期待していたが、本船は、08時05分ごろ、舵効が現れる前、右舷正横の若干後方から大きな波を受けて左舷側に大きく傾斜した。

船長は、傾斜が収まった後、傾斜計で左舷側への定傾斜角が約 4° であり、最大傾斜角を記録する針が約 35° を示していることを確認した。

(付図1 事故発生場所(その1)、付図2 事故発生場所(その2)、付図3 推定航行経路図 参照)

本事故の発生日時は、平成23年11月18日08時05分ごろであり、発生場所は、赤ハエ鼻灯台から 098° 1.4M付近であった。

(2) 本事故発生から福江港入港までの経過

船長は、一等航海士に対し、旅客の負傷等の有無を事務長に調査させるよう指示するとともに、昇橋した二等航海士に対し、車両甲板内の車両等の状

*4 「柱瀬」とは、北緯 $32^{\circ} 46.3'$ 東経 $128^{\circ} 54.7'$ の位置にある水深1.3mの暗岩をいう。

況を確認するように指示した。

船長は、運航管理者に大傾斜した旨の電話連絡を行ったが、状況を確認した後報告するように指示を受けた。

船長は、機関員に対し、昇橋して主機の操作を行うように指示した。

船長は、波が高い海域を抜けるまで全速力前進で航行を続け、波高が低くなってから、半速力前進、微速力前進まで減速した。

一等航海士は、二等航海士が操舵室に戻り、車両甲板の状況の報告を受けた後、車両甲板で荷崩れが生じているので、船長に福江港に引き返すように進言した。

船長は、このまま奈良尾港に向かうのは危険であると判断し、波高が更に低くなる五島市^{かぼ}杵島北方の海域まで航行した後、福江港に引き返した。

本船の車両甲板に積載された車両の固縛用ベルトは、破断したり、外れたりしており、車両は、左舷側に横移動していた。

破断したり、外れたりした固縛用ベルトは、乗組員によって取り直された。

船長は、再度、左舷側への傾斜を確認したところ、約3°の定傾斜となっているのを認めた。

本船は、乗組員により定傾斜をなくすためにバラストの調整が行われた。

本船は、09時41分ごろ福江港に入港して着岸した。

2.1.3 旅客室の状況

本船の事務長及び負傷した旅客3人（以下「旅客A」、「旅客B」及び「旅客C」という。）の口述によれば、次のとおりであった。

本船は、荒天のために欠航したジェットフォイル^{*5}に乗船を予定していた旅客が本船に乗船することを希望し、旅客室内は、ふだんより混雑していた。

事務長が、案内所の前において、揺れに備えて案内所前の高い椅子には腰を掛けないように要請したり、通路を通る旅客に対し、揺れに十分注意するように声を掛けたりしていたとき、本船が大きく傾斜した。

旅客Aは、操舵室甲板前方右舷側のバリアフリー客室内の長椅子に左舷側に向いて腰を掛けていたところ、大きな揺れにより、長椅子から投げ出され、前方の木製格子に顔面が当たった。

旅客Bは、船橋甲板中央付近左舷側の2等客室内で左舷側に頭を向けて寝ていたところ、大きな揺れと共に足が上がる状態となり、他の旅客がぶつかり、壁に頭が

*5 「ジェットフォイル」とは、全没型の水中翼の揚力を利用して船体を完全に海面上に持ち上げ、ウォータージェット推進器によって後方から水を噴射して推力を得て翼走する船舶をいう。

当たった。

旅客Cは、船橋甲板中央付近左舷側の2等客室内で新聞紙を敷いた上にあぐらを組んで本を読んでいたところ、急に傾いて壁まで滑り、他の旅客が乗った状態で壁に首が当たった。

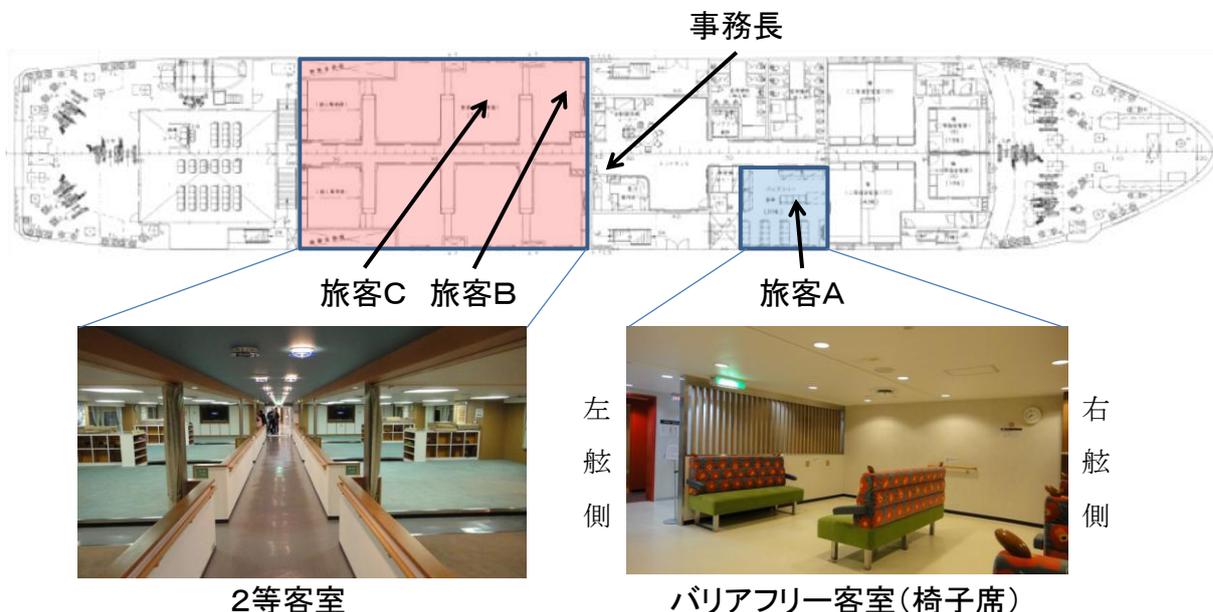


図 2.1 本事故発生時の負傷した旅客の位置

事務長は、本船が傾いたとき、案内所の出入口付近におり、傾斜が収まった後、駆け付けた司厨長及び司厨員と共に旅客の対応に当たった。

本船の客室内は、傾いた後、旅客が折り重なるようになっていたり、敷かれていたじゅうたんがずれ、荷物が転がっていた。

事務長は、旅客に対し、怪我をしていたら申し出るよう言って回っていたところ、旅客Cから頭を打った旨の申出があり、また、福江港に入港後、旅客A及び旅客Bから体を打った旨の申出があり、A社福江支店職員が病院に案内した。

負傷した旅客3人は、揺れに備えるための案内を受けていなかった。

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷に関する情報

診断書によれば、次のとおりであった。

旅客Aは、病院で診察を受け、約7日間の加療を要する右顔面打撲であった。

旅客Bは、病院で診察を受け、約10日間の安静加療を要する頸椎捻挫であった。

旅客Cは、病院で診察を受け、約2週間の加療を要する頸椎捻挫であった。

2.3 船舶等の損傷に関する情報

本船は、車両甲板内の車両の移動により、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉に曲損を生じ、車両甲板内のフレーム及び側壁に擦過傷を生じた。

本船に積載していた車両のうち、トラック10台及び乗用車2台に凹損などを生じた。

2.4 乗組員等に関する情報

(1) 性別、年齢、海技免状等

船長 男性 49歳

三級海技士（航海）

免許年月日 平成7年1月12日

免状交付年月日 平成22年2月16日

免状有効期間満了日 平成27年3月7日

一等航海士 男性 43歳

三級海技士（航海）

免許年月日 平成18年3月27日

免状交付年月日 平成23年7月6日

免状有効期間満了日 平成28年7月5日

次席甲板手 男性 29歳

事務長 男性 57歳

運航管理者 男性 63歳

旅客A 男性 41歳

旅客B 女性 49歳

旅客C 男性 50歳

(2) 主な乗船履歴及び健康状態

船長、一等航海士及び次席甲板手の口述並びにA社の回答書によれば、次のとおりであった。

① 船長

昭和55年10月にA社へ入り、司厨員として各船に乗り組んだ後、四級海技士（航海）免状を取得し、昭和59年から甲板部員になり、三級海技士（航海）免状を取得して平成11年から二等航海士、平成14年から一等航海士として乗船しており、専任の船長の休暇中に船長職に就いていた。

健康状態は良好であり、視力及び聴力は正常であった。

② 一等航海士

昭和62年にA社へ入り、甲板部員として各船に乗り組んだ後、平成18年に三級海技士（航海）免状を取得して二等航海士となり、平成22年11月から一等航海士の職に就いていた。

健康状態は良好であり、視力及び聴力は正常であった。

③ 次席甲板手

約2年前にA社へ入り、甲板員として乗り組んでいた。

健康状態は良好であり、視力及び聴力は正常であった。

2.5 船舶等に関する情報

2.5.1 船舶の主要目

(1) 本船

船舶番号	141350
船籍港	長崎県長崎市
船舶所有者	A社
総トン数	1,551トン
Lr×B×D	82.49m×14.50m×10.40m
全長	86.50m
垂線間長 ^{*6}	78.00m
船質	鋼
機関	ディーゼル機関2基
出力	2,942kW/基 合計5,884kW
推進器	5翼固定ピッチプロペラ2個
進水年月	平成22年11月
用途	旅客船兼自動車渡船
最大搭載人員	旅客432人、船員18人計450人
航行区域	沿海区域(A2水域 ^{*7} (湖川を含む。))に限る。)
最大搭載量	8t積トラック(8.5m×2.5m)19台

(2) 本事故発生時、本船と同じ航路を運航していた昭和57年に建造された別の旅客フェリー(以下「従来船」という。)

総トン数	1,868トン
Lr×B×D	75.49m×14.30m×9.30m
垂線間長	73.00m
船質	鋼
用途	旅客船兼自動車渡船

^{*6} 「垂線間長」とは、計画満載喫水線上において、船首材の前面から、舵を有する船舶にあつては、舵頭材の中心線(舵柱を有する船舶にあつては、その後方)までの水平距離をいう。

^{*7} 「A2水域」とは、海岸局との間でMF無線電話により連絡を行うことができ、かつ、海岸局に対してMFデジタル選択呼出装置により遭難呼出しの送信ができる水域(湖川及びA1水域を除く。)であつてMF海岸局から約150Mまでの水域をいう。

2.5.2 本船の概要

A社の回答書によれば、A社は、長崎県長崎市長崎港、福江港、五島市奈留漁港及び奈良尾港間の定期航路で同型の旅客フェリー2隻を運航していたが、平成23年4月17日に1隻の旅客フェリーの代船として本船が同航路に就航した。

(1) 船体構造等

本船の一般配置図及び中央横断面図並びに船長及び運航管理者の口述によれば、本船は、推進性能の向上のため、2軸2舵である船尾部のプロペラ軸の周囲が双胴の構造となっている船尾スプリット船型が採用されていた。また、舵は、シリングラダーと呼ばれる高揚力を得られる舵板が取り付けられており、最大舵角は約70°であった。

本船は、上から順に航海船橋甲板、遊歩甲板、船橋甲板及び車両甲板が設けられていた。

航海船橋甲板の前部に操舵室が、遊歩甲板に乗組員居住区が、船橋甲板に客室がそれぞれ設けられていた。

本船の車両甲板の船首尾にランプ扉^{*8}が設けられており、船首側のランプ扉の前方にバウバイザー^{*9}が設けられていた。

(2) 操舵室

A社の回答書によれば、操舵室中央部前面上部には、左から風向風速計、時計、船速計、傾斜計、舵角指示器（左右）及び機関回転計（左右）が設置されていた。

傾斜計は、内蔵されたおもりによって盤上の指針が動く機械式傾斜計であり、指針の両側に最大傾斜角を記録する針が取り付けられていた。



写真2.5 本船の傾斜計

^{*8} 「ランプ扉」とは、フェリーなどで岸壁と船との高さが違う場所を使用する斜路であり、船体に収納時には扉となるものをいう。外板を兼ねる扉となる場合がある。

^{*9} 「バウバイザー」とは、フェリーなどで船首ランプ扉外側に設けられる外板を兼ねた扉をいう。

操舵室の右舷側から中央にかけてバラスト制御盤、フィンスタビライザ操作盤、バウスタスタ制御盤、機関遠隔制御盤及び操舵スタンドが設けられ、その左側にレーダー2台が設置されていた。左舷側後部に海図台が、その中央寄りに車両甲板内を監視するためのカメラのモニターがそれぞれ設けられていた。

(3) 客室

A社の回答書によれば、本船は、船体中央部のエントランスの両舷に車両甲板からの階段と乗船用の出入口が、右舷側中央部に案内所がそれぞれ設けられていた。

エントランスの船首側には便所、バリアフリー客室、2等指定客室（4室）が、エントランスの船尾側には2等客室がそれぞれ配置されており、バリアフリー客室は椅子席であり、それ以外の客室はじゅうたん敷きとなっていた。

本船の客室には手荷物を置くスペースは設けられず、エントランスの船首右舷側に荷物室が設けられていた。

(4) 船内放送設備

運航管理者の口述によれば、案内所及び操舵室から旅客への案内を行える船内放送設備が設けられていた。

(5) フィンスタビライザ

船長の口述並びにフィンスタビライザ完成図、フィンスタビライザ海上運転試験成績書及びフィンスタビライザ製造会社の回答書によれば、次のとおりであった。

本船に装備しているフィンスタビライザは、長さ2.5m、幅1.2mの後方折込み式格納型フィンを有し、船体中央部の両舷に設置されていた。

操舵室に設置されたフィンスタビライザ操作盤には、フィンの格納及び張出しスイッチ、感度調整つまみ、油量、油温及び作動異常に関する可視可聴の警報装置などが備えられていた。本事故当時、感度調整つまみは「中」の位置にあった。

フィンスタビライザは、本船に定常横傾斜がある場合、同横傾斜を中心に左右の横揺れ幅を減少させるような制御システムであり、フィンスタビライザの持つ能力の範囲内であれば、相応の減揺効果を発揮することができるが、船体の姿勢を制御することは不可能であった。

(6) ヒーリングタンク等

一般配置図によれば、本船は、船体中央部の両舷舷側にヒーリングタンク^{*10}、船体後部の両舷にN o. 2 バラストタンク^{*11}、船首側にフォアピークタンク^{*12}及びN o. 1 バラストタンクが配置されており、雑用水ポンプで各タンク間にバラスト水を移動できる設備を有していた。

(7) 改造工事

A社の回答書によれば、本船は、本事故発生後、ビルジキール^{*13}が拡張され、船体中央及び後部の船底部に固定バラストが搭載された。

(8) その他

船長の口述によれば、本船は、本事故当時、船体、機関及び機器類に不具合又は故障はなかった。

(付図4 一般配置図 参照)

2.5.3 貨物等の積載状態

貨物積付図、船長、一等航海士及び運航管理者の口述並びにA社の回答書によれば、本事故当時の貨物等の状況は、次のとおりであった。

(1) 貨物

車両甲板にはトラック11台、クレーン付きトラック1台、乗用車6台、軽乗用車2台、軽トラック1台及びコンテナ4個を積載していた。

(2) バラスト水

各バラストタンク及びヒーリングタンクに搭載していた水の量は、次のとおりであった。

フォアピークタンク	約0 t
N o. 1 バラストタンク (中央)	約0 t
N o. 2 バラストタンク (左舷)	約50 t
N o. 2 バラストタンク (右舷)	約50 t
ヒーリングタンク (左舷)	約26 t
ヒーリングタンク (右舷)	約26 t

^{*10} 「ヒーリングタンク」とは、舷側に設けられ、海水などの移動及び注排水を行って貨物の積込みにより生じた船体傾斜を直すためのタンクをいう。

^{*11} 「バラストタンク」とは、喫水を調整したり、安定性を保ったりするため、海水又は清水を積載するタンクをいう。

^{*12} 「フォアピークタンク」とは、船首部の上甲板より下の位置にあるタンクをいい、トリムの調整をしたり、船内で使用する清水を積載したりするタンクとして使用される。

^{*13} 「ビルジキール」とは、船体の動揺を少なくするため、船体中央部の船底湾曲部に沿って取り付け板をいう。

(3) 清水

各清水タンク及び予備清水タンクに搭載していた水の量は、次のとおりであった。

清水タンク（中央） 約 65 t（96%搭載）

予備清水タンク（中央） 約 50 t（71%搭載）

(4) 燃料油

積載量は約 60 t であった。

(5) 喫水等

出港時の喫水は、船首約 3.7 m、船尾約 4.3 m であった。また、車両の積載後、バラストの調整が行われ、船体横傾斜はほとんど生じていなかった。

2.5.4 軽荷状態の重心高さ

本船を建造した造船所が作成した復原性資料によれば、本船の軽荷状態^{*14}の重量は、1,919 t、重心高さは、6.92 m であった。

2.5.5 本船の旋回性能

本船の新造時の海上公試運転（両舷機使用）の結果によれば、次のとおりであった。

旋回方向	左	右
開始前の風向	右 3°	右 63°
開始前の風速	2.4 m/s	1.5 m/s
舵角	35°	35°
旋回前の速力（対水速力）	20.9 kn	20.5 kn
最大傾斜角	17°	21°
最大横距 ^{*15}	210 m	208 m
最大縦距 ^{*16}	196 m	183 m
90° 旋回に要する時間	29.0 秒	29.5 秒
180° 旋回に要する時間	55.1 秒	56.9 秒

^{*14} 「軽荷状態」とは、法定備品、係船ロープ類、常備備品以外の船体に固定されない備品、人、燃料や清水、食料、貨物等を積載していない船舶の状態をいい、その重量を軽荷重量（船殻、艀装品及び備品の合計重量）という。

^{*15} 「最大横距」とは、転舵により船の重心が描く軌跡（旋回圏）において、原針路から真横方向への重心の最大横移動距離をいう。

^{*16} 「最大縦距」とは、旋回圏において、転舵時の重心位置から原針路上における重心の最大縦移動距離をいう。

2.5.6 乗組員による本船の船体傾斜に対する印象

船長、一等航海士及び次席甲板手の口述によれば、本船は、転舵に伴う旋回初期の内方傾斜^{*17}がほとんどなかったが、外方傾斜^{*18}は従来船と比べて大きかった。

2.6 荷役及び固縛等に関する情報

2.6.1 車両甲板の塗装

A社の回答書によれば、本船は、建造時、車両甲板に珪砂を混合したエポキシ系塗料^{*19}を塗布していた。

2.6.2 固縛マニュアルの使用方法

船長、一等航海士及び運航管理者の口述によれば、本船の固縛マニュアルには、複数の固縛方法が例示されており、一等航海士は、車両の固縛について出港時の気象及び海象情報、車両の重量及び固縛用ベルトの取付場所の状況により、固縛方法を判断して車両の固縛を実施していた。また、重量が大きい車両には、固縛用ベルトの本数を増やす措置を講じていた。

2.6.3 本事故発生当時の固縛等の状態

船長及び一等航海士の口述によれば、次のとおりであった。

車両の固縛は、荒天を想定し、固縛可能な車両については、固縛マニュアル（3／4）（図2.6-1 固縛マニュアル（3／4）参照）に従って固縛を行っていたが、オーバーラッシング^{*20}は行っていなかった。固縛を行えない車両については、車止めの数を増やしていた。また、クレーン付きトラック1台は、車両後部を固縛用ベルトで固縛し、車両前部については、固縛を行わず、アウトリガー^{*21}を横に張り出していた。

コンテナ4個については、フレーム間に渡した鋼製バーにロープを掛けて固縛した。

一等航海士は、荒天を想定していたが、本事故発生時に生じた波による傾斜を予

^{*17} 「旋回初期の内方傾斜」とは、主に排水量型の船舶が旋回するとき、舵の取り始めに船体の重心より下方にある舵の中心に舵を取った方とは逆方向の力が作用するため、舵を取った方へ傾くことをいう。

^{*18} 「外方傾斜」とは、船舶が旋回中、遠心力によって旋回中心と反対側に船体が傾くことをいう。

^{*19} 「珪砂を混合したエポキシ系塗料」とは、船舶構造規則第3条に基づく通達（自動車渡船構造基準）の定めにより、滑り止め塗料として塗布されているものをいう。

^{*20} 「オーバーラッシング」とは、車両の車体上部から固縛用ベルトを掛けて固縛することをいう。

^{*21} 「アウトリガー」とは、クレーン操作を行う際、車両の横方向に張り出して転倒防止をするとともに、つり上げ能力を増すための装置をいう。

想しなかった。

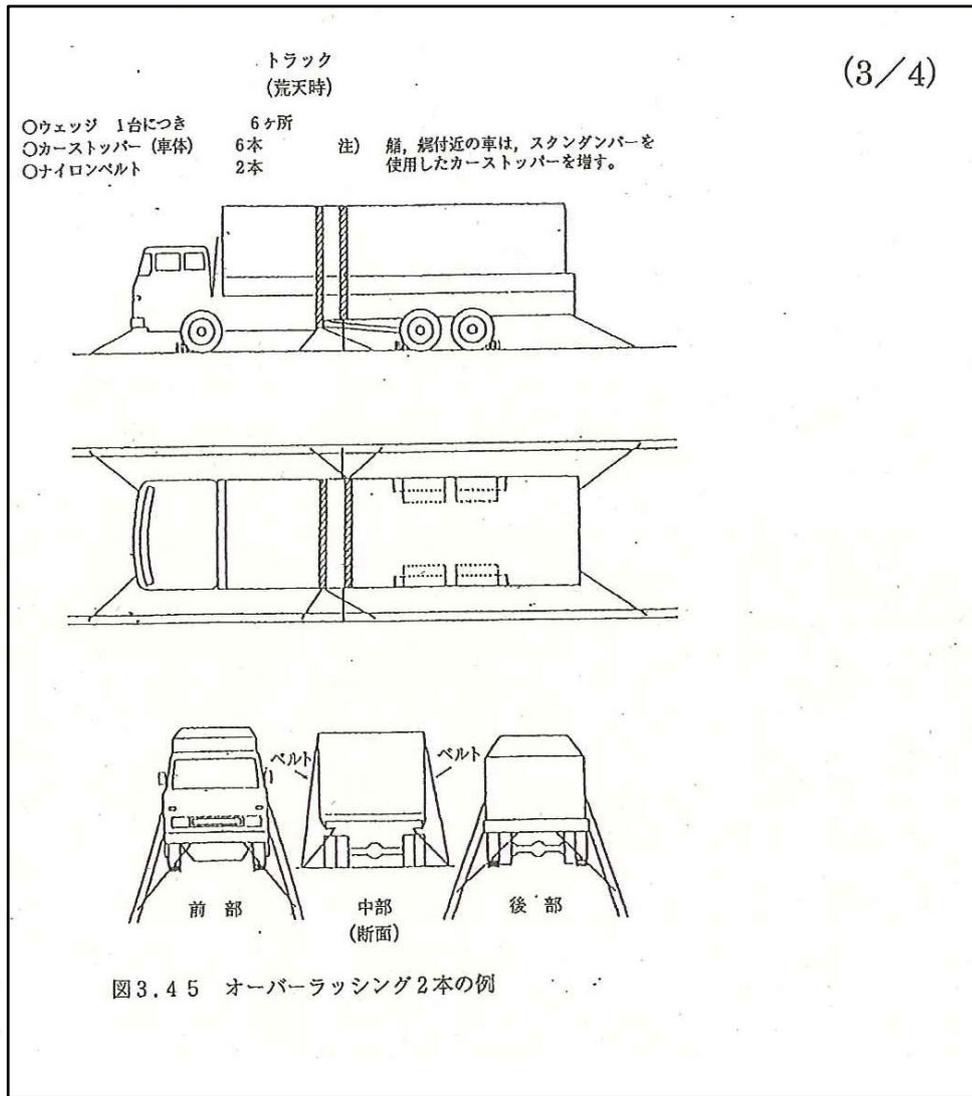


図2.6-1 固縛マニュアル (3/4)

2.6.4 貨物の積載状況並びに本事故後の貨物の荷崩れ状況及び固縛用ベルトの状態
一等航海士及び運航管理者の口述並びにA社の回答書によれば、車両の積載状況、
本事故発生後の車両の損傷状況及び固縛用ベルトの状況は、表2.6のとおりで
あった。

表2.6 本事故発生時の積載車両及び移動状況

番号	車種	長さ (m)	総重量 (t)	固縛方法	車両の損 傷の有無	固縛用ベル トの状態
①	トラック	5	2.0	固縛マニュアル3/4		
②	トラック	12	15.0	固縛マニュアル3/4	破損	破断
③	乗用車	5	1.0	固縛マニュアル3/4		

④	トラック	8	4.0	固縛マニュアル 3/4		
⑤	トラック	12	15.0	固縛マニュアル 3/4	破損	右側が車体 下に入る
⑥	トラック貨物扱 ^{*22}	9	4.0	固縛マニュアル 3/4	破損	破断
⑦	乗用車	5	1.0	固縛マニュアル 3/4		
⑧	乗用車	5	1.0	車体に固縛箇所なし		
⑨	乗用車	5	1.0	固縛マニュアル 3/4		
⑩	トラック貨物扱	12	16.0	固縛マニュアル 3/4	破損	破断
⑪	軽トラック	4	0.6	車体に固縛箇所なし	破損	
⑫	乗用車	5	1.0	車体に固縛箇所なし	破損	破断
⑬	トラック	5	2.5	固縛マニュアル 3/4		
⑭	トラック貨物扱	12	15.0	固縛マニュアル 3/4	破損	破断
⑮	軽乗用車	4	0.6	固縛マニュアル 3/4	破損	
⑯	トラック貨物扱	5	2.0	車体に固縛箇所なし	破損	
⑰	クレーン付きト ラック	6	8.0	車両の後部を固縛、 前部は固縛せず、ア ウトリガー使用	破損	破断
⑱	トラック	5	2.5	固縛マニュアル 3/4	破損	破断
⑲	軽乗用車	4	0.6	車体に固縛箇所なし		
⑳	トラック貨物扱	12	12.0	固縛マニュアル 3/4	破損	
㉑	乗用貨物扱 ^{*23}	5	1.0	車体に固縛箇所なし		

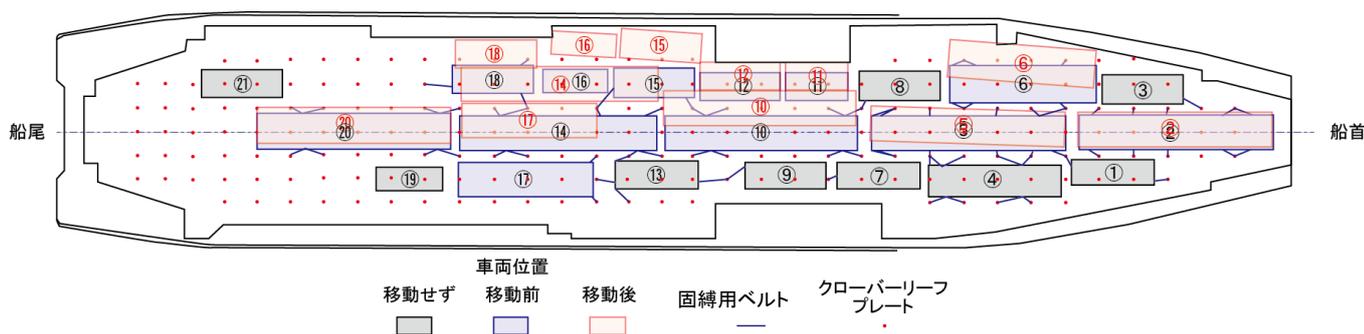


図 2.6 - 2 本事故発生時の車両の横移動及び荷崩れ状況

*22 「トラック貨物扱」とは、引き受けた貨物を混載したA社所有のトラックをいう。

*23 「乗用貨物扱」とは、自動車販売会社が販売を目的とした乗用車をいう。

2.6.5 積載する車両に関する情報

運航管理者の口述によれば、車両のうち、大型トラックはA社所有のものが多く、他の大型トラックも、定期的に本船を利用している。

2.7 気象及び海象に関する情報

2.7.1 気象予報等

(1) 気象庁

11月18日03時観測、07時00分発表の長崎海上気象台において発表された本事故発生場所を含む長崎西海上の海上予報^{*24}は、次のとおりであった。

海上強風警報継続中

風 南東又は南の風18m/s以上、後に南西の風13m/s

天気 雨 所により雷を伴う

視程 3M

波高 4m後に3m

(2) 本船での気象情報の把握

船長の口述によれば、次のとおりであった。

ふだんから発航前にインターネット及び携帯電話で気象情報を入手しており、本事故発生当日も気象情報を入手し、出港時の港内の風速は平均約10m/sであった。

2.7.2 気象及び海象の推算値

一般財団法人日本気象協会によれば、本事故発生当日03時00分及び09時00分の事故発生場所付近の波と風の推算値は、次のとおりであった。なお、有義波高、波周期及び波向^{*25}の情報には、潮流の影響を含めていない。

(1) 本事故発生地点付近（北緯32°44′ 東経128°54′）

03時00分

風向 南南東、風速 12.0m/s

波向 158°、波周期 5.1秒、有義波高 1.85m

09時00分

風向 南、風速 6.0m/s

^{*24} 「海上予報」とは、該当する海上予報区を対象とする船舶の運航に必要な海上の気象（風、天気、視程）、波浪などの予報をいう。

^{*25} 「波向」とは、波が来る方向をいう。例えば、波向が南であれば、南から北へ波が向かう。

- 波向 180°、波周期 3.7秒、有義波高 1.13m
- (2) 福江港港外（北緯32°42′、東経128°52′）
03時00分
風向 南南東、風速 9.0m/s
波向 158°、波周期 4.1秒、有義波高 0.98m
09時00分
風向 南、風速 5.0m/s
波向 180°、波周期 2.9秒、有義波高 0.48m
- (3) 引き返した地点付近（北緯32°48′、東経129°00′）
03時00分
風向 南東、風速 15.0m/s
波向 135°、波周期 5.5秒、有義波高 2.15m
09時00分
風向 南、風速 7.0m/s
波向 090°、波周期 3.8秒、有義波高 0.85m

2.7.3 気象観測値

本事故発生場所の南西方約5.3Mに位置する福江特別地域気象観測所の観測値は、次のとおりであった。

- 07時00分 天気 雨、風向 南、風速 6.6m/s、視程 5.65km
08時00分 天気 雨、風向 南、風速 5.3m/s、視程 1.19km

2.7.4 乗組員等による観測

- (1) 船長及び一等航海士の口述によれば、本事故当時の観測値は、次のとおりであった。

風向 南東
風速 約15～17m/s
波高 約2～3m（本事故発生時、観測された波は約4～5m）
波向 南東
天候 雨
視程 約1M

本事故当時観測された波高約4～5mの波の波長は、本船の全長より若干短かった。

- (2) 本事故発生場所付近を航行していた船舶による観測

本事故発生時に付近を航行していた船舶の乗組員の回答書によれば、同船

船が事故発生海域を航行した08時50分には、風向は南西から南東へ風向きが変わり、波高が約3.5mであった。

2.7.5 潮汐及び潮流

(1) 海上保安庁刊行の潮汐表によれば、潮汐は、本事故発生時、上げ潮の初期であり、福江港における潮高は約95cmであった。

(2) 海上保安庁刊行の九州沿岸水路誌には、田ノ浦瀬戸の潮流について、次のように記載されている。

上げ(下げ)潮流は北北西(南南東)方へ流れ、瀬戸の中央部では流速は5knに達する。

2.7.6 最高波高に関する情報

気象庁のホームページによれば、有義波、有義波高について、次のように記載されている。

(有義波、有義波高)

現実の海面には有義波高より高い波や低い波が混在しており、時折、有義波高の2倍を超えるような波も見られます。例えば、100個の波を観測した時に見られる一番高い波は、平均的には有義波高の約1.6倍にもなります。(実際には、一番高い波が1.6倍より大きい場合も小さい場合もあり、平均すると約1.6倍という意味です。)これを「100波に1波は有義波高の約1.6倍」とか「100分の1最大波は有義波高の約1.6倍」などと言うこともあります。また、1000波の場合には、そのうち1波は有義波高の2倍近い高い波となります。

2.8 事故水域に関する情報

海上保安庁刊行の海図W1250によれば、本事故発生場所は、久賀島南端と多々良島北端との間の北水道の東方沖の海域である。

船長及び一等航海士の口述によれば、次のとおりであった。

潮流は、本事故発生当時、福江島と久賀島西岸の間の田ノ浦瀬戸を流れ、屋根尾島東岸と多々良島間の南水道沖及び久賀島南岸と多々良島間の北水道沖の海域では、北西方向からの潮流と南東方向からの波及びうねりが合わさり、潮波^{しおなみ}*26と呼ばれる他の海域より大きな波が発生していた。

*26 「潮波」とは、強い海潮流のために起こる波の意味であり、特に、流向と風が反対のときには大きくなり三角波が立つ。日本近海でよく起こる所は、黒潮が岸近く迫る岬付近、五島列島、瀬戸内海などである。(出典：「海洋気象講座」(福地 章著、昭和54年2月株式会社成山堂書店))

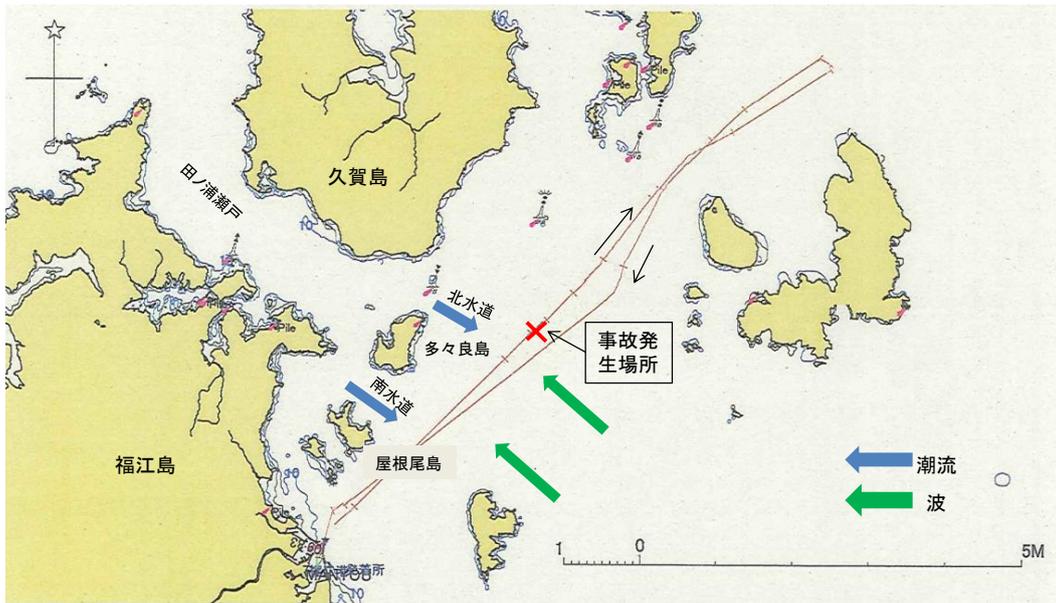


図 2.8 風波及びうねりと潮流の向きに関する概念図

2.9 安全管理に関する情報

2.9.1 安全管理規程

A社の回答書によれば、A社は、平成23年4月17日から実施の安全管理規程（運航基準、作業基準、事故処理基準等を含む。）を、次のように定めていた。

(1) 運航管理者の職務及び権限（安全管理規程第18条）

運航管理者は、船舶の運航の管理その他の輸送の安全の確保に関する業務全般を統轄し、安全管理規程の遵守を確実にしてその実施の確保を図ること。

(2) 運航の可否判断（安全管理規程第25条）

① 船長は、適時、運航の可否判断を行い、気象及び海象が一定の条件に達したと認めるとき又は達する虞があると認めるときは、運航中止の措置を採らなければならない。

② 船長は、運航中止に係る判断を行うに当たり、自ら直ちに判断することが困難で詳細な検討を行う必要があると認めるときは、運航管理者と協議するものとする。

③ 船長は、発航前に運航の可否判断を行い、発航地港内の気象及び海象が次に掲げる条件の一に達していると認めるときは発航を中止しなければならない。（運航基準第2条第1項）

港名	気象・海象		
	風速	波高	視程
	(略)		
福江	17m/s以上	2.0m以上	500m以下
	(略)		

- ④ 船長は、基準航行を継続した場合、船体の動揺等により旅客の船内における歩行が著しく困難となる虞があり、又は搭載貨物、搭載車両の移動、転倒等の事故が発生する虞があると認めるときは、基準航行を中止し、減速、適宜の変針、基準経路の変更、その他適切な措置を採らなければならない。

上記に掲げる事態が発生する虞のあるおおよその海上模様は、風速17 m/s 以上（船首尾方向の風を除く。）、波高4.0 m以上である。（運航基準第3条第1項及び第2項）

- ⑤ 船長は、航行中、周囲の気象及び海象に関する情報を確認し、風速20 m/s 以上又は波高5.0 m以上に達する虞があると認めるときは、目的港への航行の継続を中止し、反転、避泊又は臨時寄港の措置を採らなければならない。ただし、基準経路の変更により目的港への安全な航行の継続が可能と判断されるときは、この限りではない。（運航基準第3条第3項）

- ⑥ 速力基準は、次のとおりとする。（運航基準第8条）

速力区分		プロペラ回転数毎分(rpm)	速力(kn)
前進	NAV. FULL (航海速力)	176	19.4
	FULL (全速)	155	17.6
	HALF (半速)	134	15.2
	SLOW (微速)	113	12.8
	D. SLOW (極微速)	92	10.4

- ⑦ 本船の福江港から奈良尾港に至る常用基準経路の各変針点の位置並びにその間の針路及び距離については、次のとおりとする。（運航基準第7条、運航基準図別表）

時刻	通過地点			針路(°)	距離(M)	速力		所要時間(分)
	目標	方位	距離(M)			平均(kn)	航海(kn)	
7:40	福江港	-	-					
-	ツブラ島	右舷方	0.5	045	7.3	13	10~17	33
-	椛島北端	右舷方	0.5	063	2.1	17	17	8
-	棹崎	左舷方	0.5	085	3.9	17	17	14
-				030	3.0	12	17~10	15
8:50	奈良尾港	-	-					

- (3) 車止め及び固縛装置取付作業等（作業基準第11条及び固縛マニュアル）
- ① 全ての自動車について車止めを施す。
 - ② 原則として積み込まれた全ての車両及びコンテナに固縛装置を取り付け、荒天時には、車止め及び固縛装置の増強を行うとともに、オーバーラッシングを行う。
 - ③ 船内作業指揮者の指示に基づき、木材積載車等重心の高い自動車にはオーバーラッシングを行う。
 - ④ 船内作業指揮者は、作業終了後、作業が完全に行われたことを確認する。
- (4) 船内巡視（作業基準第14条及び船内巡視要領）
- ① 船内巡視については、各航海ごとに出港及び港間において適宜実施する。
 - ② 車両甲板の巡視は甲板部が、客室の巡視は事務部が行い、火気制限及び禁止場所等における火気の有無、搭載車両の固縛状態、その他車両の異常の有無を確認し、異常の有無を船長又は当直航海士に報告するとともに、巡視結果を巡視記録簿に記録する。
 - ③ 船長は、荒天等のために臨時の巡視の必要を認めたときは、臨時船内巡視班を編成して巡視を実施させる。
- (5) 非常対策本部（安全管理規程第47条）
- 経営トップは、事故の規模又は事故の及ぼす社会的影響が大きいため、全社的体制で事故を処理する必要があると認めるときは、事故処理基準に定める非常対策本部を発動し、対応を行うものとする。
- (6) 安全教育（安全管理規程第51条）
- 安全統括管理者及び運航管理者は、乗組員等に対し、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、理解しやすい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。
- (7) 訓練（安全管理規程第53条）
- 安全統括管理者及び運航管理者は、事故処理に関する訓練を計画し、年1回以上これを実施しなければならない。訓練は、全社的体制で処理する規模の事故を想定した実践的なものとする。
- (8) 内部監査（安全管理規程第55条）
- 内部監査を行う者は、年1回以上船舶の状況及び安全管理規程の遵守状況のほか、安全マネジメント態勢全般にわたり内部監査を行うものとし、船舶の監査は停泊中及び航海中の船舶について行うものとする。さらに、重大事故が発生した場合は速やかに実施する。

2.9.2 フェリーにおける船体傾斜事件事例に関する情報伝達状況

運航管理者の口述及びA社の回答書によれば、次のとおりであった。

A社は、平成21年11月13日に発生した旅客フェリー船体傾斜事故^{*27}に伴い、国土交通省が社団法人日本旅客船協会に同日付けで発出した「船舶の安全確保について」の注意喚起文書を受け、平成21年11月17日に当時運航していた各船の船長に対し、安全管理規程及び作業基準を再確認するとともに、作業基準の遵守を求める文書を発出していた。

また、A社は、本船就航後の平成23年9月に本船乗組員を含むA社社員を対象とし、学識経験者による追い波中における復原性の減少に関する講演会を開催し、乗組員の啓発に努めていた。

2.10 独立行政法人海上技術安全研究所による解析

本船の船体傾斜及び荷崩れに関する解析を独立行政法人海上技術安全研究所に委託した結果、次のとおりであった。

2.10.1 独立行政法人海上技術安全研究所による調査及び解析の概要

(1) 復原性の推定

以下の3項目に係る復原性について比較を行った。

- ① 本事故発生時の搭載物件（燃料、車両等）の情報を基に重量重心を算定した本船の復原性
- ② 本事故発生後に施工された2.5.2(7)の改造工事後の本船について、本事故発生時と同一の物件を搭載した場合の復原性
- ③ 従来船の復原性

(2) 船体傾斜の推定

船体傾斜の推定については、発生した波と同じ波高及び波長を持った規則波^{*28}中での船体横揺角で代表させることとし、以下の項目について検討を行った。

- ① 風による船体傾斜
- ② 波による船体傾斜
- ③ 操舵室に設置された傾斜計の指示角
- ④ 操舵に伴う船体傾斜
- ⑤ 本事故発生時に生じた船体傾斜（まとめ）

^{*27} 「旅客フェリー船体傾斜事故」とは、旅客フェリーが、波を受けて傾斜が生じ、積載貨物が横滑りなどの荷崩れを生じて大傾斜し、その後、座礁して横倒し状態となった事故をいう。

^{*28} 「規則波」とは、一定の周期、波高、波速の正弦波をいう。

⑥ 本事故後の船体傾斜

⑦ 船速の変化に伴う本船、改造工事後の本船及び従来船の船体横揺角の比較

(3) 固縛

本船の固縛資材の状況及び車両の固縛の実施状況に係る調査を行い、本事故発生時の船体傾斜角及び固縛状況を基に荷崩れの発生状況の解析を行った。本事故発生時に生じた荷崩れを防止するための方策の検討を行った。

2.10.2 復原性

(1) 本事故発生時と計画満載出港状態の復原性の比較

本事故発生時の本船の重量重心状態と船舶安全法の規定により本船に供与されている船長のための復原性資料の計画満載出港状態の重量重心状態で比較した船体横傾斜角を横軸に、復原てこ^{*29}を縦軸にそれぞれとった復原力曲線は、図2.10-1に示すとおりであった。

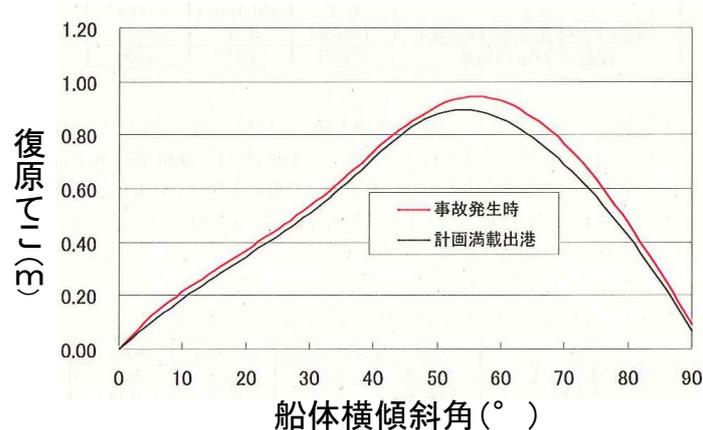


図2.10-1 復原力曲線

復原力曲線から、本事故発生時の本船の復原力（赤色線）は、計画満載出港状態の復原力（黒色線）と比較したところ、同等以上であると推測された。

(2) 本事故発生時の本船と改造工事後の本船及び従来船との復原性の比較

本事故発生時の本船の状態、本事故後に本船の船底に固定バラストを搭載した改造工事後の本船に本事故当日の本船と同一物件を搭載した状態及び従来船の本事故当日の重量重心状態の復原力曲線は、図2.10-2に示す結果となった。

*29 「復原てこ」とは、横傾斜から元に戻そうとする偶力モーメントのてこの長さをいう。

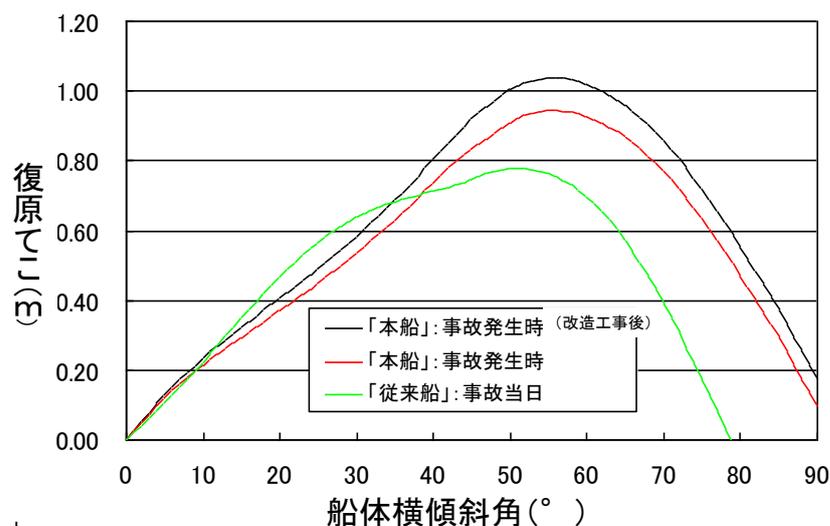


図 2.10-2 復原力曲線

本船は、復原力曲線から、改造工事後においては、本事故発生時より復原力が大きくなっていると推測された。

従来船は、船体傾斜角が約 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ までの範囲において本事故発生時の本船と比較して復原力が大きいものと推測された。

2.10.3 船体傾斜

(1) 風による船体傾斜

本事故時の風向を南東、風速を $12 \sim 17 \text{ m/s}$ とし、本船の船首方位を 045° として本船の速力を 18.60 kn とした場合の各風速における船体傾斜角は、表 2.10-1 に示すとおりであった。

表 2.10-1 風による横傾斜角の計算結果

風速(m/s)	船体傾斜角($^{\circ}$)
12.0	1.5
13.0	1.7
15.0	2.2
16.0	2.5
17.0	2.8

計算結果から、本船は、本事故発生場所付近の風速 $15 \sim 17 \text{ m/s}$ の風により、左舷側へ $2.2^{\circ} \sim 2.8^{\circ}$ 横傾斜していたと推測された。

(2) 波による船体傾斜

① 波長の影響

波高を 5.0 m 、船速を 18.60 kn とし、波の波長を変えた場合の船

体横揺角の計算結果は、図 2.10-3 に示すとおりであった。

‘本船の正船尾を 0° とし、右舷正横を 90° とした波との出会角’ (以下「出会角」という。) が 60° 及び 70° で波を受けた場合、波長が $50 \sim 80$ m の範囲では、船体横揺角に大きな変化がなく、出会角が 60° の場合、波長が $55.0 \sim 65.0$ m の範囲で船体横揺角が大きくなり、最大の船体横揺角が 26° と推測された。

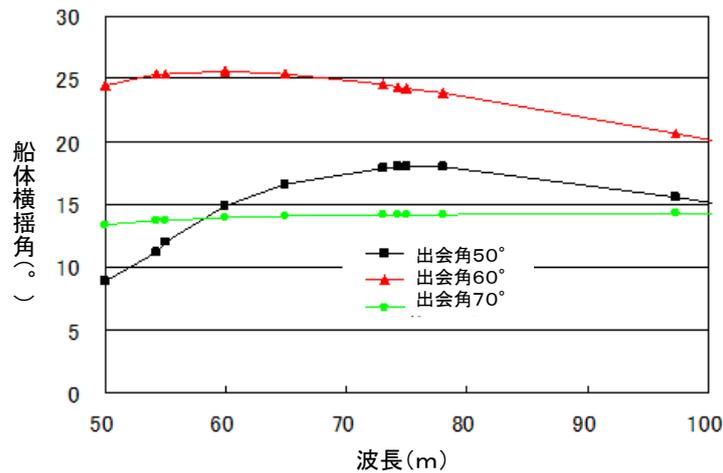


図 2.10-3 波長を変化させた場合の船体横揺角

② 出会角の影響

波高を 5.0 m、船速を 18.60 kn とし、出会角を変えた場合の船体横揺角の計算結果は、図 2.10-4 に示すとおりであった。

波長が 78.0 m、出会角が $60^\circ \sim 70^\circ$ の場合、船体横揺角は $14.2^\circ \sim 24.3^\circ$ と推測された。

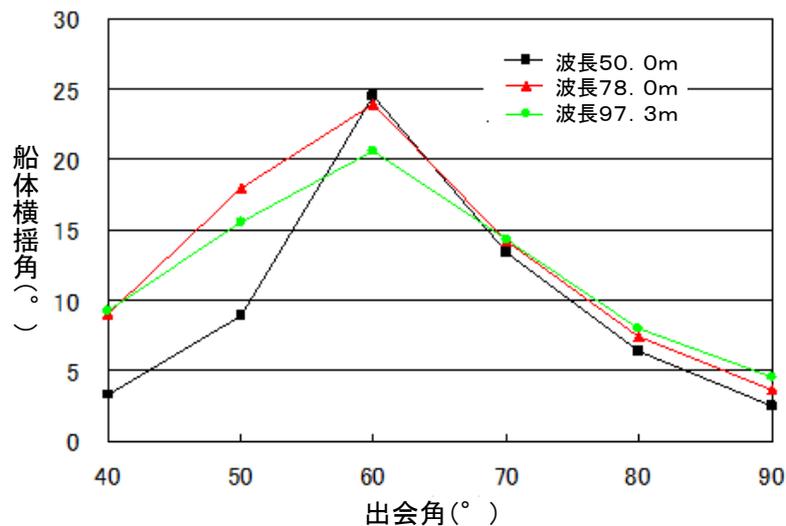


図 2.10-4 出会角を変化させた場合の船体横揺角

③ 船速の影響

波高を 5.0 m、波長を 78.0 m とし、船速を変えた場合の船体横揺角

の計算結果は、図 2.10-5 に示すとおりであった。

波長が 78.0 m の波を出会角が 60° 及び 70° で受けた場合、減速することで船体横揺角が小さくなるが、出会角を 50° で受けた場合は、減速すると船体横揺角が大きくなると推測された。

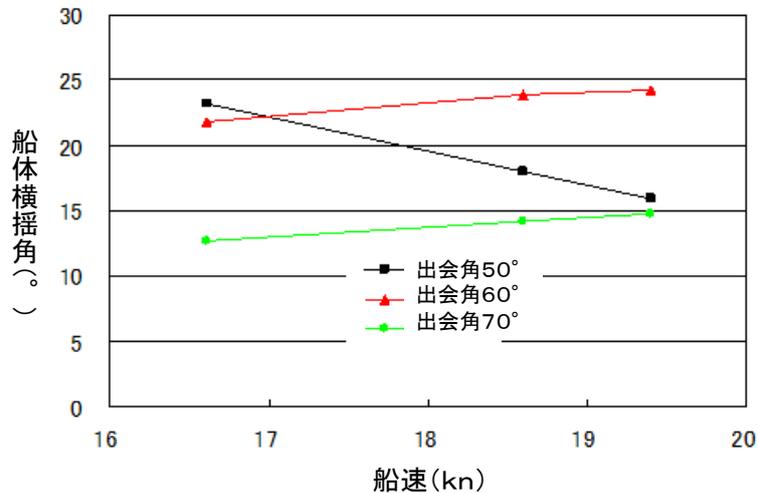


図 2.10-5 船速を変化させた場合の船体横揺角

(3) 操舵室に設置された傾斜計の指示角

操舵室に設けられた傾斜計の最大傾斜角を記録する針は、約 35° を示していたが、傾斜計は重心から高い位置にある操舵室に設置されており、横揺れの加速度により実際の傾斜より大きく指示される傾向にあるので、速力 18.60 kn、出会角 60° で航行していたとし、波長が 50.0 m 及び 78.0 m について、傾斜計の設置場所で生じる船体横揺に伴う横揺れの加速度が影響する傾斜計の指示と実際の傾斜との違いを解析した結果は、表 2.10-2 に示すとおりであった。

表 2.10-2 実際の船体傾斜角と傾斜計が示す船体傾斜角

実際の船体傾斜角 (°)	25.0	27.0	28.0	30.0
波長 50.0m の場合の傾斜計が示す船体傾斜角 (°)	32.7	35.0	36.2	38.5
波長 78.0m の場合の傾斜計が示す船体傾斜角 (°)	32.5	34.9	36.1	38.4

解析結果から、傾斜計の最大傾斜角を記録する針が約 35° の傾斜を示していたという本事故時の傾斜は、実際には約 27° であったものと推測された。

(4) 操舵に伴う船体傾斜

操舵角 4° ~ 6° において、操舵に伴う傾斜角は 2° ~ 4° であり、傾斜方向は舵を取った側と逆方向の外方傾斜であった。なお、操舵に伴う船体傾斜については、操舵直後には舵を取った側へ傾斜する内方傾斜が発生するとされているが、計測結果から内方傾斜は判読できなかった。

(5) フィンスタビライザの影響

本船は、本事故発生時、フィンスタビライザを作動させていたが、本事故時の状況下での効果は限定的と推測される。

(6) 本事故発生時に生じた船体傾斜（まとめ）

船長の口述によれば、本事故発生時、本船は、波高約4～5mで波長が本船の全長より若干短い波を右舷正横の若干後方から受けて左舷側に傾斜したとのことであった。このため、本事故発生時の状況について、波高5.0m、波長78.0m、出会角60°～70°と想定し、船速を18.60knとすれば、波による船体横傾斜角は14.2°～24.3°と推測された。

本事故発生場所付近の風速は、15～17m/sであったので、風による船体横傾斜角は2.2°～2.8°と推測された。

以上により、本事故発生時、本船は、波及び風により、16.4°～27.1°横傾斜したと推測された。

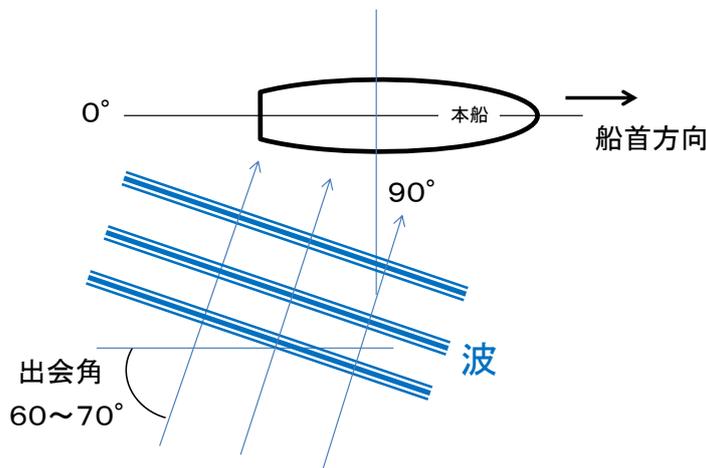


図2.10-6 出会角

(7) 本事故後の船体傾斜

船長は、船体傾斜が収まった後、左舷側に約3°～4°定傾斜していることを確認したが、車両の移動により、左舷側に2.3°傾斜し、これに風による傾斜が加わったものと考えられ、平均的な風速12m/sによる船体傾斜角は1.5°であったので、3.8°傾斜したと推測された。

(8) 船速の変化に伴う本船、改造工事後の本船及び従来船の船体横揺角の比較

① 波高を5.0m、波長を78.0mとし、船速を変化させた場合の出会角50°、60°及び70°における船体横揺角は、図2.10-7に示すとおりであった。

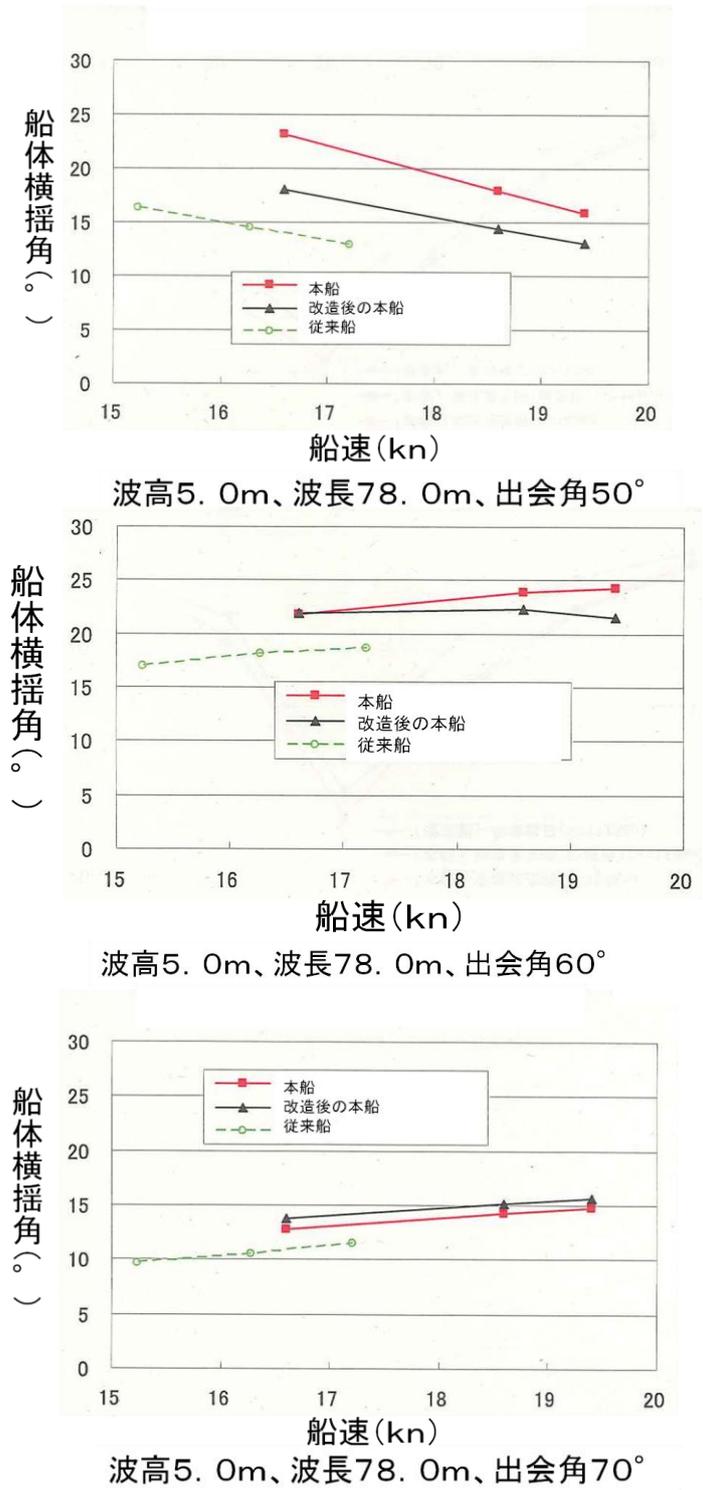


図2.10-7 船速と船体横揺角との関係 (波高5m)

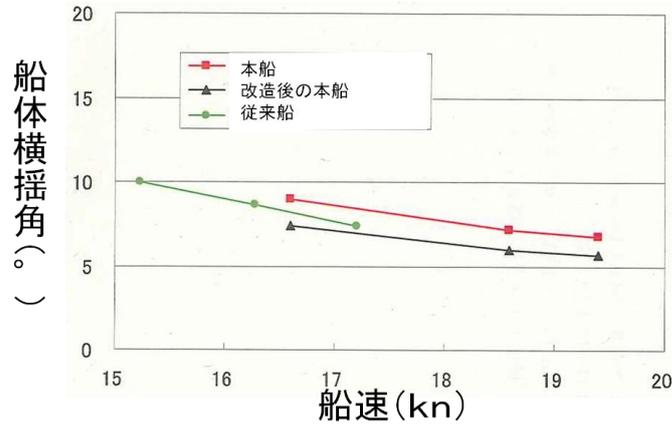
波長78.0mの波の中を出会角60°及び70°で航行した場合、改造工事後の本船を除き、減速することで船体横揺角は小さくなるが、出会角50°の場合は減速することにより、船体横揺角が大きくなると推測された。

出会角が60°の場合、本船は、船速を19.40knから16.60knとした場合、船体横揺角が約24°から約22°まで約2°小さくなる結果となり、従来船は、船速を17.25knから15.25knとした場合、船

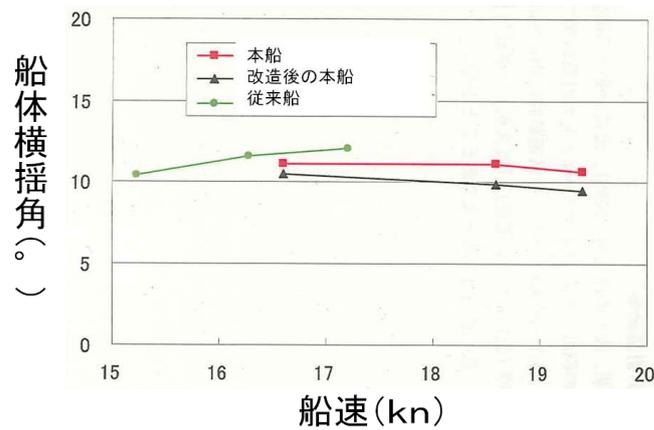
体横揺角が約 20° から約 15° になり、約 5° 小さくなると推測された。

本船と従来船を同じ船速で比較した場合、船体横揺角に大きな差異は見られなかった。

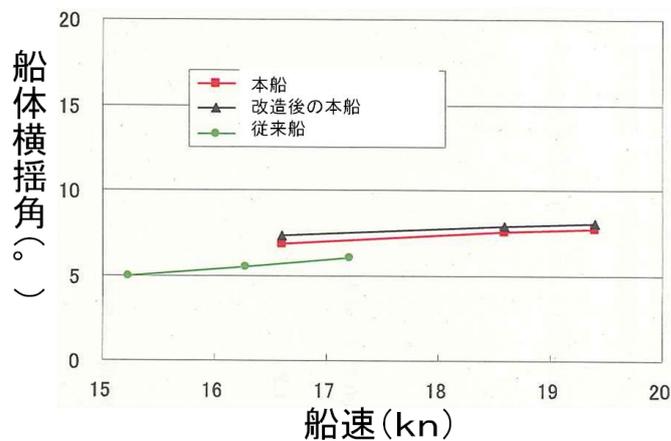
- ② 波高を 2.5 m 、波長を 78.0 m とし、船速を変化させた場合の出会角 50° 、 60° 及び 70° における船体横揺角は、図 $2.10-8$ に示すとおりであった。



波高 2.5 m 、波長 78.0 m 、出会角 50°



波高 2.5 m 、波長 78.0 m 、出会角 60°



波高 2.5 m 、波長 78.0 m 、出会角 70°

図 $2.10-8$ 船速と船体横揺角との関係 (波高 2.5 m)

波高 2.5 m を想定した場合、本船、改造工事後の本船及び従来船の船体横揺角の大きさは顕著な差異がなく、船体横揺角の最大値は 15° 未満と推測された。

2.10.4 固縛

(1) 固縛資材等

① 船体側固縛資材

本船の甲板上には、車両固定用金具としてクローバーリーフプレートが溶接により、船首尾方向に約 2.10 m、左右方向に約 1.55 m の間隔で取り付けられていた。



車両甲板



クローバーリーフプレート

写真 2.10-1 車両甲板及びクローバーリーフプレート

クローバーリーフプレートの取付方向は、図 2.10-9 に示すとおり
に設置されていた。

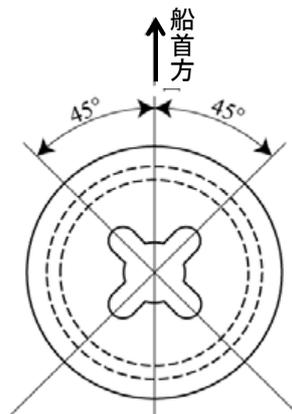


図 2.10-9 クローバーリーフプレートの取付方向

固縛用ベルトには、片端にエレファントフットと称する金具が取り付けられていた。

エレファントフットは、クローバーリーフプレートに引っ掛けて使用するようになっていた。

固縛用ベルトに掛かる張力は、クローバーリーフプレートの十字方向及

び甲板面から上方へ45°の角度で掛かるように設計されていた。

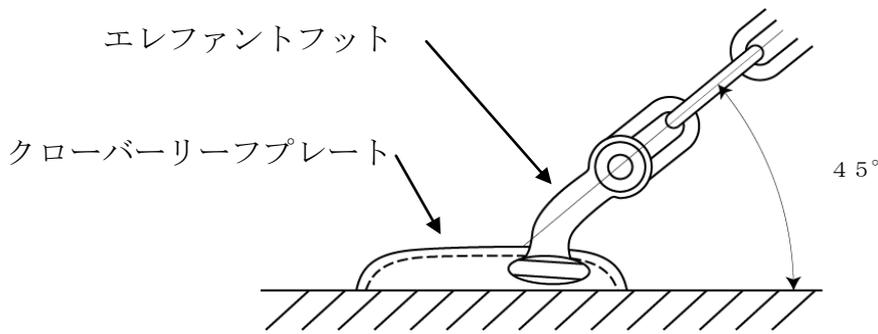


図2.10-10 エレファントフットの取付状態

車両を固縛する場合は、車両の縦方向及び横方向に対して45°の角度で固定するように設計されていた。

② 車両に対する固縛資材

a 固縛用ベルト

固縛用ベルトは、幅45mmと幅28mmの2種類のものを使用していた。

幅45mmの固縛用ベルトは、最大長さ約1.9mの布製ベルトであり、片端にフックを備え、もう一方の端はエレファントフットが取り付けられており、最大使用荷重は15kN、破断荷重は60kNであった。

幅28mmの固縛用ベルトは、最大長さ約1.7mの布製ベルトであり、その両端にフックを備え、一方のフックの近くに締付け用の金具が取り付けられており、最大使用荷重は5kN、破断荷重は20kNであった。

b 固縛用スリング

固縛用ベルトの補助とし、幅50mm（長さ3.5m）と幅25mm（長さ1m）の2種類のスリングを使用していた。

スリングは、布製で両端にアイが施されており、幅50mmのスリングは使用荷重が16kN、破断荷重が100kNであり、幅25mmのスリングは使用荷重が8kN、破断荷重が50kNであった。

c その他

荒天時の固縛用具とし、オーバーラッシング用のアイプレートから船体前後方向にワイヤロープが取り付けられ、ワイヤロープから鋼製のシャックル（使用荷重約30.0kN）を介してスリングが接続され、車両甲板天井部のビーム上に設置されていた。

また、車両のタイヤには、前後方向の滑り止めとして木製の車止めを使用していた。

(2) 車両と固縛用ベルトの取付状態

本船は、大型トラックを積載し、固縛用ベルトを取り付ける場合、クロー

バーリーフプレートの横方向の取付間隔が大型トラックの横幅に近い関係から、車両同士の間隔が狭くなっており、固縛用ベルトの取付けが車両の荷台下付近であり、固縛用ベルトは設計された取付角度である 45° ではなく、垂直に近い角度で取り付けられている場合があった。また、車両側に適当な取付箇所がないために車両側への固縛用ベルト取付位置も定まっていなかった。



写真 2.10-2 固縛用ベルトの取付例

(3) 車両に対する固縛用ベルトの望ましい取付方法

① 船体側固縛資材の設計及び設置条件によるもの

エレファントフットとクローバーリーフプレートの取付けは、平面的にはクローバーリーフプレートの切れ込み方向、つまり船首及び船尾方から 45° 方向に、また、立面方向では甲板面から 45° にそれぞれ固縛ベルトを取るよう設計されていた。

② 固縛の観点によるもの

固縛は平面的に見て車両の前後 45° 方向に、立面方向では甲板面から上方へ 45° 方向にそれぞれ引っ張るのが、横転と横滑りの両者を防止することができる最適な角度であった。

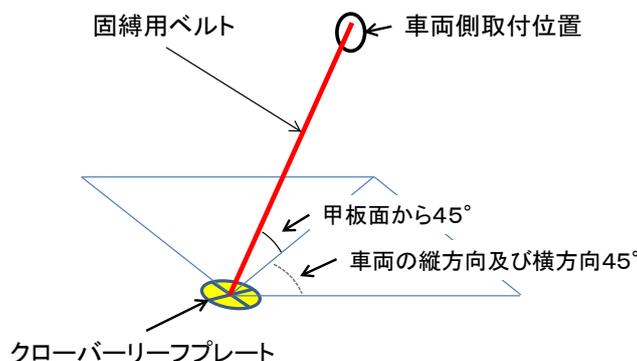


図 2.10-11 固縛用ベルトの取付け

(4) 固縛用ベルトに掛かった力

乗組員及びA社担当者の口述並びにA社の回答書により、移動したトラックの固縛用ベルトに掛かった力について、車両の重量、積載位置及び固縛方法を基に解析した。

車両のうち、乗用車は、車止めのみ行っていたが、大型トラックの横滑りにより、2台が移動したものの、他の車両は移動していなかった。

解析の条件は、本船が、波の影響で規則的に動揺している状況を想定して船体横傾斜角を 27° 、船体縦傾斜角を 5° とし、また、車両甲板の摩擦係数を摩擦なしとした0.0、車両甲板に施された塗装面を水湿潤状態とした1.2及び甲板（鋼）とタイヤ（ゴム）の接触状態とした0.4の3つの状態とし、トラックについて解析した結果は、表2.10-3に示すとおりであった。

表2.10-3 固縛用ベルトに掛かる力

車両番号	②	⑤	⑩	⑭	⑳	⑥	⑰	
車両種類	大型トラック					中型トラック		
積載位置	中心線上前方	中心線上前方	中心線上中央部	後方中心線	後方中心線	左舷前方	右舷	
転倒モーメントによる固縛用ベルトに掛かる力	7,142	3,649	430	1,065	4,179	910	0	
横方向への移動により、固縛用ベルトに掛かる力	摩擦係数0.4の場合	22,075	16,792	15,726	15,761	17,606	7,256	32,159
	摩擦係数0.0の場合	80,984	80,336	106,620	100,188	80,521	23,021	137,160
	摩擦係数1.2の場合	12,498	12,397	16,454	15,461	12,426	5,354	31,898

注1: 単位N

注2: 最大使用荷重15,000N、破断荷重60,000N

破断荷重超過 最大使用荷重超過

車両を倒そうとする力である転倒モーメントによって固縛用ベルトに掛かる力は、最大使用荷重の範囲内であったと推測された。

車両の横方向への移動による固縛用ベルトに掛かる力は、摩擦係数が0.0の場合、1台を除いて破断荷重を超えると推測された。

摩擦係数については、船体の衝撃的な動きで固縛用ベルトに伸びが生じ、積載車両の横方向への移動が少しでも始まれば、摩擦は静摩擦から動摩擦となり、急激に小さくなり0.0に近づくと推測された。

(5) 固縛に関する改善の検討

車両への固縛用ベルトの取付けは荷台下付近であり、クローバーリーフプレートとの配置と車両の積載位置との関係により、固縛用ベルトを真下に取り取る形となる。

この結果、転倒モーメントに対しては強いが、横方向への移動に対しては弱い固縛となっている。

横方向への移動を防止するには、車両への固縛用ベルトの取付位置をなるべく低くする必要がある。また、固縛用ベルトの取付位置をなるべく低くする方法としては、たすき掛けに取ることも有効な方法である。

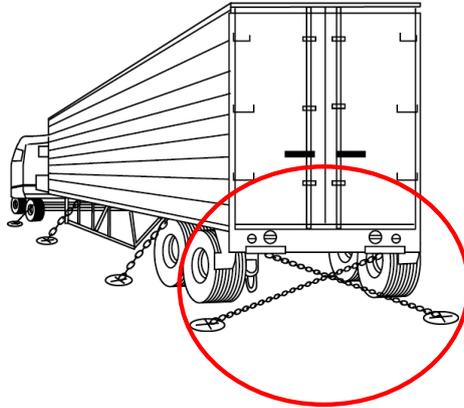


図 2.10-12 たすき掛けの固縛例

車両甲板後部での複数台の衝突の引き金となったクレーン付きトラックは、車両後部を固縛していたが、車両前部については、アウトリガーを張り出し、固縛をしていなかった。

アウトリガーは、転倒防止には効果があるが、横方向への移動防止には効果がない。また、アウトリガーを使用することにより、アウトリガーの底面（鋼）と甲板面が接触して摩擦係数が限りなく0.0に近づくという弊害もある。

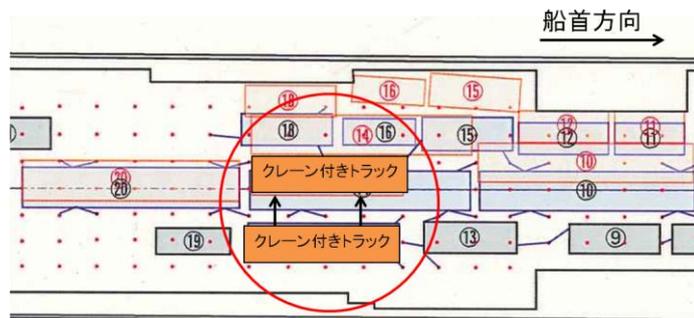


図 2.10-13 クレーン付きトラックの移動状況

3 分析

3.1 事故発生の状況

3.1.1 事故発生に至るまでの経過

2.1、2.6、2.7及び2.9から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、福江港において、旅客316人を乗せ、車両21台などを積載し、一等航海士が、荒天を想定して固縛可能な車両について固縛を行ったが、固縛が行えない車両については車止めの数を増やした。また、クレーン付きトラックは、車両の後部を固縛し、車両前部については、固縛を行わず、アウトリガーを張り出した。
- (2) 本船は、出港予定時刻を約4分遅れて出港したことから、両舷の主機回転数を増してプロペラの回転を176rpmとした。
- (3) 本船は、福江港外の防波堤を通過後、フィンスタビライザを作動させた。
- (4) 本船は、屋根尾島と多々良島の間の南水道付近において、右舷側に南東方から波高約2～3mの波を受けて航行し、右舷船尾方から波を受ける姿勢とするために波の到来に合わせて左舵約5°～10°を取りながら航行した。
- (5) 本船は、多々良島東方の海域において、波高が低くなり、針路約044°として航行した。
- (6) 本船は、多々良島と久賀島南岸の間の北水道付近で再び右舷側に南東方からの波高約2～3mの波を受けるようになり、右舷船尾方から受ける姿勢とするために波の到来に合わせて左舵約5°～10°を取りながら航行した。
- (7) 本船は、福江島北東方沖を速力約17～19knで手動操舵により航行した。
- (8) 船長は、右舷正横から来る波高約4～5mの波を認め、左舵15°を次席甲板手に命じた。
- (9) 次席甲板手は、左舵約15°を取り、舵角指示器の指針が少し振れ始めたことを確認した。
- (10) 本船は、08時05分ごろ舵効が現れる前に波高約4～5mの波を右舷正横の後方から受けて左舷側に傾斜した。
- (11) 本船は、前記の傾斜により、旅客3人が負傷するとともに、車両12台が損傷し、また、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉が曲損するなどの損傷を生じた。
- (12) 船長は、傾きが収まった後、傾斜計で左舷側への定傾斜角が約4°であり、最大傾斜角を記録する針が約35°を示していることを確認した。

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11月18日08時05分ごろで発生場所は、赤ハエ鼻灯台から098° 1.4M付近であったものと考えられる。

3.1.3 負傷者の状況

2.1.3及び2.2から、本船が、左舷側に傾斜した際、旅客Aは、長椅子に腰を掛けていたところ、長椅子から投げ出されて前方の木製格子に顔面が当たって顔面打撲を、旅客Bは、客室の床に寝ていたところ、他の旅客がぶつかり、壁に頭が当たって頸椎捻挫を、旅客Cは、客室の床に座っていたところ、壁まで滑り、他の旅客が乗った状態で壁に首が当たって頸椎捻挫をそれぞれ負ったものと考えられる。

3.1.4 船体傾斜及び荷崩れの状況

2.1及び2.6から次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、08時05分ごろ波高約4～5mの波を右舷正横の後方から受けて左舷側に傾斜した。
- (2) 本船は、左舷側に傾斜したことから、車両甲板内に積載されていた車両が横移動して荷崩れを生じた。
- (3) 車両のうち、固縛が行えず、車止めのみを行っていた乗用車は、トラックの移動により2台が移動したが、他の車両は移動しなかった。

3.1.5 損傷の状況

2.3及び2.6.4から、本船は、左舷側に傾斜した際、車両が移動し、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉に衝突したことから、曲損を生じるとともに、車両甲板内のフレーム及び側壁に擦過傷を生じた。また、積載していた車両は、トラック10台及び乗用車2台に凹損などを生じた。

3.2 事故要因の解析

3.2.1 乗組員及び船舶の状況

(1) 乗組員

2.4から、次のとおりであった。

- ① 船長及び一等航海士は、適法で有効な海技免状を有していた。
- ② 船長、一等航海士及び次席甲板手の健康状態は、良好であったものと考えられる。

(2) 船舶

2.5.2から、本船は、船体、機関及びフィンスタビライザを含む機器類に

不具合又は故障はなかったものと考えられる。

3.2.2 気象及び海象の状況

2.7から、次のとおりであった。

- (1) 本事故発生場所付近には、11月18日07時00分に海上予報が発表され、海上強風警報が継続されていた。
- (2) 本事故当日の03時00分及び09時00分の事故発生場所付近においては、風向は南東～南、風速は約6.0～12.0m/sの風が吹き、波向158°～180°、有義波高約1.13～1.85mの波が発生していたものと考えられる。
- (3) 本事故発生当時には、事故発生場所付近においては、波向南東方の波高約2～3mの波が発生しており、潮流が南東方へ流れていたものと考えられる。
- (4) 本事故発生時には、事故発生場所付近の海域においては、潮流が南東方へ流れ、前記(3)記載の波が発生していたことから、他の海域に比べて高波高である南東方からの波高約4～5mの波が発生したものと考えられる。
- (5) 本事故発生時には、事故発生場所付近の海域においては、南東の風が風速約15～17m/sで吹いていたものと考えられる。

3.2.3 揺れに対する旅客への注意喚起等についての解析

2.1.2及び2.1.3から、次のとおりであったものと考えられる。

事務長は、案内所の前において、旅客に対し、揺れに十分注意するように声を掛けていたものの、傾斜する直前であり、また、旅客室内がふだんより混雑していたことから、近くに居合わせた旅客に対しては注意喚起をすることができたが、それ以外の旅客に対し、注意喚起をすることができなかった。

3.2.4 出港時の復原性に関する解析

2.5.3、2.5.4及び2.10.2から、本船は、本事故発生当時、福江港出港時の復原性については、船長に供与された復原性資料の計画満載出港状態の復原力と比較し、同等以上であったものと考えられる。

3.2.5 本事故発生時に生じた船体傾斜に関する解析

2.1、2.5.2、及び2.10.3から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、福江島北東方沖を船首方位約045°、速力約18.60knで航行中、南東からの風速約15～17m/sの風を受けるとともに、右舷正横の後方から、波長が本船の全長(86.50m)より短い波高約4～5mの波

を受けて左舷側に傾斜したものと考えられる

(2) 本船は、前記から、波高5.0m、波長78.0mの波を船首方位045°、速力18.60kn で受けた場合の船体傾斜については、次のとおりであったものと考えられる。

① 船長は、傾斜が収まった後、操舵室に設置された傾斜計の最大傾斜角を記録する針が約35°を示していることを確認したが、前記の波の出会角が60°であれば、傾斜計の針が35°を示す場合の実際の船体傾斜は27°であった。

② 本船は、前記の波の出会角が60°～70°であれば、左舷側に14.2°～24.3°に傾斜した。

③ 本船は、南東からの風速15～17m/sの風を右舷側に受けて左舷側に2.2°～2.8°傾斜していた。

(3) 操舵による船体傾斜の影響

本船は、波高約4～5mの波を認めて左舵約15°を取ったが、本船は、内方傾斜がほとんどなく、舵効が現れる前に右舷正横の後方から波高約4～5mの波を受けたことから、操舵による船体傾斜への影響はなかった可能性があると考えられる。

(4) フィンスタビライザの影響

本船は、本事故発生時、フィンスタビライザを作動させていたが、定常横傾斜に対して横揺れ幅を減少させる制御システムであり、船体の姿勢を制御することまでは計画されていなかったことから、事故時の状況下での効果は限定的であった可能性があると考えられる。また、フィンスタビライザに不具合又は故障はなかったことから、フィンスタビライザによる強制動揺及び作動不良による船体傾斜はなかったものと考えられる。

(5) 本船の前記(1)記載の傾斜は、前記(2)～(4)から、南東からの風速約15～17m/sの風を右舷側に受けて左舷側に傾斜していたところ、波高約4～5mの波を右舷正横の後方から受けたことから、左舷側に最大で約27°であったものと考えられる。

(付図5 船体傾斜に関する解析 参照)

3.2.6 本事故発生後、本船が左舷側に約3°～4°定傾斜したことについての解析

2.1.2、2.6.4及び2.10.3から、本船は、波高約4～5mの波を受けた後、車両が横移動し、荷崩れして左舷側に約2.3°定傾斜を生ずるとともに、風を右舷側に受けて左舷側へ約1.5°の船体傾斜があり、左舷側に約3.8°定傾斜したものと考えられる。

3.2.7 速力の影響による船体傾斜に関する解析

2.10.3 から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、波高 5.0 m、波長 78.0 m の波を出会角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ で受けた場合、減速することにより、船体傾斜を軽減することができる。
- (2) 本船は、波高 5.0 m、波長 78.0 m の波を出会角 50° で受けた場合、減速することにより、船体傾斜は増加する。

3.2.8 固縛に関する解析

2.6 及び 2.10.4 から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、船体側固縛資材の設計及び設置条件並びに固縛の観点より、車両に取る固縛用ベルトは車両の縦方向及び横方向 45° に取るとともに甲板面から上方へ 45° 方向に取ることが、車両の転倒と横移動を防止することができる最適な角度であった。
- (2) 本船は、A社から配布された安全管理規程の作業基準に定められている固縛の方法について、複数の例示が示された固縛マニュアルを所持しており、どの例示に従って固縛を実施するかについては、一等航海士が、気象及び海象情報、車両の重量及び固縛用ベルトの取付場所の状況により、固縛方法を判断して固縛を行っていたものと考えられる。
- (3) 本船は、車両を固縛する際、船体側固縛資材の設置位置及び車両の横幅との関係から、車両同士の間隔が狭くなっていたので、固縛用ベルトの取付角度を車両の縦方向及び横方向 45° 並びに甲板面から上方へ 45° 方向に取ることができなかつたものと考えられる。
- (4) 車両のうちトラックを固縛していた固縛用ベルトは、左舷側に 27° 傾斜したことから、固縛用ベルトに掛かった力により伸びを生じ、車両が左舷側に横移動を生じたので、車両甲板と車両のタイヤとの間の摩擦が動摩擦状態となり、摩擦係数が 0.0 に近づき、破断荷重を超える力が掛かって破断したものと考えられる。
- (5) トラックは、固縛用ベルトが破断したことから、横移動し、車両同士が衝突したり、本船の車両甲板の壁に衝突したりしていたことから、本船は、車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉を曲損するとともに、車両甲板側壁に擦過傷を生じ、また、車両 12 台に凹損などを生じたものと考えられる。
- (6) 車両甲板の後部に積載されていたクレーン付きトラックは、アウトリガーを張り出して車両前部の固縛を行っていなかったことから、アウトリガーの底面（鋼）と甲板面が接触して摩擦係数が 0.0 に近づき、横移動しやすい

状態となっていたものと考えられる。

- (7) 本船は、トラックの固縛用ベルトが破断し、トラックが横移動したことから、左舷側への最大で約 27° の傾斜に対し、固縛方法が適切でなかったものと考えられる。

3.2.9 安全管理に関する解析

2.1.2、2.6.2、2.7.1及び2.9.1から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、船長が、福江港から奈良尾港に向けて航行する際、A社が定めている安全管理規程の発航中止の条件に達する虞はないと判断し、出港した。
- (2) 本船は、運航管理規程の運航基準図別表において、福江港から奈良尾港に向かう際の速力を平均速力で $13\sim 17$ knと定められていたが、福江港出港時の約4分の遅れを取り戻すため、本船の速力基準表において 19.4 knであるプロペラの回転を 176 rpmとして航行した。
- (3) 本船は、福江港出港前、固縛マニュアルに示された例示に従い、一等航海士が、気象及び海象情報、車両の重量及び固縛用ベルトの取付場所の状況により、固縛方法を判断して固縛を行っていた。

3.2.10 本事故発生に関する解析

3.1.1、3.1.3、3.2.2、3.2.5、3.2.6、3.2.8及び3.2.9から、次のとおりであったものと考えられる。

(1) 船体傾斜及び事故発生

- ① 本船は、多々良島と久賀島南岸の間の北水道付近において、右舷側に南東方からの波高約 $2\sim 3$ mの波を受けて航行し、波を右舷船尾方から受ける姿勢とするために波の到来に合わせて左舵約 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ を取りながら航行した。
- ② 本船は、福江島北東方沖を針路約 044° とし、速力約 $17\sim 19$ knで手動操舵により航行した。
- ③ 船長は、右舷正横から来る波高が約 $4\sim 5$ m、波長が本船の全長より若干短い波を認め、左舵 15° を取るよう次席甲板手に命じた。
- ④ 次席甲板手は、左舵約 15° を取り、舵角指示器の指針が少し振れ始めたことを確認した。
- ⑤ 本船は、福江島北東方沖を北東進中、南東からの風速約 $15\sim 17$ m/sの風を右舷側に受けて左舷側に傾斜していたところ、08時05分ごろ、舵効が現れる前、右舷正横の後方から波高約 $4\sim 5$ mの波を受けたことから、左舷側に最大で約 27° 傾斜した。

⑥ 本事故発生時には、事故発生場所付近においては、潮流が南東方へ流れ、波向南東方の波高約2～3mの波が発生していたことから、他の海域に比べて高波高の波高約4～5mの波が発生した。

⑦ 本船は、左舷側に傾斜し、旅客Aが、長椅子に腰を掛けていたところ、長椅子から投げ出されて前方の木製格子に顔面が当たって顔面打撲を、旅客Bが、寝ていたところ、他の旅客がぶつかり、壁に頭が当たって頸椎捻挫を、旅客Cが、座っていたところ、他の旅客が乗った状態で壁に首が当たって頸椎捻挫をそれぞれ負い、トラックが、固縛用ベルトが破断したことから、横移動し、車両同士が衝突したり、本船の車両甲板の壁に衝突したりして車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉が曲損するとともに、車両甲板側壁に擦過傷が生じ、また、車両12台に凹損などを生じた。

(2) 車両の荷崩れ

① 本船は、固縛マニュアルの固縛方法の例示に従い、一等航海士が、気象及び海象情報、車両の重量及び固縛用ベルトの取付場所の状況により、固縛方法を判断して固縛を行っていた。

② 本船は、左舷側に27°傾斜したことから、トラックを固縛していた固縛用ベルトに破断荷重を超える力が掛かり、同ベルトが破断した。

③ 本船は、トラックの固縛用ベルトが破断し、車両が横移動して荷崩れしたことから、左舷側への最大で約27°の傾斜に対し、固縛方法が適切でなかった。

(付図6 船体傾斜に至る要因(まとめ)、付図7 荷崩れに至る要因(まとめ)参照)

3.2.11 荷崩れ防止の方策

2.10.4から、車両の荷崩れ防止のため、次の方策が必要なものと考えられる。

(1) 定期的にフェリーを利用する車両には、車両のなるべく低い位置に固縛用ベルトが取付け可能な措置を採ること。

(2) 車両のなるべく低い位置から縦方向及び横方向に45°、甲板面から上方へ45°方向の角度で可能な限り固縛を行うこととし、車両の両側の甲板上に取付箇所がない場合は、固縛用ベルトをたすき掛けで取り付けることも考慮すること。

(3) 車両の重量に見合った強度を有する固縛用ベルトの使用又は固縛用ベルトの増加等の措置を講じること。

4 結 論

4.1 分析の要約

4.1.1 船体傾斜による事故発生状況

- (1) 本事故発生場所付近の海域は、波高約 2～3 mの波が発生していたものと考えられる。(3.2.2)^{*30}
- (2) 本事故発生時には、事故発生場所付近の海域においては、他の海域に比べて高波高の波高約 4～5 mの波が発生したのと考えられる。(3.2.2)
- (3) 本船は、福江島北東方沖を針路約 044° とし、速力約 17～19 kn で手動操舵により航行したのと考えられる。(3.1.1)
- (4) 本船は、福江島北東方沖を北東進中、南東からの風速約 15～17 m/s の風を右舷側に受けて左舷側に傾斜していたところ、08時05分ごろ、右舷正横の後方から波高約 4～5 mの波を受けたことから、左舷側に最大で約 27° 傾斜したのと考えられる。(3.2.10(1))
- (5) 本船は、左舷側に傾斜したことから、旅客 3人が負傷したのと考えられる。(3.1.3)
- (6) 本船は、左舷側に傾斜したことから、車両甲板に積載されたトラックの固縛用ベルトに破断荷重を超える力が掛かって固縛用ベルトが破断して車両が横移動し、車両同士が衝突したり、本船の車両甲板の壁に衝突したりして車両甲板内の左舷機関室出入口にある風雨密扉が曲損するとともに、車両甲板側壁に擦過傷を生じ、また、車両 12台に凹損などを生じたのと考えられる。(3.1.5 及び 3.2.8)

4.1.2 車両の荷崩れ

- (1) 一等航海士は、固縛マニュアルに示された例示に従い、気象及び海象情報、車両の重量及び固縛用ベルトの取付場所の状況により、固縛方法を判断して固縛を行っていたのと考えられる。(3.2.8(2))
- (2) 本船は、左舷側に 27° 傾斜したことから、車両のうちトラックを固縛していた固縛用ベルトに破断荷重を超える荷重が掛かり、固縛用ベルトが破断したのと考えられる。(3.2.10(2))
- (3) 本船は、トラックの固縛用ベルトが破断し、トラックが横移動したことから、左舷側への最大で約 27° の傾斜に対し、固縛方法が適切でなかったも

^{*30} 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」の主な項番号を示す。

のと考えられる。(3.2.8(7))

- (4) 本船は、車両を固縛していた固縛用ベルトが破断したことから、車両が横移動し、荷崩れを生じた。(3.2.10(2))

4.2 原因

本事故は、本船が、福江島北東方沖を北東進中、南東風を右舷側に受けて左舷側に傾斜を生じていたところ、右舷正横の後方から波高約4～5mの波を受けたため、左舷側に最大で約27°の傾斜を生じ、旅客が、長椅子から投げ出され、また、壁に当たるとともに、車両が横移動したことにより発生したものと考えられる。

本船が、波高約4～5mの波を受けたのは、本事故発生場所付近の海域においては、潮流が南東方へ流れ、波向南東方の波高約2～3mの波が発生していたことから、他の海域に比べて高波高の波が発生したことによるものと考えられる。

5 再発防止策

本事故は、本船が、福江島北東方沖を北東進中、南東風を右舷側に受けて左舷側に傾斜を生じていたところ、右舷正横の後方から波高約4～5mの波を受けたため、左舷側に最大で約27°の傾斜を生じ、旅客が、長椅子から投げ出され、また、壁に当たるとともに、車両が横移動したことにより発生したものと考えられる。

本船が、波高約4～5mの波を受けたのは、本事故発生場所付近の海域においては、潮流が南東方に流れ、波向南東方の波高約2～3mの波が発生していたことから、他の海域に比べて高波高の波が発生したことによるものと考えられる。

したがって、A社は、高い波となる海域を避けて航行するとともに、旅客に対し、動揺への備えに関する注意喚起を徹底するとともに、車両に対し、固縛を適切に実施することが必要なものと考えられる。

5.1 事故後に講じられた事故等防止策

5.1.1 国土交通省により講じられた施策

国土交通省九州運輸局は、本事故後、A社に対して平成23年11月20日、12月8日及び21日に特別監査を実施し、固縛作業に係る基準の遵守の徹底、固縛強度の再検討及び実態に応じた固縛マニュアルの見直し及び作成を行うことを指導した。

5.1.2 A社により講じられた措置

A社は、九州運輸局の指導に対し、平成24年2月23日付けの文書により、本事故後の対策について、次のとおり九州運輸局に報告するとともに、本船を含む運航船舶に周知した。

(1) 大傾斜防止対策

① 運航基準の見直し

奈良尾、奈留島及び福江間に発生する特異な海象に対応できるよう「運航基準」に荒天対応のための項目を追記した。

② 運航ダイヤの変更

運航ダイヤについて検討し、航海速力を19.4knから18.0knとすることにより、運航ダイヤに余裕を持たせ、安全な航路の選択及び減速運航をすることとした。

③ 船員教育

関係機関、学識経験者等の講習を幅広く受け、安全な操船の向上に努めることとした。

(2) 旅客への注意喚起

旅客の安全確保のための注意喚起及び荒天航海中の甲板への立ち入り制限、船内移動時のハンドレールへのつかまり等をアナウンスするとともに、掲示し、旅客に周知することとした。

(3) 荷崩れ防止策

車両の形状、車両重量及び海象に応じた固縛方向を策定するとともに、固縛マニュアルに従った固縛ができない車両については、積載を見合わせることにし、作業基準に明記した。

(4) 情報伝達体制の周知徹底

事故時、緊急時等の情報伝達が迅速及び確実に行われるよう徹底し、情報伝達マニュアルに基づき訓練を実施した。今後も定期的に情報伝達訓練を含む事故処理訓練を実施することとした。

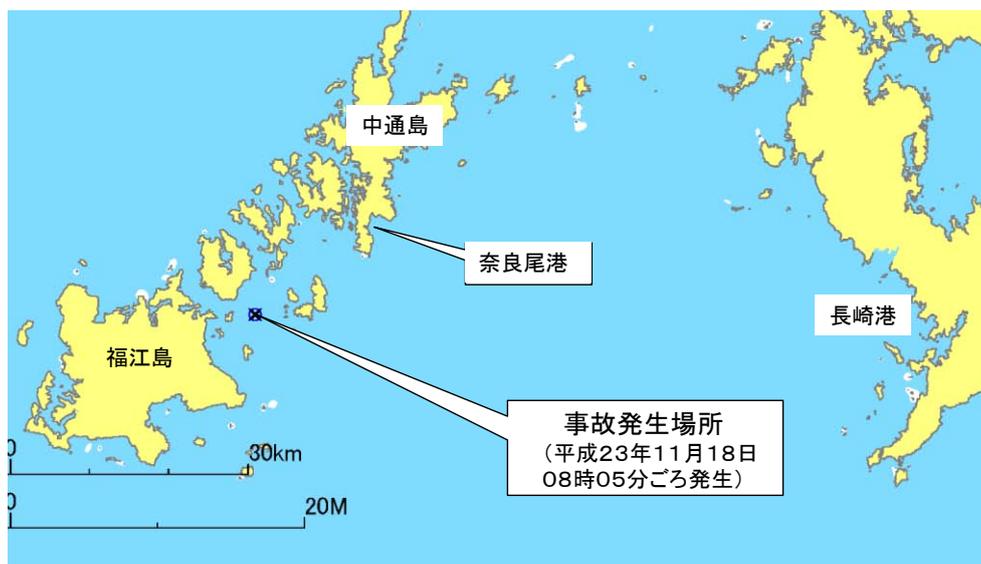
5.2 今後必要とされる事故等防止策

A社は、次のことに留意し、事故の再発防止に努める必要がある。

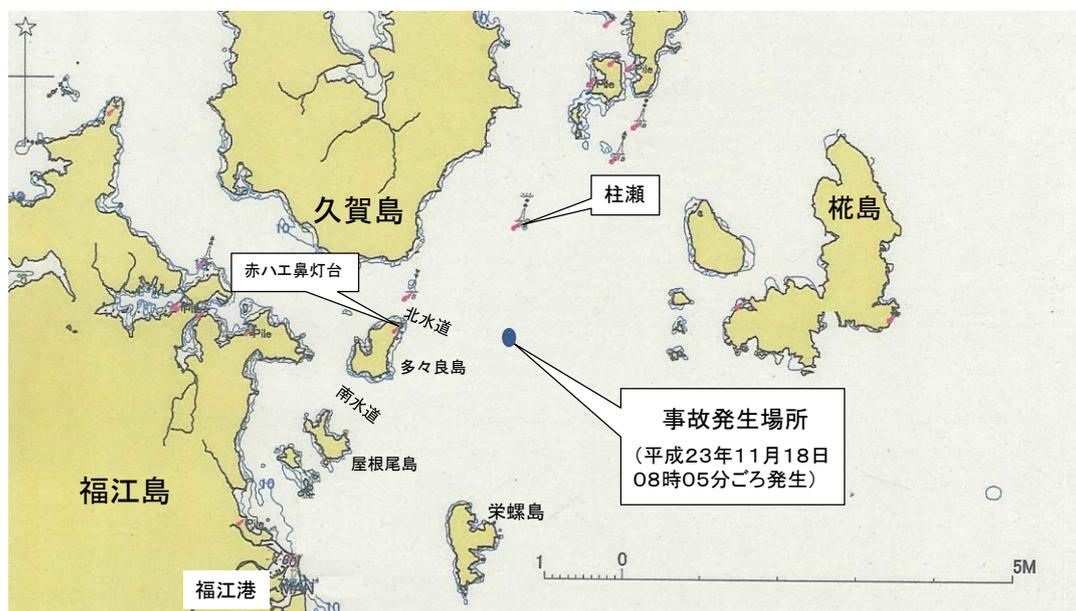
- (1) 気象及び海象に注意し、高い波となることが予想される海域の航行を避けること。
- (2) 荒天が予想される場合は、旅客に対し、揺れに備える注意喚起を徹底すること。
- (3) 車両の固縛は、以下の事項を考慮し、適切に行うこと。

- ① 定期的にフェリーを利用する車両には、車両のなるべく低い位置に固縛用ベルトが取付け可能な措置を採ること。
- ② 車両のなるべく低い位置から縦方向及び横方向に45°、甲板面から上方へ45°方向の角度で可能な限り、固縛を行うこととし、車両の両側の甲板上に取付箇所がない場合は、固縛用ベルトをたすき掛けで取り付けることも考慮すること。
- ③ 車両の重量に見合った強度を有する固縛用ベルトの使用又は固縛用ベルトの増加等の措置を講ずること。

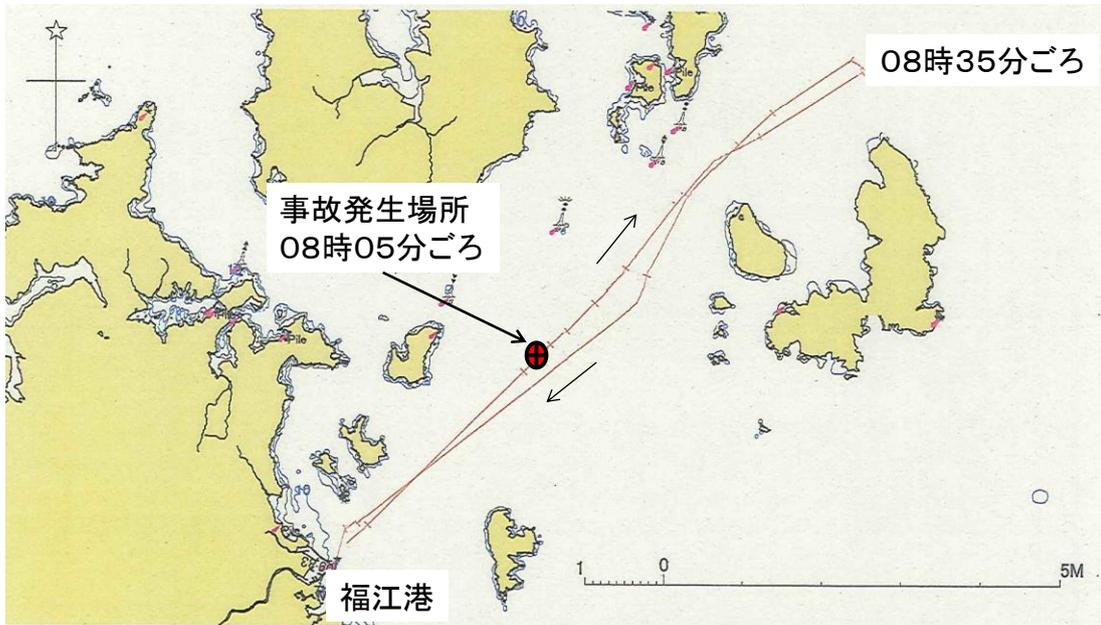
付図1 事故発生場所（その1）



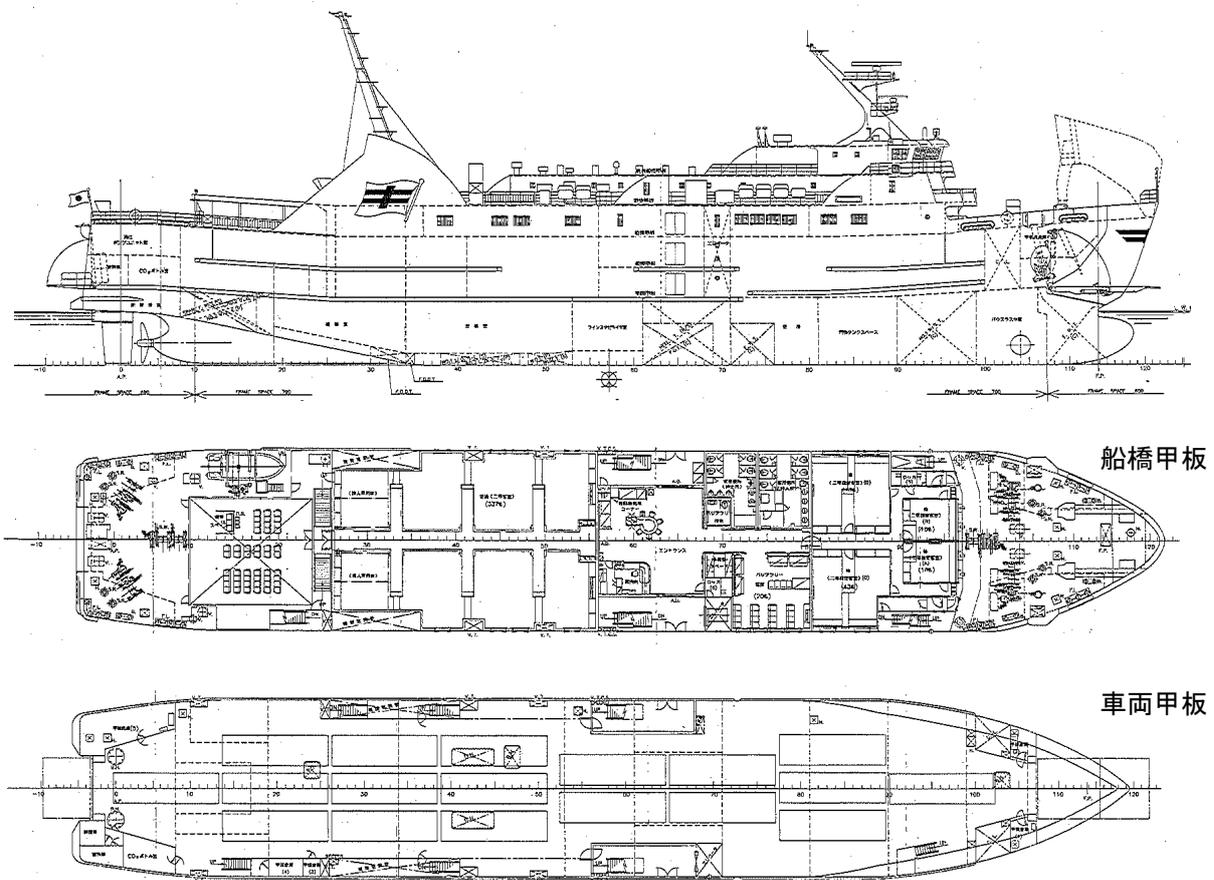
付図2 事故発生場所（その2）



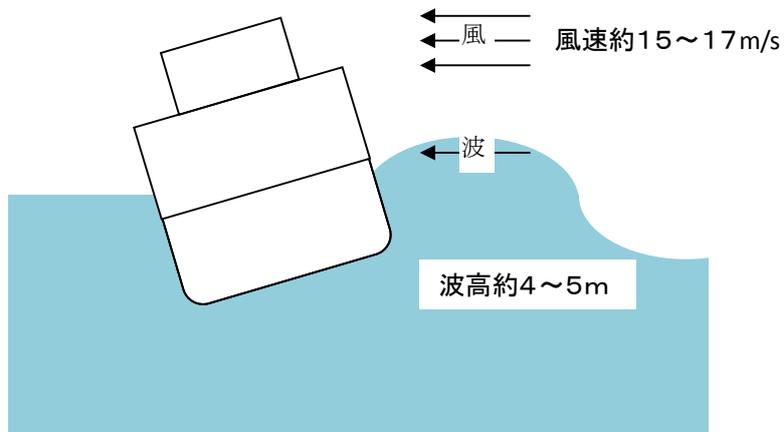
付図3 推定航行経路図



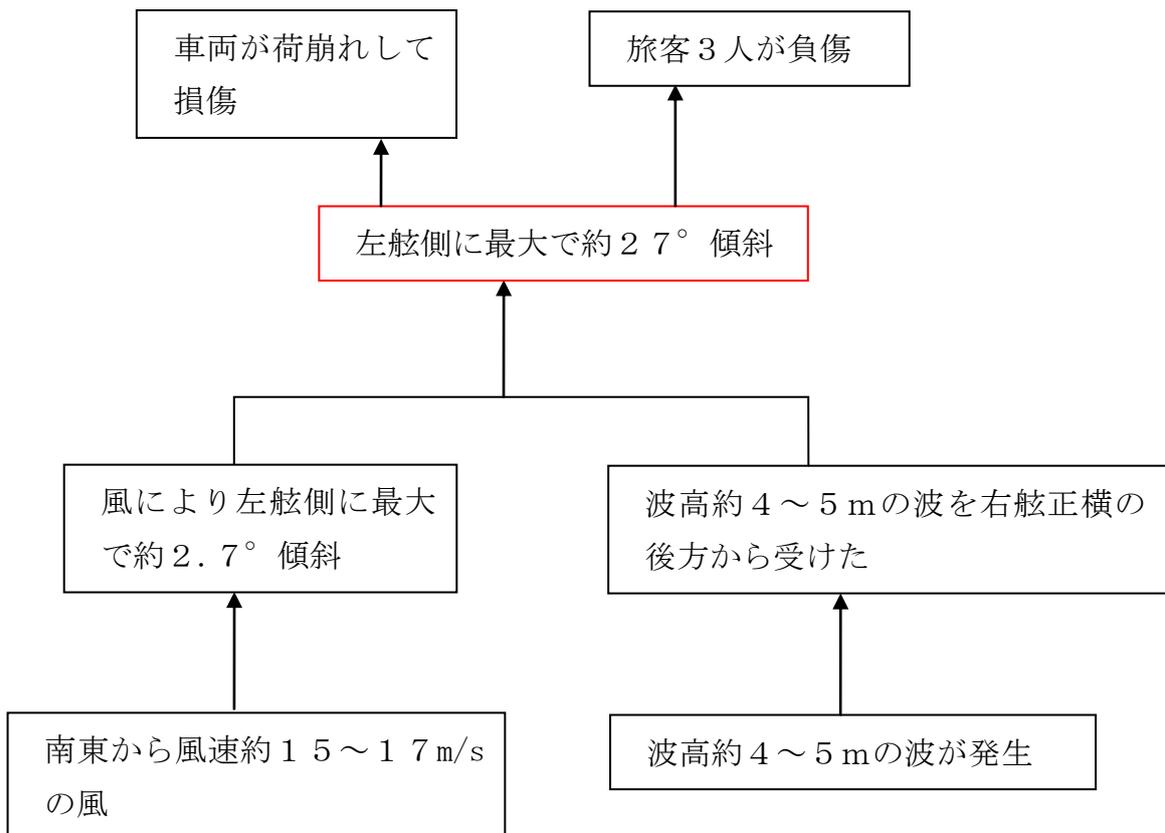
付図4 一般配置図



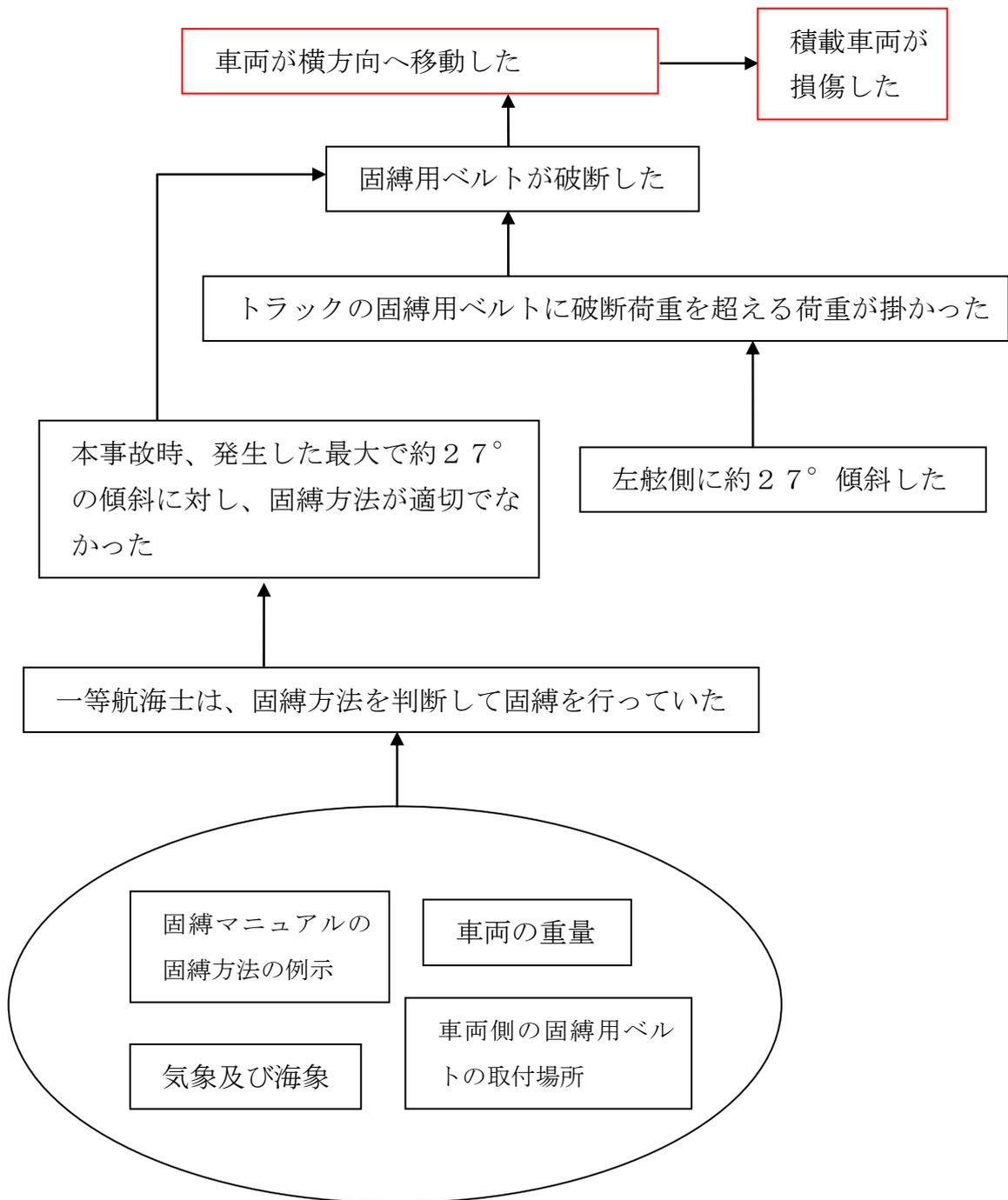
付図5 船体傾斜に関する解析



付図6 船体傾斜に至る要因（まとめ）



付図7 荷崩れに至る要因（まとめ）



別添

旅客フェリー船体傾斜に係る解析調査

目次

1. はじめに	1
1. 1 解析調査の目的	1
1. 2 解析調査の概要	1
2. 乗船調査	2
2. 1 調査概要	2
2. 2 調査結果	2
3. 復原性の推定	9
3. 1 事故発生時の復原性	9
3. 2 改造後の復原性及び従来船の復原性	12
4. 船体傾斜の推定	16
4. 1 事故発生時の船体傾斜	16
4. 1. 1 波浪による傾斜	17
4. 1. 2 風による傾斜	20
4. 1. 3 車両の移動に伴う傾斜	22
4. 1. 4 事故発生時の傾斜	22
4. 2 改造後及び従来船との比較	23
4. 2. 1 波浪による傾斜	24
4. 2. 2 風による傾斜	32
4. 3 大傾斜防止策の検討	33
5. 固縛の解析	35
5. 1 車両甲板での固縛実態調査	35
5. 2 車両甲板での車両事故の状況	41
5. 3 荷重関係の用語の整理	42
5. 4 摩擦係数について	43
5. 5 固縛の強度評価計算方法	44
5. 6 事故時に固縛装置に掛かった力	48
5. 7 固縛強度の評価と固縛の改善策の検討	50
6. まとめ	54
付録1 等価メタセンタ高さ	57
付録2 船橋に設置された傾斜計の指示角	60
付録3 通常運航時の横揺	62

1. はじめに

1. 1 解析調査の目的

本解析調査は、平成23年11月18日、長崎県五島市福江港港外で発生した旅客フェリー船体傾斜事故の調査に資するため、次の解析を行うことを目的とする。

- ①事故時の旅客フェリーの復原性を算出し、船体の大傾斜の可能性について検討する。
- ②積荷の固縛状況をもとに、荷崩れの可能性について検討する。

1. 2 解析調査の概要

(1) 乗船調査 (第2章)

- ・固縛の解析及び船体傾斜の推定に必要な情報等を収集するために、事故を起した旅客フェリー（以下、「本船」と言う。）に乗船し、車両の固縛状況を調査するとともに、操舵時の船体傾斜の計測を行った。

(2) 復原性の推定 (第3章)

- ・事故当日の本船の搭載物件（燃料、車両他）等の情報を基に重量重心を算定し、事故発生時の復原性を推定した。
- ・また、本年1月に実施された本船の改造工事後の状態で事故当日と同一の物件を搭載した場合（以下、「改造後」と言う。）の復原性、及び、本船と同じ航路（長崎⇄福江）に就航している他の旅客フェリー（以下、「従来船」と言う。）の事故当日の復原性を推定して、本船の事故発生時の復原性と比較した。

(3) 船体傾斜の推定 (第4章)

- ・事故時の本船の運航状況及び大傾斜が発生した際の波浪及び風に関する情報を基に、事故発生時の船体の傾斜角を推定した。また、旋回時の船体傾斜特性と事故時の大傾斜の関連について検討を加えた。
- ・事故発生後の搭載物件の状況に関する情報を基に、車両の移動に伴う傾斜モーメントを算定し、事故発生後の傾斜角を推定した。
- ・改造後の本船及び従来船について、上述した事故発生時の本船に対する計算と同一の計算を行って傾斜角を推定し、事故発生時の本船の傾斜角の推定結果と比較するなどして、大傾斜の発生を防止するための方策の検討を行った。

(4) 固縛の解析 (第5章)

- ・乗船調査を行った結果から、本船の固縛資材の特徴を踏まえ、車両の固縛実施状況について分析を行った。
- ・推定された事故発生時の船体の傾斜角及び報告された固縛状況等を基に、固縛強度の評価計算を行って荷崩れの発生状況を解析するとともに、本船の固縛方法の改善策を検討した。

2. 乗船調査

固縛の解析及び船体傾斜の推定に必要な情報等を収集するために、事故を起した旅客フェリーに乗船し、車両の固縛状況を調査するとともに、航行中の操舵に伴う船体傾斜の計測を行った。

2. 1 調査概要

(1) 調査日

1 日目：平成 24 年 1 月 12 日（乗船航路：長崎→福江）

2 日目：平成 24 年 1 月 13 日（乗船航路：福江→奈良尾→長崎）

(2) 調査項目

①車両固縛状況

車両甲板において出港前の車両積み込み時から作業完了まで固縛作業に立会い、以下の事項について調査を行った。

- ・使用している固縛資材
- ・固縛資材の取り付け作業
- ・車両の固縛状況

②操舵に伴う船体傾斜

船橋にジャイロ等を取り付けて、舵角、横傾斜角等の計測を行った。計測（記録）項目及び計測（記録）機材は以下のとおり。

- ・船体運動：小型ジャイロ
- ・位置（針路、速度、航跡）：簡易 GPS
- ・舵角、船速、風向・風速：ブリッジ計器のビデオ映像
- ・波浪状況：海面のビデオ映像

2. 2 調査結果

(1) 車両固縛状況

調査時の車両甲板の状況（車両搭載前）及び使用されている固縛資材を写真 2.1～写真 2.6 に示す。調査結果については、事故当日の固縛状況の解析とあわせて第 5 章に記述する。

(2) 操舵に伴う船体傾斜

計測機材の設置状況等を写真 2.7～写真 2.10 に示す。船体運動計測用小型ジャイロ（写真 2.7）は、操舵スタンド後方の作業机上に設置した。設置位置は、船橋後壁より前方 1.8m（船体中央から前方 22.7m）、船体中心線から右方 0.53m、船橋床面から高さ 0.72m（基線から上方 16.04m）である。また、船位等計測用簡易 GPS は航海船橋甲板の空調機室後方の暴露部に設置した（船体中央から前方 8.04m、船体中心線から右方 0.89m、基線から上方 15.29m）（写真 2.10）。

計測した船体運動の一例を図 2.1 に示す。図 2.1 に示したデータは、調査 2 日目に福江から奈良尾まで航行中に計測したもので、上図の黒線が横揺（横傾斜）角、赤線が船首揺角速度、下図が船首揺角を示している。横軸は計測開始時刻（7 時 40 分）からの時間である。下図の船首揺角（船首方位角）のデータに示されているように、図 2.1 に示した計測時間帯に、本船は計測開始からおおよそ 2,700 秒後、2,800 秒後及び 3,100 秒～3,500 秒後まで約 100 秒間隔で 5 回の計 7 回比較的大きな操舵（左舵）を行っており、それに伴い最大 4 度程度右傾斜している。



写真 2.1 車両甲板（船首側）



写真 2.2 車両甲板（船尾側）



写真 2.3 オーバーラッシング用資材（車両甲板天井）



写真 2.4 固縛用ロックナー端部（エレファントフット）



写真 2.5 車両固定金具
(クローバーリーフプレート)



写真 2.6 使用されていた固縛資材



写真 2.7 小型ジャイロ設置状況 (船橋後部作業机上面)



写真 2.8 船橋前壁に設置された舵角指示器等



写真 2.9 舵角指示器等撮影用ビデオカメラ設置状況

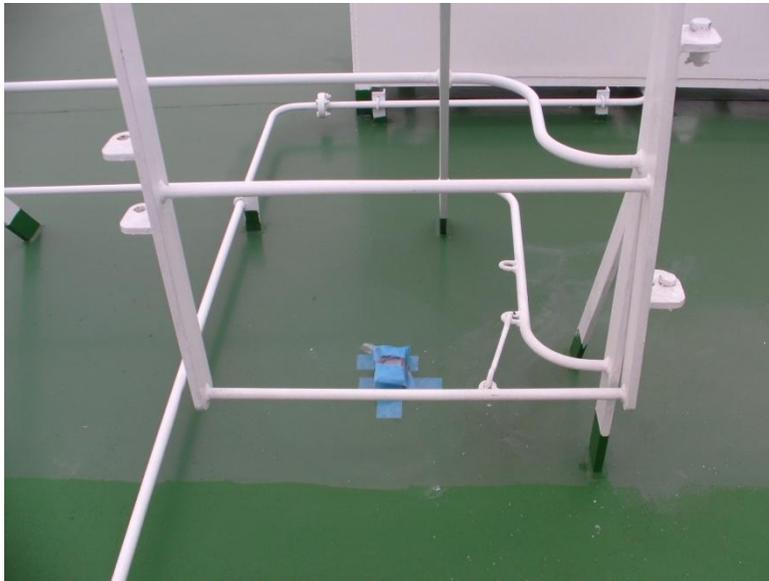


写真 2.10 簡易 GPS 設置状況 (航海船橋甲板暴露部)

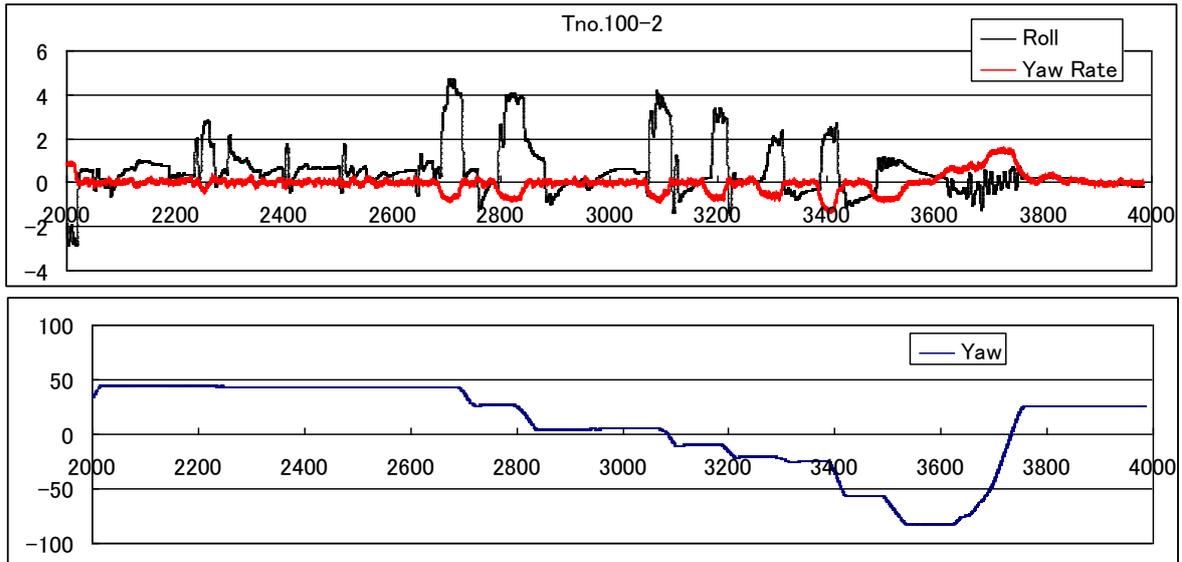


図 2.1 横揺角及び船首揺角速度（上図）、船首揺角（下図）の計測例

図 2.1 に例示した計測データから操舵前後の横揺角を読み取るとともに、操舵した時点での舵角を船橋前壁の舵角指示器を撮影したビデオ画像から読み取って対比することで、操舵に伴う船体傾斜を検査することができる。表 2.1 に全ての計測データについての読み取り結果をまとめて示す。横揺（横傾斜）は操舵開始前の値（"roll_1"）と操舵後に船首揺角速度が一定になった状態での値（"roll_2"）を読み取り、その差を操舵に伴う傾斜角（"roll"）とした。また、舵角は操舵開始前の値（"操舵前"）と操舵後に針路が整定するまでの間取っていた舵角（"定常"）を読み取り、その差を操舵角（" δ "）とした。傾斜角は右舷側への傾斜を正とし、舵角は右舵を正としている。表中には参考のため、操舵時点での船速及び風向、風速も示している。

表 2.1 に示したように、今回の乗船調査では、ほとんどの場合、操舵角は 4～6 度であり、操舵に伴う傾斜角は 2～4 度となっている。また、傾斜方向は舵角と逆方向（外方傾斜）である。なお、操舵に伴う船体傾斜として、操舵直後には内方傾斜（舵を取った側への傾斜）が発生するとされているが、計測データからは内方傾斜が判読できなかった。なお、調査官の説明でも、本船では内方傾斜はほとんどないとのことであった。

図 2.2 に操舵時の船速が事故発生時の速力に近い 18.5kn～19.5kn の計測結果（表 2.1 で黄色で示した計測）を、横軸に操舵角、縦軸に操舵に伴う傾斜角を取って示す。本船は操舵に伴い舵角の大きさと同程度船体が傾斜するとの調査官の説明と図 2.2 に示した今回の計測結果とは整合性が取れていると考えられる。

表 2.1 操舵に伴う船体傾斜及び操舵角計測結果

			横揺読み値			舵角読み値			船速読み値		風向風速読み値	
	time_1	time_2	roll_1 (deg.)	roll_2 (deg.)	roll(deg.)	操舵前 (deg.)	定常 (deg.)	δ (deg.)	操舵前 (kn)	定常 (kn)	風向	風速 (m/s)
2012/1/12 長崎→福江	16:54:56	16:57:24	-0.5	-2.3	-1.8	左0.5度	右4度	4.5	11.0	12.0	W~WNW	1~3.3
	17:03:53	17:04:20	-0.3	-2.1	-1.8	左2度	右4度	6	11.5	11.8	N~NW	1.7~5.1
	17:06:30	17:06:50	-0.6	-3.0	-2.4	0度	右4度	4	15.0	15.3	N~NNW	3.8~4.5
	17:07:58	17:08:14	-0.5	-3.0	-2.5	左2度	右4度	6	15.5	16.0	NW~NNW	3.7~6.1
	17:10:30	17:11:02	-0.6	-4.5	-3.9	左2度	右4度	6	19.0	19.0	N~NNW	5.1~7.4
	17:11:30	17:12:20	-0.7	-4.2	-3.5	0度	右4度	4	19.5	19.0	N~WNW	8~8.1
	17:17:53	17:19:34	-0.6	3.1	3.7	左2度	左6度	-4	19.5	19.3	NNW~NW	6.5~6.9
	17:48:30	17:49:00	-1.4	3.2	4.6	操舵試験(左5度)		-5	船橋内消燈のため舵角指示器のビデオ撮影不能			
17:48:30	17:49:34	-1.4	-6.4	-5.0	操舵試験(右5度)		5					
2012/1/13 福江→奈良尾	8:04:53	8:04:26	1.4	-1.6	-3.0	左2度	右2度	4	19.0	19.0	N~NNW	11.2~13.3
	8:06:33	8:06:50	0.5	-2.1	-2.6	左0.5度	右3度	3.5	18.5	18.5	N	7.6~11.8
	8:24:34	8:25:05	0.7	4.6	3.9	左2度	左5度	-3	18.8	18.5	NW~NNW	9.5~12.8
	8:26:26	8:27:02	0.0	4.0	4.0	左2度	左6.5度	-4.5	18.5	18.5	NNE~N	6.3~9.8
	8:30:57	8:31:28	0.5	3.8	3.3	左0.5度	左5.5度	-5	18.5	18.5	NNW~N	7.5~11.3
	8:33:02	8:33:24	0.2	3.3	3.1	左1.5度	左6度	-4.5	18.5	17.0	NW~NNW	8.3~8.5
	8:34:37	8:35:02	0.1	2.2	2.1	左3度	左6度	-3	15.5	14.0	NW~NNW	7.4~9.1
	8:36:19	8:36:49	-0.3	2.4	2.7	左3度	左16度	-13	12.0	11.0	NW~NNW	5.4~10

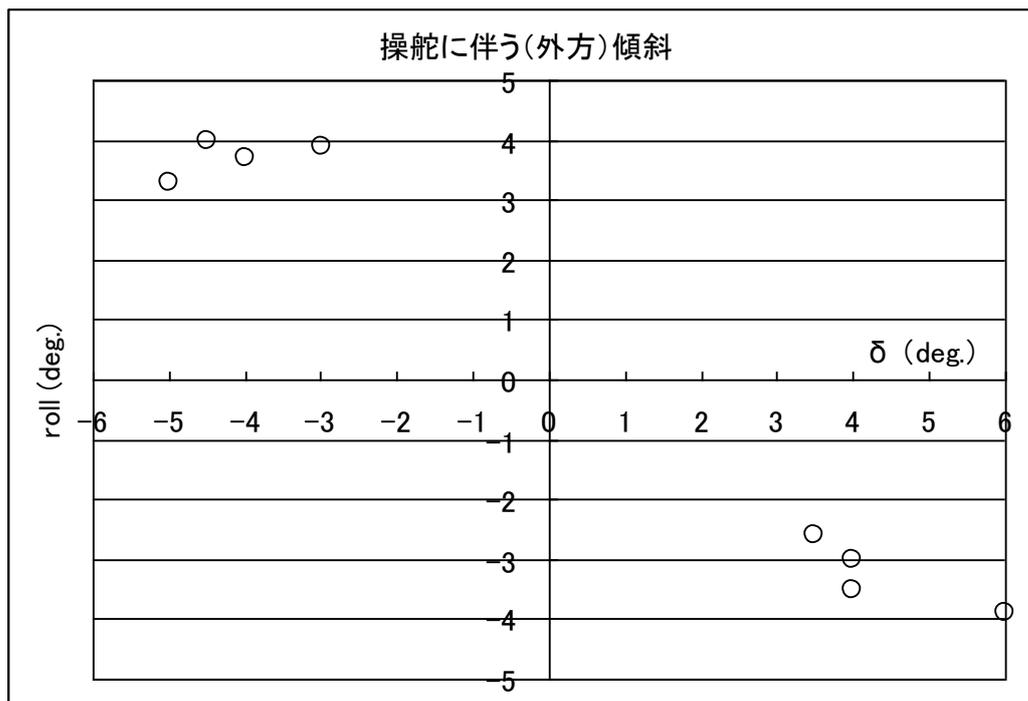


図 2.2 操舵角と操舵に伴う船体傾斜 (操舵前船速 18.5kn~19.5kn)

3. 復原性の推定

事故当日の搭載物件（燃料、車両他）等の情報を基に本船の重量重心を算定し、事故発生時の復原性を推定した。また、本年 1 月に実施された本船の改造工事後の状態で事故当日と同一の物件（燃料、車両等）を搭載した場合の復原性や本船と同じ航路に就航している別の旅客フェリーの事故当日の復原性を推定して、事故発生時の本船の復原性と比較した。

3. 1 事故発生時の復原性

(1) 重量重心

調査官から提供された、事故当日の搭載物件に関する情報を基に、復原性資料の満載出港状態の重量重心計算書の各項目を事故発生時の値に修正し、事故発生時の重量重心を算定した。その際、搭載されていた車両及びコンテナの前後方向及び左右方向の重心位置に関しては、調査官から提供された、事故発生時の「車両搭載位置図」を読み取って値を設定した。また、車両の上下方向の重心位置は、復原性資料における設定を援用して、トラックに関しては車両甲板上 1.8m、乗用車に関しては車両甲板上 1.0m とした。なお、搭載されたコンテナの大きさ（高さ 1.6m）から、コンテナの上下方向の重心位置は車両甲板上 0.8m と仮定した。

表 3.1 に事故発生時の搭載車両及びコンテナの重量重心を示す。重心は、前後位置 (mid-G)、上下位置 (KG) の他、左右位置 (C.L.-G) も示している。また、表 3.1 で、「移動前」としたのは、車両が移動する前の状態の重量重心であり、「移動後」としたのは、大傾斜に伴い車両が移動した後の状態の重量重心である。

事故時の搭載車両及びコンテナの合計重量は 106.6t であり、大傾斜に伴い車両が移動したため、搭載車両及びコンテナの横方向の重量モーメントが 147.3t-m 変化し、重心の左右位置が左舷側 1.28m となった。なお、車両移動に伴い搭載車両及びコンテナの重心の前後位置も 0.01m 船首側に移動したが、その重量モーメントの変化は 1.3t-m と小さかった。

表 3.1 「本船」事故発生時の搭載車両及びコンテナの重量重心

		重心位置(m)			重量モーメント(t-m)			
		w (t)	mid-G	KG	C.L.-G	w*mid-G	w*KG	w*C.L.-G
移動前	車両	105.8	-2.37	7.41	0.15	-250.8	783.6	15.5
	コンテナ	0.8	27.29	6.75	-5.59	21.8	5.4	-4.5
	合計	106.6	-2.15	7.40	0.10	-229.0	789.0	11.1
移動後	車両	105.8	-2.38	7.41	-1.25	-252.1	783.6	-131.8
	コンテナ	0.8	27.29	6.75	-5.59	21.8	5.4	-4.5
	合計	106.6	-2.16	7.40	-1.28	-230.3	789.0	-136.3
移動に伴う横方向重量モーメントの変化								-147.3

注) mid-G: 船体中央より後方を正 C.L.-G: 船体中心線より右舷側を正

表 3.2 に「移動前」の本船の重量重心計算表を示す。「移動後」の重量重心は表 3.1 に示した搭載車両及びコンテナの重量重心の差分だけが異なる。また、表 3.3 に各タンクの自由表面 2 次モーメント I と搭載物の比重 γ を示す。

表 3.4 に重量重心計算により算出した、事故発生時「移動前」の状態の排水量 (W)、重心前後位置 (mid-G)、重心高さ (KG) 及び燃料タンク、清水タンク等の自由表面による見かけの重心上昇量 (GG0) を復原性資料に示された満載出港状態の値とともに示す。なお、「移動後」の重量重心は、重心の前後位置が若干 ($1 \times 10^{-3}m$) 異なるだけであり、復原性を検討する際には、「移動前」と同一と見なせるため省略した。また、以降、本章では事故発生時の復原性として「移動前」状態について記述することとし、単に「事故発生時」と表記する。

表 3.2 重量重心計算（「本船」事故発生時（移動前））

項目	積付率(%)	重量(t)	MG(m)	モーメント(t-m)		KG(m)	モーメント(t-m)
				後部	前部		
LIGHT WEIGHT		1,919	3.34	6,409		6.92	13,279
D.W. CONSTANT		35	13.10	458		5.15	180
LUBRICATING OIL	71	17	10.22	170		0.54	9
PROVISION		1	2.20	2		12.70	13
FRESH WATER TANK :							
FRESH WATER TANK (C)	96	65	-11.44		744	1.70	111
SPARE FRESH WATER TANK (C)	71	50	30.82	1,541		4.30	215
FUEL OIL TANK :							
F.O.T. (C)	59	60	-5.50		329	1.04	62
F.O. SERVICE T.(C)	97	7	25.65	185		4.04	29
F.O. DRAIN T.(C)	42	1	15.84	11		0.37	0
PASSENGER, TRUCK, CAR :							
PASSENGER (90kg/1p)		28	8.53	242		11.46	325
TRUCK, CAR		107	-2.15		229	7.40	789
WATER BALLAST TANK :							
FORE PEAK TANK (C)	0	0	-34.90			0.00	
No.1 W.B.T. (C)	0	0	-26.13			0.00	
No.2 W.B.T. (P)	91	50	26.67	1,334		4.61	231
No.2 W.B.T. (S)	78	50	30.10	1,505		4.49	225
HEELING T. (P)	24	26	-5.85		152	1.55	40
HEELING T. (S)	24	26	-5.85		152	1.55	40
OTHER TANK :							
BILGE TANK (S)	31	2	4.57	11		0.20	0
WASTE OIL TANK (P)	71	5	4.57	22		0.43	2
				11,890	1,606		
合計		2,449	4.20	10,285		6.35	15,550

表 3.3 各タンクの自由表面 2次モーメント I 及び搭載物の比重 γ （「本船」事故発生時）

液体の自由表面			
タンク名	2次モーメント I(m ⁴)	比重 γ (t/m ³)	モーメント γI (t-m)
F.W.T	63	1.00	63
SP.F.W.T	33	1.00	33
F.O.T	101	0.92	93
F.O. DRAIN T	1	0.92	1
F.P.T	0	1.00	0
No.1 W.B.T.(C)	0	1.00	0
No.2 W.B.T.(P)	22	1.00	22
No.2 W.B.T.(S)	26	1.00	26
HEELING T.(P)	16	1.00	16
HEELING T.(S)	16	1.00	16
No.1 & 2 L.O.S.T	3	0.87	2
BILGE TANK (S)	3	1.00	3
WASTE OIL TANK (P)	3	0.87	2
合計			276

表 3.4 から、事故発生時の状態では、設計時に復原性の検討が行われた満載出港状態に比べて、排水量は約 210t 軽く、重心の上下位置はほとんど同じであるが、重心の前後位置は 1.6m 程度船尾寄りにあったと推定されることが分かる。なお、事故発生時の状態における自由表面による見かけの重心上昇量は、満載出港状態とほぼ同じであると推定される。

表 3.4 「本船」事故発生時の船体状態

状態	W (t)	mid-G (m)	KG (m)	GG ₀ (m)
事故発生時(移動前)	2449	4.20	6.35	0.11
計画満載出港	2656	2.56	6.36	0.10

(2) 復原性

図 3.1 に、表 3.4 に示した重量重心で事故発生時の復原力 (GZ) を計算した結果 (赤線) を満載出港状態の復原力 (黒線) とともに示す。また、表 3.5 に事故発生時のメタセンタ高さ (GM)、海水流入角 (ϕ_f) の計算結果を喫水 (da: 船尾喫水、df: 船首喫水、dm: 平均喫水)、トリム (τ : da-df) の計算結果とともに示す。海水流入位置は復原性報告書に記載された船橋甲板 Fr.59 及び Fr.70 位置の角窓下端とした。表中には参考のため満載出港状態の値も示している。なお、図 3.1 に示した GZ 曲線及び表 3.4 に示した GM とも、燃料タンク等の自由表面 (表 3.3) による見かけの重心上昇を考慮した値となっている。

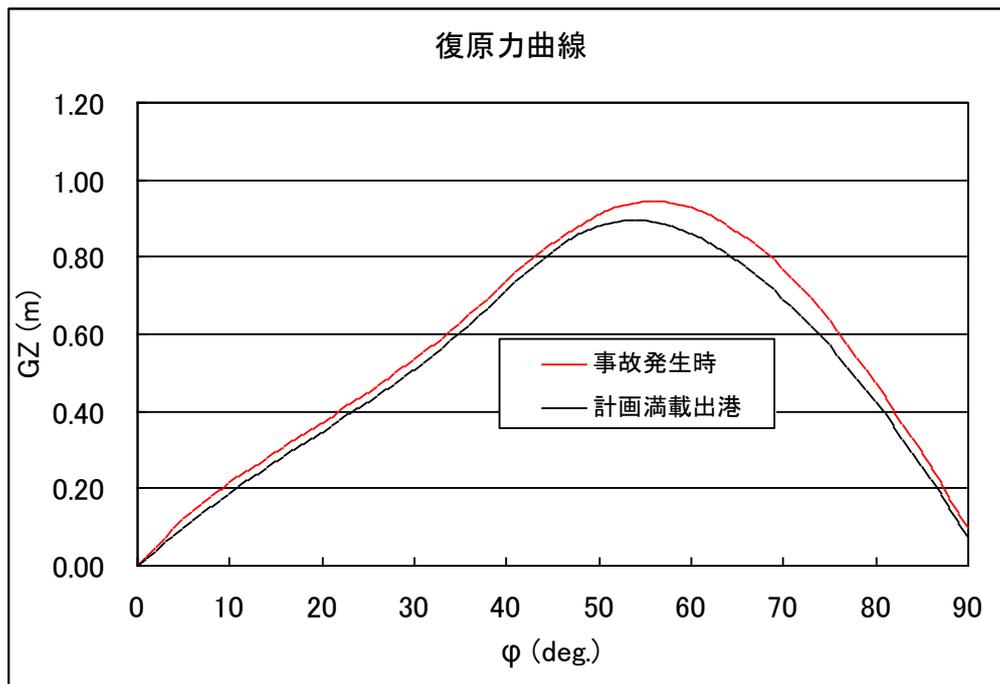


図 3.1 「本船」事故発生時の復原力曲線

表 3.5 「本船」事故発生時のメタセンタ高さ、海水流入角及び喫水

状態	GM (m)	ϕ_f (deg.)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
事故発生時	1.49	52.3	4.58	3.37	3.98	1.21
計画満載出港	1.21	50.0	4.36	4.25	4.30	0.11

図 3.1 に示したように、事故発生時の本船の復原力（赤線）は、満載出港状態の復原力（黒線）より若干大きかったと推定される。また、表 3.5 に示したように、事故発生時の本船のメタセンタ高さ GM は満載出港状態より 0.28m も大きい 1.49m であり、海水流入角 ϕ_f も約 52 度と満載出港状態より 2 度程度大きかったと推定される。そのため、事故発生時の本船の復原性は、設計時に復原性の検討が行われた満載出港状態と同等以上であったと考えられる。

3. 2 改造後の復原性及び従来船の復原性

本船は、事故後の本年 1 月、航走時船首トリムモーメント対策他のため、船体後部船底に固定バラスト（コンクリート）を搭載した（以下、「改造工事」と言う。）。また、本船と同じ航路（長崎⇄福江）には、昭和 57 年に建造された別の旅客フェリー（以下、「従来船」と言う。）が就航しており、事故当日も運航されていた。ここでは、固定バラスト搭載後（以下、「改造後」と言う。）の本船に事故当日と同一の物件が搭載されていた場合の復原性及び従来船の事故当日の復原性を推定して、事故発生時の本船の復原性と比較した。

(1) 重量重心

①改造後

表 3.6 に固定バラスト搭載後の軽荷状態の重量重心を、固定バラスト搭載前（事故発生時）の軽荷状態の重量重心と比較して示す。改造工事により軽荷状態の排水量 W が 71t 増加し、重心の前後位置 mid-G が 0.37m 船尾側に移動するとともに、重心の上下位置 KG が 0.14m 下がっている。また、表 3.7 に、「改造後」の軽荷状態で、事故発生時と同一の燃料、車両等搭載した場合（以下、「事故発生時（改造後）」と表記する。）の排水量 (W)、重心前後位置 (mid-G)、重心高さ (KG) 及び燃料タンク、清水タンク等の自由表面による見かけの重心上昇量 (GG₀) を事故発生時の値とともに示す。表 3.7 から、固定バラスト搭載により、事故発生時と同一の燃料、車両等を搭載した状態で、重心が 0.09m 下がることが分かる。

表 3.6 「本船」固定バラスト搭載による軽荷状態の変化

状態	W (t)	mid-G (m)	KG (m)
固定バラスト搭載後(改造後)	1990	3.71	6.78
固定バラスト搭載前	1919	3.34	6.92

表 3.7 「本船」固定バラスト搭載後の船体状態

状態	W (t)	mid-G (m)	KG (m)	GG ₀ (m)
事故発生時(改造後)	2520	4.47	6.26	0.11
事故発生時	2449	4.20	6.35	0.11

②従来船

表 3.8 に事故当日の「従来船」の重量重心を示す。また、表 3.9 に事故当日の各タンクの自由表面 2 次モーメント I と搭載物の比重 γ を示す。「従来船」には減揺水槽（アンチローリングタンク）が設置されているが、近年使用していないとのことで、事故当日もタンクは空であったとのことである。

表 3.10 に、事故当日の「従来船」の排水量 (W)、重心前後位置 (mid-G)、重心高さ (KG) 及び燃料タンク、清水タンク等の自由表面による見かけの重心上昇量 (GG₀) を、設計時の満載出港状態の値とともに示す。表 3.10 から、「従来船」は事故当日、設計時に復原性の検討が

行われた満載出港状態に比べて、排水量は約 210t 軽く、重心の上下位置は 0.37m 高く、前後位置は 0.2m 船尾寄りにあった状態で運航されていたと推定されることが分かる。

表 3.8 重量重心計算（「従来船」事故当日）

項目	重量 (t)	⊗G (m)		モーメント (t-m)		KG (m)	モーメント (t-m)
		前部	後部	前部	後部		
軽荷状態	1,770		2.43		4,298	6.28	11,107
乗組員及び所持品(20人)	2	12.47		25		3.52	7
倉庫品	10	0.00		0		6.00	60
機関室内水及び油	19		15.64		297	3.26	62
潤滑油	10		9.80		98	0.30	3
糧食	3	17.50		53		6.00	18
小計	1,814			77	4,693		11,257
(清水)							
NO.4 F.W.T. (C)	45	7.90		355		0.93	42
小計	45			355			42
(燃料)							
(B.OIL) NO.5 F.O.T. (P)	21	0.73		15		0.61	13
(S)	21	0.75		16		0.61	13
(B.OIL) NO.6 F.O.T. (P)	9		4.10		38	0.32	3
(S)	8		4.10		34	0.30	2
小計	60			31	71		31
(旅客及び車両)							
旅客(40人)	4	3.38		12		10.41	650
車両	136	0.45		61		6.67	906
小計	139			73			1,556
(アンチローリングタンク)							
アンチローリングタンク内水	0	0.99		0		2.01	0
小計	0			0			0
(海水)							
F. P. T. (C)	0						
NO.1 W.B.T. (C)	0						
NO.2 W.B.T. (P/S)	0						
NO.3 HEEL.T. (P/S)	0						
NO.7 W.B.T. (P/S)	0						
小計							
計	2,058		2.05	537	4,765	6.26	12,886
					4,227		

表 3.9 各タンクの自由表面 2 次モーメント I 及び搭載物の比重 γ （「従来船」事故当日）

タンク名	2次モーメント I(m ⁴)	比重 γ (t/m ³)	モーメント γI (t-m)
L.O.S.T.(P/S)	2.7 × 2	0.920	5.0
NO.4 F.W.T.(C)	18.9	1.000	18.9
NO.5 F.O.T.(P)	51.5	0.920	47.4
NO.5 F.O.T.(S)	51.5	0.920	47.4
NO.6 F.O.T.(P/S)	114.8	0.920	105.6
A.R.T.(C)	0.0	1.025	0.0
合計			224.2

表 3.10 「従来船」事故当日の船体状態

状態	W (t)	mid-G (m)	KG (m)	GG ₀ (m)
事故当日	2058	2.05	6.26	0.11
満載出港状態	2269	2.25	5.89	0.10

(2) 復原性

図 3.2 に、表 3.7 に示した「本船」事故発生時（改造後）の状態の重量重心で復原力（GZ）を計算した結果（黒線）及び表 3.10 に示した「従来船」事故当日の状態の重量重心で復原力を計算した結果（緑線）を「本船」事故発生時の状態の復原力（赤線）とともに示す。また、表 3.11 に「本船」事故発生時（改造後）と「従来船」事故当日のメタセンタ高さ（GM）、海水流入角（ ϕ_f ）の計算結果を喫水（da：船尾喫水、df：船首喫水、dm：平均喫水）、トリム（ τ ：da-df）の計算結果とともに示す。海水流入位置は「本船」、「従来船」とも復原性報告書に記載された位置とした（「本船」：船橋甲板 Fr.59 及び Fr.70 位置の角窓下端、「従来船」：船橋甲板出入口下端）とした。表中には比較のため「本船」事故発生時の値も示している。なお、図 3.2 に示した GZ 曲線及び表 3.11 示した GM とも、燃料タンク等の自由表面による見かけの重心上昇を考慮した値となっている。

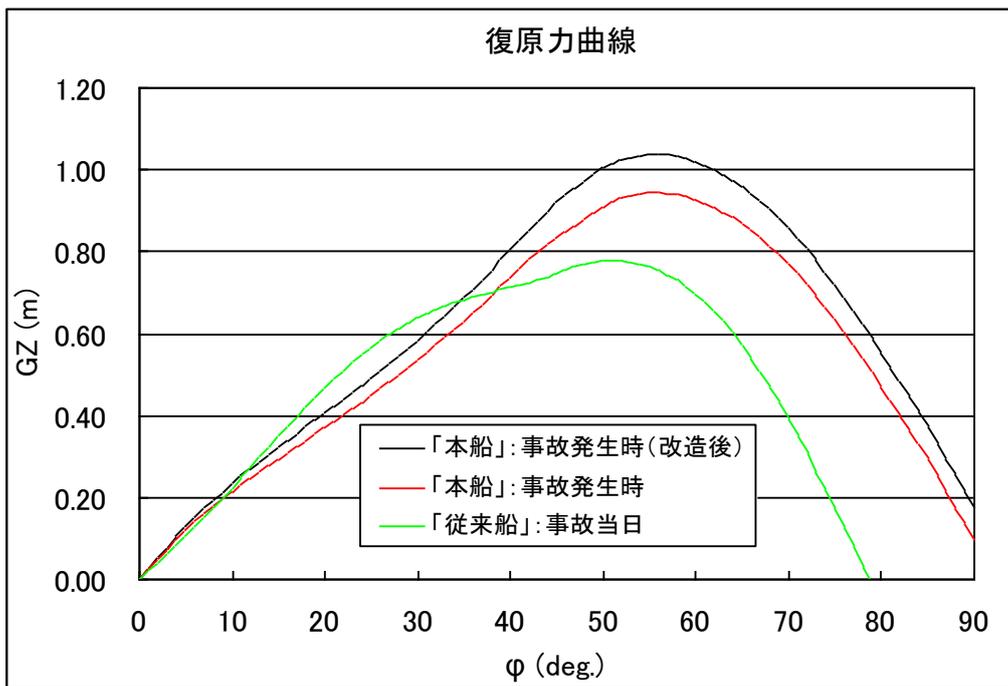


図 3.2 「本船」事故発生時（改造後）及び「従来船」事故当日の復原力曲線

表 3.11 「本船」事故発生時（改造後）及び「従来船」事故当日のメタセンタ高さ、海水流入角及び喫水

状態	GM (m)	ϕ_f (deg.)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
「本船」: 事故発生時(改造後)	1.55	51.8	4.69	3.39	4.04	1.30
「本船」: 事故発生時	1.49	52.3	4.58	3.37	3.98	1.21
「従来船」: 事故当日	1.22	46.6	3.67	3.39	3.53	0.28

①改造後

表 3.11 に示したように、「本船」は、船体後部船底に固定バラストを搭載したことで、事故発生時と同一の燃料、車両等を搭載した場合でも、メタセンタ高さ GM が 1.55m と事故発生時の改造工事前の状態に比べて 0.06m 大きくなる。また、図 3.2 に示したように、復原力 (GZ) も全般的に大きくなる。但し、海水流入角 ϕ_f は、固定バラスト搭載に伴う喫水の増加やトリムの変化の影響により、固定バラスト搭載の前後でほとんど変化しない。

②従来船

表 3.11 に示したように、事故当日の「従来船」のメタセンタ高さ GM は 1.22m であり、事故発生時の「本船」の GM より 0.27m も小さい。但し、図 3.2 に示した復原力 (GZ) を比較すると、傾斜角が約 10 度から約 40 度までの範囲で、事故当日の「従来船」の復原力 (緑線) は、事故発生時の「本船」の復原力 (赤線) より大きくなっている。なお、海水流入角 ϕ_f は事故当日の「従来船」は約 47 度であり、事故発生時の「本船」に比べて 5 度程度小さい。

4. 船体傾斜の推定

事故時の本船の運航状況及び大傾斜が発生した際の波浪及び風に関する情報を基に、事故発生時の船体の傾斜角を推定するとともに、事故発生前後の搭載車両の状況に関する情報から車両の移動に伴う傾斜モーメントを算定し、事故発生後の傾斜角を推定した。また、本船は操舵時に比較的大きな傾斜が発生することから、旋回時の船体傾斜特性と事故時の大傾斜の関連について検討を加えた。更に、改造後の本船及び従来船について、上述した事故発生時の本船に対する計算と同一の計算を行って傾斜角を推定し、事故発生時の本船の傾斜角の推定値と比較するなどして、大傾斜の発生を防止するための検討を行った。

4. 1 事故発生時の船体傾斜

(1) 事故の発生状況

調査官によると、事故の発生状況は以下のとおりとのことであった。

「事故当日は、福江港出港後、多々良島沖を通過して北水道を航行中に潮波が大きくなり（波高 2～3m）、波にあわせて波を右舷船尾側から受けるように操船していたところ、右舷真横より若干後からの約 4～5m の大波を視認し、左舵 15 度をオーダーしたが、4、5 秒で波を受け左舷側に 35 度まで傾斜した。その後、船体は復原したが左舷側に 4 度の傾斜が残った。

事故当日は、南東から平均で風速 12～13m/s の風が吹いており、事故現場付近では風速 15～17m/s であった。また、大傾斜した時の波は、三角波ではなく、うねりのような大きな波であり、南東から南南東の方向から入射してきた。なお、波の長さは船の全長より短かった。」

なお、調査官によると、当初の説明では、上述のとおり右舷真横より若干後から波を受けたとのことであったが、詳細を改めて聞き取ったところ、大波を受けた角度は右舷斜め後 45 度より真横寄りであったとのことであった。

また、調査官によると、事故発生時にはプロペラ回転数は毎分 176 回転（速力基準表で 19.4kn）であり、事故時の AIS データでは、8 時 3 分 13 秒に船速 18.6kn、船首方位 45 度、対地針路 47.9 度、8 時 4 分 48 秒に船速 16.9kn、船首方位 51 度、対地針路 53.1 度であった。

調査官の説明から、事故発生時の船体傾斜に関連する気象・海象及び運航状況をまとめると以下のとおりである。

①気象

風速：12～13m/s（事故当日平均）、風速 15～17m/s（事故現場付近）

風向：南東

②海象（事故時の大波：うねりのような波）

波高：4～5m

波長：船の全長（86.5m）より若干短い

波向：南東から南南東

③運航状況

船速：18.6kn（事故当日 8 時 3 分 13 秒の AIS データ）～

19.4kn（事故時主機回転数（毎分 176 回転）に対応する速力基準表の数値）

船首方位：45 度（事故当日 8 時 3 分 13 秒の AIS データ）

波との出会角：右舷後方 45 度～右舷正横 90 度

(2) 事故発生時の傾斜要因

上述した事故発生時の状況では、主な傾斜要因として①波浪、②風が考えられた。また、③大傾斜に伴う車両の移動が最終的な傾斜角の大きさに影響を及ぼすことも考えられた。

実際の事故では、これらの要因が連続的に船体に影響を及ぼして大傾斜に至ったと考えられる。しかしながら、傾斜要因の性状に関してその時系列的变化も含めた詳細な情報がないことから、上記要因を全て一括して考慮したモデル化を行って、事故時の大傾斜の発生状況を検討することは困難と考えられた。

ここでは、事故の発生状況で各傾斜要因が単独で作用した場合の傾斜角を推定することで、事故発生時の大傾斜の主要な要因について検討を行った。

4. 1. 1 波浪による傾斜

調査官の説明では、事故発生時の大傾斜の切っ掛けとなった波浪は、波高が約4～5mでうねりのような大きな波であり、波の長さは船の全長より短かったとのことであるが、事故現場周辺では波高2～3mの潮波が発生していたとのことでもあり、事故時に本船が遭遇した波浪の詳細な状況が必ずしも明確でなかった。そこで、事故発生時の波浪による横傾斜角は、調査官から説明があった波高、波長に相当する規則波中での横揺角で代表させることとした。

(1) 計算方法

横揺の計算は、一般的な船体運動計算法であるstrip法(STF法)を用いて行った。計算に必要な減衰係数については情報がなかったため、類似船型の実験値¹⁾を基にビルジキールの面積の違い等を補正して設定した。また、本船には減揺装置としてフィンスタビライザが装備されているが、調査官から示された製造者への問い合わせに対する回答書によると、事故当時の状況下での効果は非常に限定的と推測されるので、今回の計算ではフィンスタビライザの影響は考慮しなかった。なお、報告された事故発生時の傾斜角が35度と大きかったため、図3.1に示した本船の復原力特性が考慮できるように、横揺復原項には動復原力に注目した等価メタセンタ高さ(付録1)を用いた。

(2) 計算条件

上述した事故発生時の船速、船首方位、波高、およそその波向等を踏まえて、計算を行う運航状況(船速、波との出会角(波向))、波浪状況(波長、波高)を以下に示すように設定した。

①運航状況

船速 V : 16.6kn、18.6kn(事故発生時)、19.4kn(航海速力)

波との出会角(波向) χ : 40度(斜め右追波)～90度(右横波)

②波浪状況

波長 λ : 50.0m～97.3m(波長船長比 λ/L : 0.64～1.25)

波高 H_w : 5.0m

(3) 計算結果

1) 横揺特性

まず、基礎データとして本船の横揺特性を調べた。その際、横揺復原項には等価メタセンタ高さではなく、表3.5に示したメタセンタ高さ($GM=1.49m$)を用いた。計算状態の横揺固有周期(T_r)は10.4秒である。また、全般的な横揺れ特性を調べるため、上述した事故発生時の状況から設定した波長範囲より広い範囲の波長($\lambda/L=0.50\sim 2.50$)について計算を行った。

図4.1に船速 V を18.6knとした場合の計算結果を出会角 χ をパラメータとして示す。横軸は波長船長比(λ/L)、縦軸は最大波傾斜(kh : k は波数、 h は波振幅)で無次元化した横揺振幅(ϕ/kh)である。

図4.1から、①波長船長比 λ/L が0.5～1.25の範囲では、青線で示した出会角 χ が60度の

場合に横揺応答が最も大きくなること、②出会角が 60 度より大きくなると、応答のピークとなる波長が長くなるとともに、ピーク値も若干大きくなっていることが分かる。

図 4.2 に出会角 χ を 60 度として、船速 V を変えた場合の横揺応答の計算結果を示す。他の出会角に比べて横揺が大きくなる比較的波長船長比が小さい範囲 ($\lambda/L=0.5\sim 1.0$) では、今回設定した船速 (16.6kn、18.6kn、19.4kn) の違いより横揺の大きさに顕著な差異は見られないことが分かる。

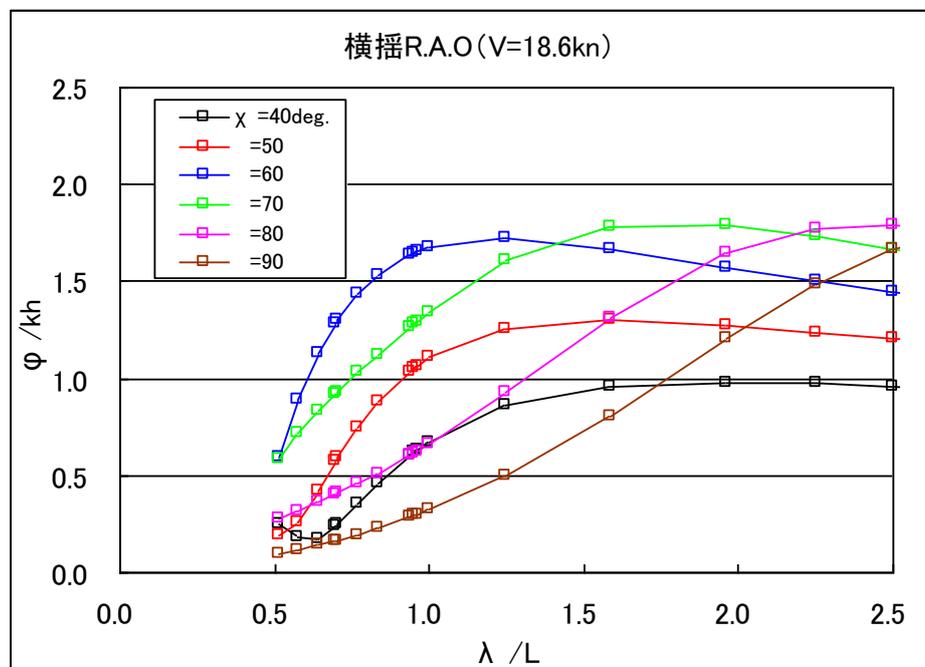


図 4.1 横揺応答関数 (V=18.6kn)

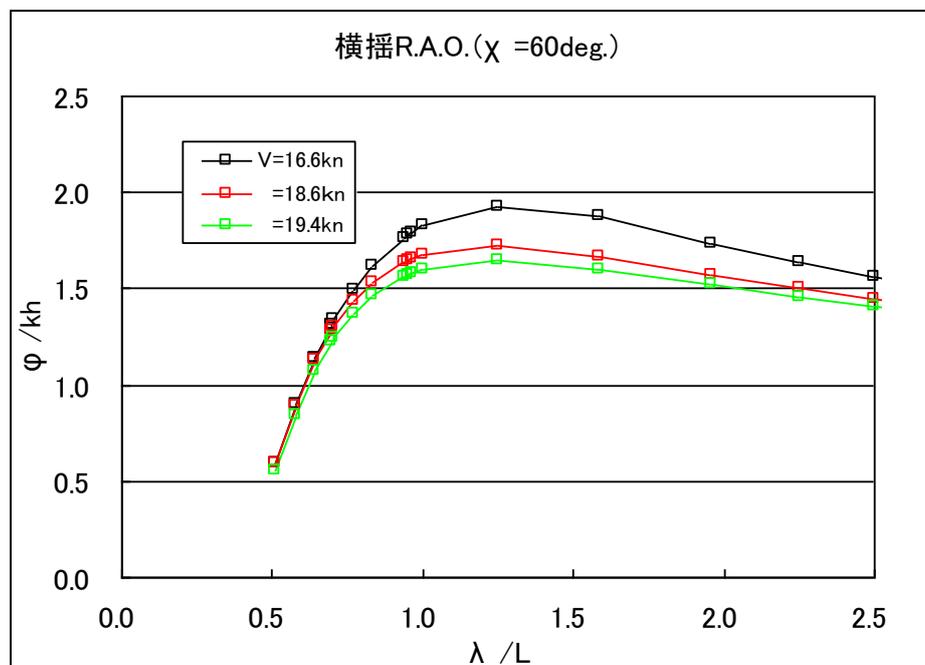


図 4.2 横揺応答関数 ($\chi = 60\text{deg.}$)

2) 事故発生時の横揺

事故発生時の波高を 5m として、波長、波との出会角（波向）、船速を変えて事故発生時の横揺を計算した結果を図 4.3～図 4.5 に示す。

①波長（ λ ）の影響（図 4.3）

図 4.3 に船速 V を 18.6kn として、波長 λ を変えた場合の横揺振幅（ ϕ ）の計算結果を示す。黒線は出会角 χ が 50 度、赤線は出会角が 60 度、緑線は出会角が 70 度の場合の横揺振幅である。

図 4.3 から、事故発生時の状態では、①出会角が 60 度及び 70 度で航行した場合、波長が 50m～80m 程度の範囲では、横揺振幅に大きな変化はないこと、②出会角が 60 度の場合、波長が 55m～65m 程度で横揺が 26 度程度と最も大きくなることなどが分かる。

②出会角（ χ ）の影響（図 4.4）

図 4.4 に船速 V を 18.6kn として、出会角 χ を変えた場合の横揺振幅の計算結果を示す。黒線は波長 λ が 50.0m、赤線は波長が 78.0m、緑線は波長が 97.3m の横揺振幅である。

図 4.4 から、事故発生時の状態では、①波長が 50m～100 m 程度の波の中を航行した場合、波との出会角（波向）が 60 度で横揺が最も大きくなる（約 21～25 度）こと、②波長が 50m では、出会角が 70 度の方が 50 度の場合より横揺振幅は大きくなるが、波長が 78.0m 及び 97.3m では、逆に出会角が 50 度の方が 70 度の場合より横揺振幅は大きくなることなどが分かる。

③船速（ V ）の影響（図 4.5）

図 4.5 に波長 λ を 78m として、船速を変えた場合の横揺振幅の計算結果を示す。黒線は出会角 χ が 50 度、赤線は出会角が 60 度、緑線は出会角が 70 度の場合の横揺振幅である。

図 4.5 から、事故発生時の状態では、①波長が 78m の波の中を出会角が 60 度及び 70 度で航行した場合、船速を落とすことで横揺が小さくなること、②出会角が 60 度の場合、船速を 18.6kn から 2kn 落として 16.6kn とした場合、横揺振幅が 24 度程度から 22 度程度まで 10%程度小さくなること、③出会角が 50 度の場合、船速を落とすと横揺が大きくなることなどが分かる。

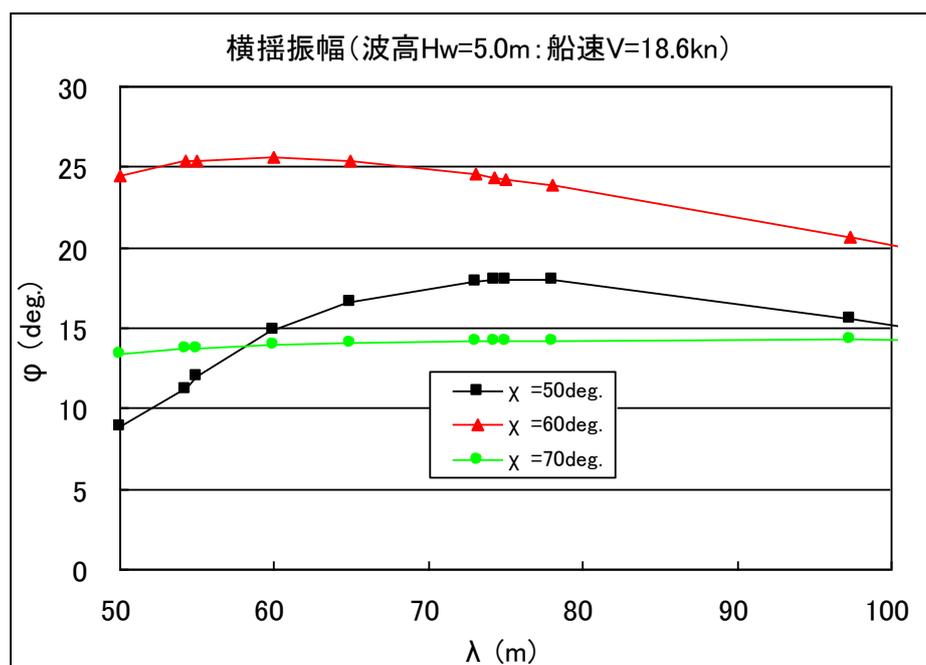


図 4.3 事故発生時の横揺振幅（波長に対する変化：Hw=5.0m, V=18.6kn）

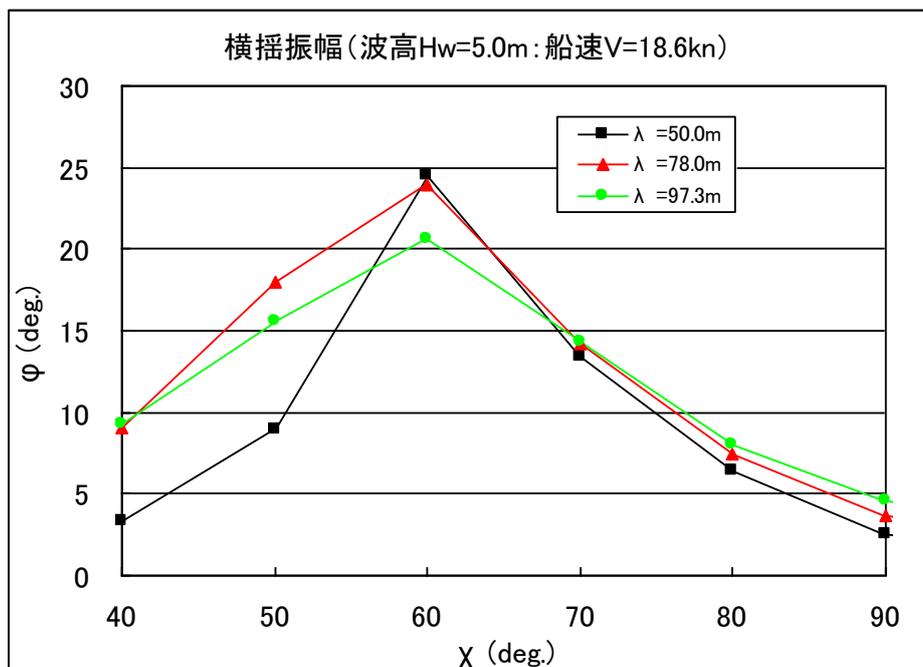


図 4.4 事故発生時の横揺振幅（出会角 χ に対する変化：Hw=5.0m, V=18.6kn）

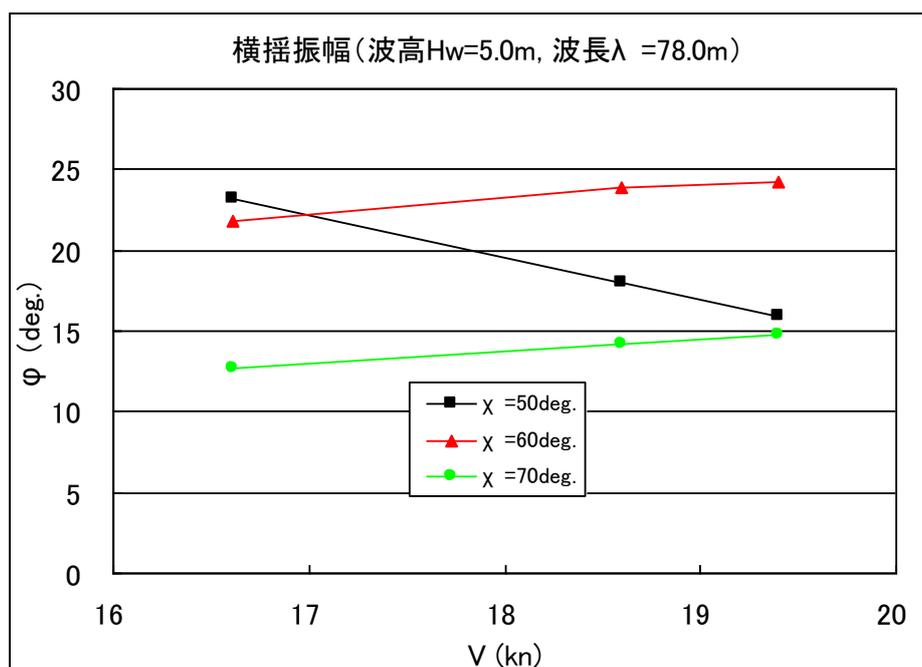


図 4.5 事故発生時の横揺振幅（船速 V に対する変化：λ=78.0m, Hw=5.0m）

4. 1. 2 風による傾斜

調査官により説明された事故発生時の風速（平均：風速 12~13m/s、事故現場付近：風速 15~17m/s）に対応する定常風による横傾斜角を推定した。その際、風向は南東とし、船首方位（針路）は、事故直近の AIS データから、真方位 45 度とした。

(1) 計算方法

風による傾斜偶力 D_w は、船舶復原性規則の算式を援用し、風向の影響を有効風圧側面積 A_e の変化として取り入れて計算した（(4.1) 式）。

$$D_w = \frac{k \cdot A_e \cdot H_{wind}}{W} \quad (4.1)$$

ここで、 W は排水量、 k は風圧力に関する係数であり、報告された事故発生時の風速 (V_w ; 12m/s ~17m/s) 及び絶対風向 (v ; 南東)、並びに、本船の船速 (V) 及び針路 (ϕ ; 45度) から算定される相対風速 (V_{w_rel}) に基づき設定した。また、 H_{wind} は風圧側面積中心から喫水の半分までの垂直距離である。

なお、有効風圧側面積 (A_e) は、船体中心線に対する相対風向を v_w 、横風 ($v_w = 90deg.$) に対する風圧側面積を A_w として、(4.2) 式で算定した。

$$A_e = A_w \cdot \sin v_w \quad (4.2)$$

また、風による横傾斜角 (ϕ_{wind}) は、(4.3) 式を使用して算出した。

$$\phi_{wind} = \tan^{-1} \left(\frac{k \cdot A_e \cdot H_{wind}}{W \cdot GM} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{D_w}{GM} \right) \quad (4.3)$$

表 4.1 に事故発生時の風による傾斜角の計算に必要な船体に関するデータをまとめて示す。

表 4.1 事故発生時の排水量 (W)、メタセンタ高さ (GM)、風圧側面積 (A_w) 及び風圧側面積中心から喫水の半分までの垂直距離 (H_{wind})

W (t)	GM (m)	A_w (m ²)	H_{wind} (m)
2449	1.49	906.9	7.69

(2) 計算結果

表 4.2 に事故発生時の風による横傾斜角の計算結果を示す。事故発生時の船速 18.6kn では、風による傾斜角は風速 12m/s の場合で 1.5 度、風速 17m/s の場合で 2.8 度と推定され、波浪による傾斜 (図 4.3~図 4.5) に比べて小さい。

表 4.2 風による横傾斜角 (ϕ_{wind}) の計算結果

V (kn)	V_w (m/s)	V_{w_rel} (m/s)	v_w (deg.)	k	D_w (m)	ϕ_{wind} (deg.)
19.4	12.0	15.6	50.3	0.019	0.041	1.6
	13.0	16.4	52.5	0.020	0.046	1.8
	15.0	18.0	56.4	0.025	0.059	2.3
	16.0	18.9	58.0	0.027	0.065	2.5
	17.0	19.7	59.6	0.030	0.073	2.8
18.6	12.0	15.3	51.4	0.018	0.040	1.5
	13.0	16.1	53.6	0.020	0.045	1.7
	15.0	17.8	57.5	0.024	0.058	2.2
	16.0	18.6	59.1	0.026	0.065	2.5
	17.0	19.5	60.6	0.029	0.072	2.8
16.6	12.0	14.7	54.6	0.016	0.038	1.5
	13.0	15.6	56.7	0.018	0.044	1.7
	15.0	17.3	60.3	0.023	0.056	2.2
	16.0	18.1	61.9	0.025	0.063	2.4
	17.0	19.0	63.3	0.028	0.070	2.7

4. 1. 3 車両の移動に伴う傾斜

(1) 車両の移動に伴う傾斜モーメント

「車両搭載位置図」に示された、事故発生前後の車両及びコンテナの位置から移動距離を算定するとともに、「各車両の推定重量図」に示された車両重量を用いて、車両の移動に伴う傾斜モーメントを推定した（表 4.3：表 3.1 再掲）。

その結果、車両及びコンテナの横方向の重量モーメントは、出港時（移動前）の状態では右舷側に 11.1t・m であったが、車両移動後は左舷側に 136.3t・m となり、大傾斜に伴う車両の移動により、左舷側に 147.3t・m の傾斜モーメントが発生したと推定された。

表 4.3 事故発生時の搭載車両及びコンテナの重量重心

		重量			重心位置(m)			重量モーメント(t・m)		
		w (t)	mid-G	KG	C.L.-G	w*mid-G	w*KG	w*C.L.-G		
移動前	車両	105.8	-2.37	7.41	0.15	-250.8	783.6	15.5		
	コンテナ	0.8	27.29	6.75	-5.59	21.8	5.4	-4.5		
	合計	106.6	-2.15	7.40	0.10	-229.0	789.0	11.1		
移動後	車両	105.8	-2.38	7.41	-1.25	-252.1	783.6	-131.8		
	コンテナ	0.8	27.29	6.75	-5.59	21.8	5.4	-4.5		
	合計	106.6	-2.16	7.40	-1.28	-230.3	789.0	-136.3		
移動に伴う横方向重量モーメントの変化								-147.3		

注) mid-G: 船体中央より後方を正 C.L.-G: 船体中心線より右舷側を正

(2) 車両の移動に伴う傾斜角

車両の移動に伴う傾斜角 ϕ_{shift} は、傾斜モーメントを $w \cdot l$ とし、(4.4)式で算定した。

$$\phi_{shift} = \tan^{-1} \left(\frac{w \cdot l}{W \cdot GM} \right) \quad (4.4)$$

ここで、 W は排水量、 GM はメタセンタ高さである。

表 4.4 に車両の移動に伴う傾斜角の計算に必要なデータと計算結果をまとめて示す。事故発生時の車両の移動に伴う傾斜角 ϕ_{shift} は、2.3 度と推定される。これは、車両の移動に伴う傾斜モーメントが静的に作用した場合の傾斜角であり、復原力が傾斜角に対して線形に変化する範囲では、平衡状態の船体に傾斜モーメントが突然作用した場合の傾斜角の増分は、静的に作用するとして取り扱った場合の 2 倍となる。

表 4.4 車両の移動に伴う横傾斜角 (ϕ_{wind}) の計算結果

W (t)	GM (m)	$w \cdot l$ (t・m)	ϕ_{shift} (deg.)
2449	1.49	147.3	2.3

4. 1. 4 事故発生時の傾斜

上述したとおり、調査官の説明では、本船は事故発生時に大波を受け左舷側に 35 度まで傾斜し、その後、船体は復原したが左舷側に 4 度の傾斜が残ったとのことであった。なお、傾斜角は船橋前壁の傾斜計の指示値とのことであり、読み取り誤差の他、大波を受けた際の傾斜角には、横方向の加速度の影響が含まれていると考えられる（付録 2）。

ここでは、主な傾斜要因として考えた①波浪、②風、③大傾斜に伴う車両の移動により、事故発生時の傾斜が説明できるか検討する。

①事故発生時の傾斜（左舷側 35 度）

調査官によると、当初の説明では、右舷真横より若干後から波を受けたとのことであったが、詳細を改めて聞き取ったところ、大波を受けた角度は右舷斜め後 45 度より真横寄りであったとのことであった。そこで、事故発生時の状況として、波高 5m の大波の波長を船の全長より若干短い 78m、波との出会角を 60 度～70 度と想定し、また船速は 18.6kn～19.4kn とすると、波浪による傾斜角は 14.2 度～24.3 度と推定される（図 4.5）。また、調査官によると、事故現場付近の風速は 15～17m/s とのことであったので、風による傾斜は 2.2 度～2.8 度と推定される（表 4.2）。よって、事故発生時の波浪及び風により、船体は 16.4 度～27.1 度横傾斜したと推定される。

一方、事故発生時の状況で、傾斜計位置での横方向加速度の影響で、傾斜計の指示値が実際の傾斜角より 8 度程度大きくなると見積られる（付録 2）ことから、事故発生時の波浪及び風による船体傾斜の船橋傾斜計の指示値は約 24 度～約 35 度になると推定される。大波を受けた際の傾斜角は船橋傾斜計の指示値で 35 度とのことであり、事故発生時の波浪及び風による傾斜角の推定範囲の上限とほぼ一致する。

なお、大傾斜の際に車両が移動したと考えられるが、移動の発生状況が不明であったので、大波を受けた際の傾斜に、車両の移動の影響を考慮していない。また、事故直前の操舵後の状況についても詳細が不明であったことから、操舵に伴う傾斜も考慮しなかった。車両の移動が比較的傾斜が小さい時点で発生したとすると、車両の移動に伴う傾斜モーメントにより実質的な復原モーメントが減少し、左舷側傾斜が増大したと推測される^{注)}。

②事故後の傾斜（左舷側 4 度）

事故後の傾斜は、大傾斜に伴う車両の移動による傾斜に風による傾斜が加算されたものと考えられる。上述したとおり、車両の移動に伴う傾斜角は 2.3 度（表 4.4）と推定され、また、平均的な風速として乗組員が説明した風速 12m/s の風による傾斜角は 1.5 度（表 4.2）となる。よって、車両の移動による傾斜と風による傾斜を合算すると、3.8 度左舷側に傾斜すると推測され、調査官から説明があった事故後の傾斜角（左舷側傾斜 4 度）とほぼ一致する。

4. 2 改造後及び従来船との比較

4.1 節で報告したとおり、本船事故発生時の大傾斜の主な要因としては、①波高 5m の波浪と②風速 15～17m/s の風が考えられた。一方、本船は、事故後の本年 1 月、航走時船首トリムモーメント対策のため、船体後部船底に固定バラスト（コンクリート）を搭載した。また、本船と同じ航路（長崎⇄福江）には、昭和 57 年に建造された別の旅客フェリー（以下、「従来船」と言う。）が就航しており、事故当日も運航されていた。ここでは、①固定バラスト搭載後（以下、「改造後」と言う。）の本船に事故当日と同一の物件が搭載されていた状態（以下、「事故発生時（改造後）」

注) 車両の移動が準静的に一瞬で発生するとして、船舶復原性規則の所謂 C 係数基準と同様に傾斜方向のエネルギーと動復原力のエネルギーバランスで傾斜角の増分の推定を試みた結果、風による傾斜が 2.8 度、波浪による傾斜が 24.3 度の場合、車両の移動が傾斜角 20 度で発生するとすると、左舷側傾斜角は、車両の移動の影響を考慮しない場合に対し、車両の移動を考慮した場合は 1 度程度大きくなると推定された。

と表記する。)及び②従来船の事故当日の載荷状態で、本船事故発生時の波浪及び風に遭遇した場合の横傾斜を 4.1 節と同様の方法で推定し、事故発生時の本船の横傾斜と比較した。

4. 2. 1 波浪による傾斜

改造後の「本船」の波浪による横傾斜の推定は、4.1.1 節と同一の方法、条件で行った。ここでは、まず、「従来船」に対する計算方法、計算条件を説明し、その後、「本船」事故発生時の波浪に遭遇した場合の改造後の「本船」と「従来船」の横揺の計算結果を事故発生時の「本船」の横揺の計算結果と比較する。

(1) 計算方法 (従来船)

横揺の計算は、「本船」の場合と同様に、一般的な船体運動計算法である strip 法 (STF 法) を用いて行った。計算に必要な減衰係数については情報がなかったため、渡辺・井上の方法²⁾、³⁾を用いて推定した。また、「従来船」についても、図 3.2 に示した復原力特性が考慮できるように、横揺復原項には動復原力に注目した等価メタセンタ高さ (付録 1) を用いた。なお、「従来船」には減揺水槽 (アンチローリングタンク) が設置されているが、近年使用しておらず、事故当日もタンクは空であったとのことであるため、今回の計算でも減揺水槽の影響は考慮しなかった。

(2) 計算条件 (従来船)

「本船」の事故発生時の船速、船首方位、波高、波向等を踏まえて、計算を行う運航状況 (船速、波との出会角 (波向))、波浪状況 (波長、波高) を以下に示すように設定した。

① 運航状況

船速 V : 15.25kn、16.25kn、17.25kn (航海速力)

波との出会角 (波向) χ : 40 度 (斜め右追波) ~ 90 度 (右横波)

② 波浪状況

波長 λ : 50.0 m ~ 97.3m (波長船長比 λ/L : 0.67 ~ 1.30)

波高 H_w : 5.0m

(3) 計算結果

1) 横揺特性

まず、基礎データとして横揺特性を調べた。その際、横揺復原項には等価メタセンタ高さではなく、表 3.11 に示したメタセンタ高さ (「本船」事故発生時 (改造後) : $GM=1.55m$ 、「従来船」事故当日 : $GM=1.22m$) を用いた。計算状態の横揺固有周期 T_r は「本船」事故発生時 (改造後) の状態で 10.1 秒、「従来船」の事故当日の状態で 11.1 秒である。また、計算は、全般的な横揺れ特性を調べるため、上述した事故発生時の状況から設定した波長範囲より広い範囲の波長 (λ : 40.0m ~ 195.0m) について行った。

図 4.6 に「本船」事故発生時 (改造後) の状態で船速 V を 18.6kn とした場合の横揺応答の計算結果を、図 4.7 に「従来船」事故当日の状態で船速 V を 17.25kn とした場合の計算結果を、それぞれ出会角 χ をパラメータとして示す。横軸は波長船長比 λ/L 、縦軸は最大波傾斜 (kh : k は波数、 h は波振幅) で無次元化した横揺振幅 ϕ/kh である。

図 4.6 及び図 4.7 と図 4.1 に示した「本船」事故発生時の状態の横揺応答と比較することで、
① 「本船」改造後の状態では、事故発生時の状態に比べて全般的に横揺れ応答が小さくなること

また、「本船」改造後の状態、「従来船」事故当日の状態とも、

② 波長船長比が比較的小さい範囲 (「本船」事故発生時 (改造後) : $\lambda/L=0.58 \sim 1.0$ 、「従来船」

(事故当日) : $\lambda/L=0.55\sim 1.7$ では、青線で示した出会角 χ が 60 度の場合に横揺応答が最も大きくなること

③ 出会角が 60 度より大きくなると、応答のピークとなる波長が長くなるとともに、ピーク値も大きくなっていることが分かる。

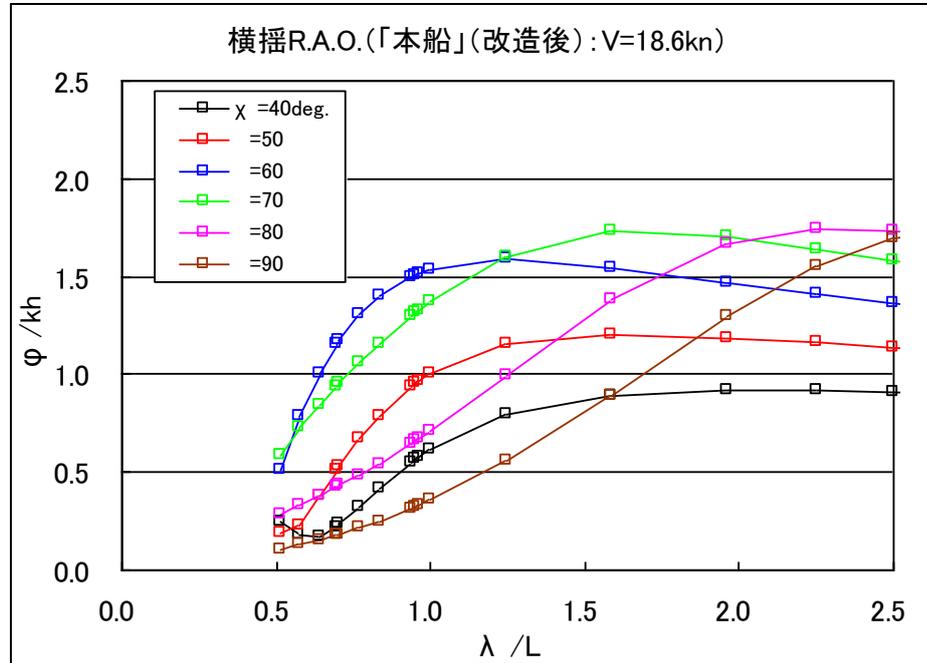


図 4.6 「本船」 事故発生時 (改造後) の横揺応答関数 (V=18.6kn)

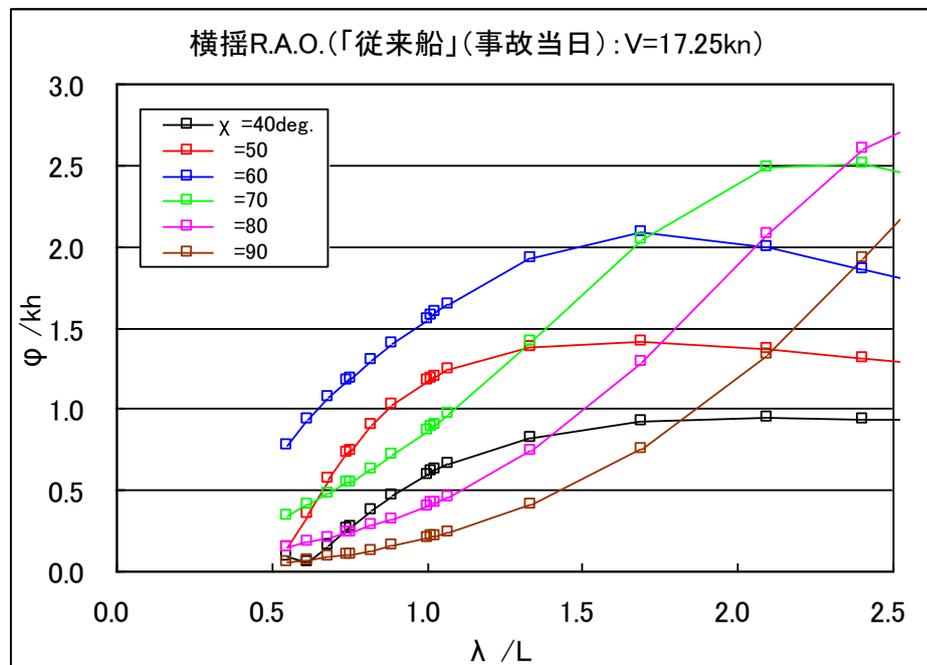


図 4.7 「従来船」 事故当日の横揺応答関数 (V=17.25kn)

また、図 4.8、図 4.9 に出会角 χ を 60 度として、船速 V を変えた場合の横揺応答の計算結果を示す。図 4.8 が「本船」 事故発生時 (改造後) の状態の計算結果 (船速 $V=16.6\text{kn}$, 18.6kn , 19.4kn)、図 4.9 が「従来船」 事故当日の状態の計算結果 (船速 $V=15.25\text{kn}$, 16.25kn , 17.25kn)

である。

図 4.8 から、「本船」事故発生時（改造後）の状態では、図 4.2 に示した事故発生時の状態と同様に、波長船長比 λ/L が 0.5~1.0 の範囲では、今回設定した船速（16.6kn、18.6kn、19.4kn）の違いにより横揺の大きさに顕著な差異は見られないことが分かる。

一方、「従来船」事故当日の状態では、「本船」事故発生時（図 4.2）の状態や、事故発生時（改造後）（図 4.8）の状態と異なり、比較的短い波長の範囲（ $\lambda/L=0.55\sim 1.07$ ）で設定した船速（16.6kn、18.0kn、19.4kn）により横揺の大きさに差異が見られ、船速を下げることで横揺が小さくなることが分かる。

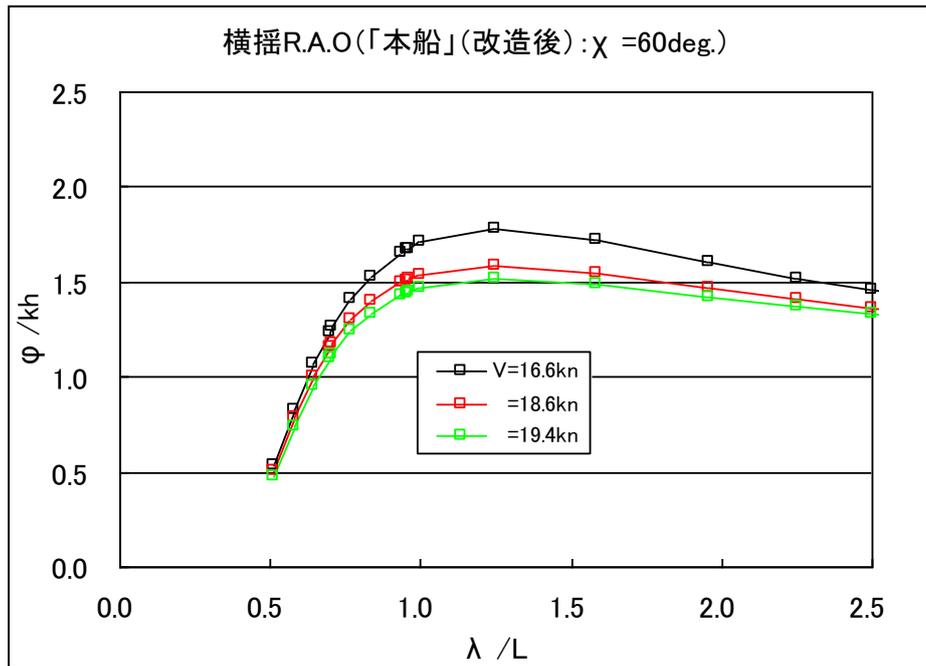


図 4.8 「本船」事故発生時（改造後）の横揺応答関数（ $\chi =60\text{deg.}$ ）

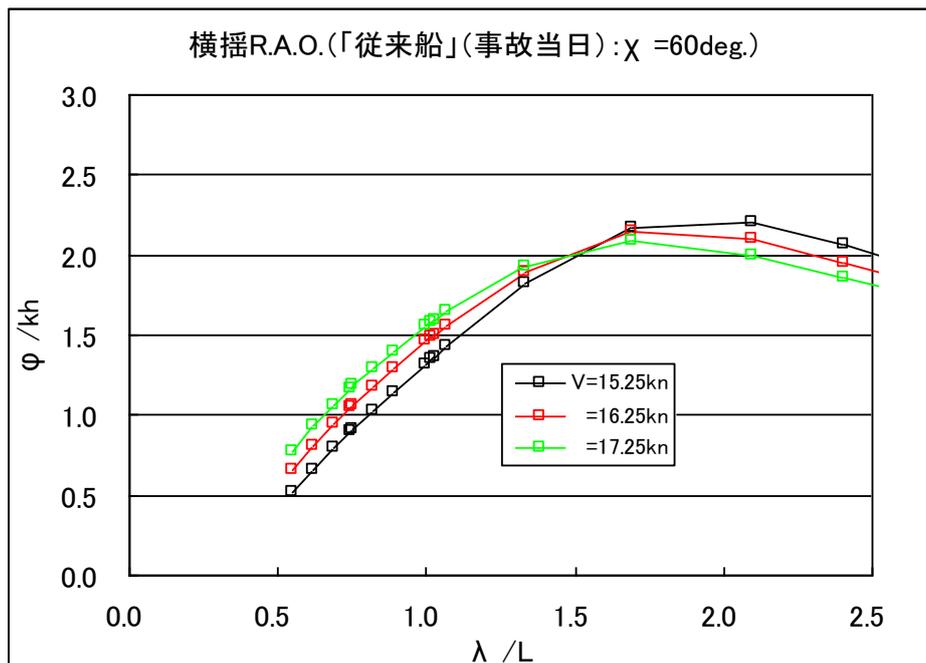


図 4.9 「従来船」（事故当日）の横揺応答関数（ $\chi =60\text{deg.}$ ）

図 4.10 に出会角 χ を 60 度として、「本船」の事故発生時の状態の横揺応答（赤線）、事故発生時（改造後）の状態の横揺応答（黒線）及び「従来船」の事故当日の状態の横揺応答（緑線）の計算結果をまとめて示す。船速は「本船」が両状態とも 18.6kn、「従来船」は 17.25kn として計算した。

図 4.10 から、①「本船」に対する波長船長比 λ/L が 1.0（波長 $\lambda=78.0\text{m}$ ）程度までの比較的短い波長範囲では、「本船」の横揺応答は「従来船」より大きいこと、②特に「本船」に対する波長船長比 λ/L が 0.64~1.0（ $\lambda=50.0\text{m}\sim 78.0\text{m}$ ）の範囲では、「本船」の事故発生時の状態の横揺応答は、「従来船」の事故当日の状態の横揺応答の 1.2 倍程度となっていること、③逆に、「本船」に対する波長船長比 λ/L が 1.25（波長 $\lambda=78.0\text{m}$ ）以上の比較的長い波長範囲では、「従来船」の横揺応答は「本船」より大きくなることなどが分かる。

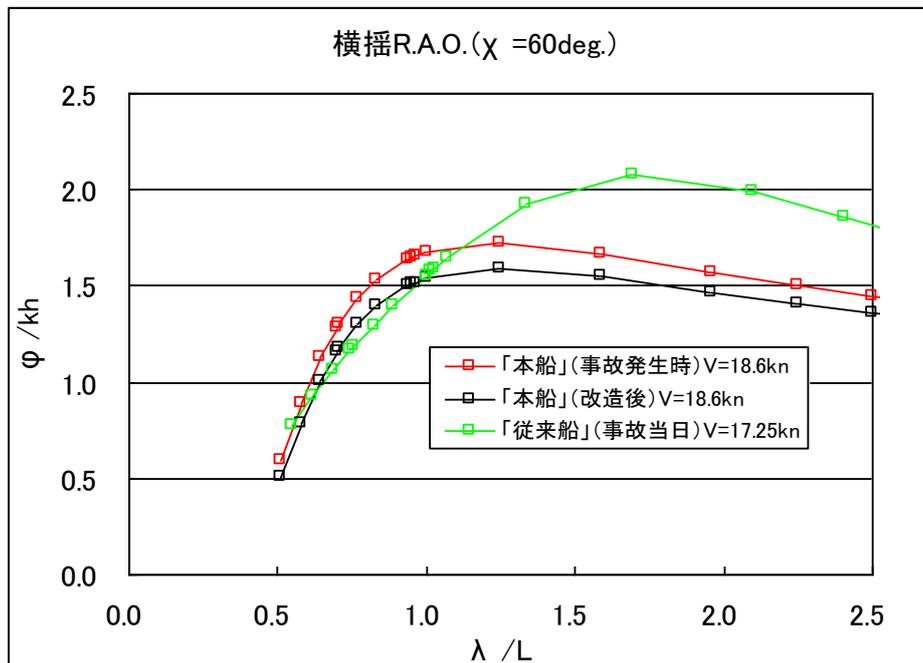


図 4.10 横揺応答関数の比較 ($\chi=60\text{deg.}$)

2) 本船事故発生時の波浪に対する横揺

事故発生時の波高を 5m として、航行条件の船速、波との出会角（波向）や波長を変えて横揺を計算した結果を図 4.11~図 4.13 に示す。

①船速 (V) の影響 (図 4.11)

図 4.11 に波長 λ を 78m、波高 H_w を 5.0m として、船速を変えた場合の横揺振幅 ϕ の計算結果を出会角別に示す。左上の図は出会角 χ が 50 度、左下の図は出会角が 60 度、右上の図は出会角が 70 度の場合の計算結果である。各図とも、赤線は「本船」事故発生時の状態、黒線は「本船」事故発生時（改造後）の状態、緑線は「従来船」事故当日の状態の横揺振幅である。

図 4.11 から、

- ①波長が 78m の波の中を出会角が 60 度及び 70 度で航行した場合、「本船」の事故発生時（改造後）の状態を除いて、船速を落とすことで横揺が小さくなるが、逆に出会角が 50 度の場合、船速を落とすと横揺が大きくなること

②特に出会角が 60 度の場合は、「本船」の船速を 19.4kn から約 15%落として 16.6kn とした場合、事故発生時の状態で横揺振幅が 24 度程度から 22 度程度まで約 2 度が小さくなり、「従来船」の船速を 17.25kn から 2kn 落として 15.25kn とした場合、事故当日の状態で横揺振幅が約 20 度から約 15 度まで 5 度程度小さくなること

③同じ船速で比較した場合、横揺が大きくなる出会角が 60 度の場合では、事故当日の状態で「従来船」と事故発生時の「本船」で、横揺振幅の大きさに大きな差異は見られないことなどが分かる。

②出会角 (χ) の影響 (図 4.12)

図 4.12 に出会角 χ を変えた場合の横揺振幅の計算結果を波長別に示す。左上の図は波長 λ が 50.0m、左下の図は波長が 78.0m、右上の図は波長が 97.3m の場合の計算結果である。波高 H_w はいずれも 5.0m である。各図とも、赤線は「本船」事故発生時の状態、黒線は「本船」事故発生時（改造後）の状態、緑線は「従来船」事故当日の状態の横揺振幅である。なお、船速は「本船」が両状態とも 18.6kn、「従来船」は 17.25kn として計算した。

図 4.12 から、

①両状態の「本船」、「従来船」とも、波との出会角（波向）が 60 度で横揺が最も大きくなり、波長が 78m の場合に、「本船」事故発生時の状態で約 24 度、「本船」事故発生時（改造後）の状態で約 22 度、「従来船」事故当日の状態で約 19 度に達すること

②「従来船」の横揺は、何れの波長とも、ほとんど全ての出会角で両状態の「本船」の横揺に比べて小さいこと、

③「本船」事故発生時（改造後）の状態の横揺は、「本船」事故発生時の状態の横揺に比べて、出会角が 60 度以下の場合には小さくなるが、出会角が 70 度以上の場合にはほとんど同じであること

などが分かる。

③波長 (λ) の影響 (図 4.13)

図 4.13 に波高 H_w を 5.0m として、波長 λ を変えた場合の横揺振幅の計算結果を出会角（波向）別に示す。左上の図は出会角 χ が 50 度、左下の図は出会角が 60 度、右上の図は出会角が 70 度の場合の計算結果である。各図とも、赤線は「本船」事故発生時の状態、黒線は「本船」事故発生時（改造後）の状態、緑線は「従来船」事故当日の状態の横揺振幅である。なお、船速は「本船」が両状態とも 18.6kn、「従来船」は 17.25kn として計算した。

図 4.13 から、

①「従来船」の横揺は、出会角が 50 度で波長が約 65m 未満の比較的短い波長範囲を除いて、両状態の「本船」の横揺に比べて小さいこと、

②「本船」事故発生時（改造後）の状態の横揺は、「本船」事故発生時の状態の横揺に比べて、出会角が 50 度及び 60 度の場合の場合には小さくなるが、出会角が 70 度の場合には若干大きくなること、

③両状態の「本船」、「従来船」とも、出会角が 60 度の場合、波長が 55m～65m 程度で横揺が最も大きくなること（「本船」事故発生時：約 26 度、「本船」事故発生時（改造後）：約 24 度、「従来船」事故当日：約 20 度）

などが分かる。

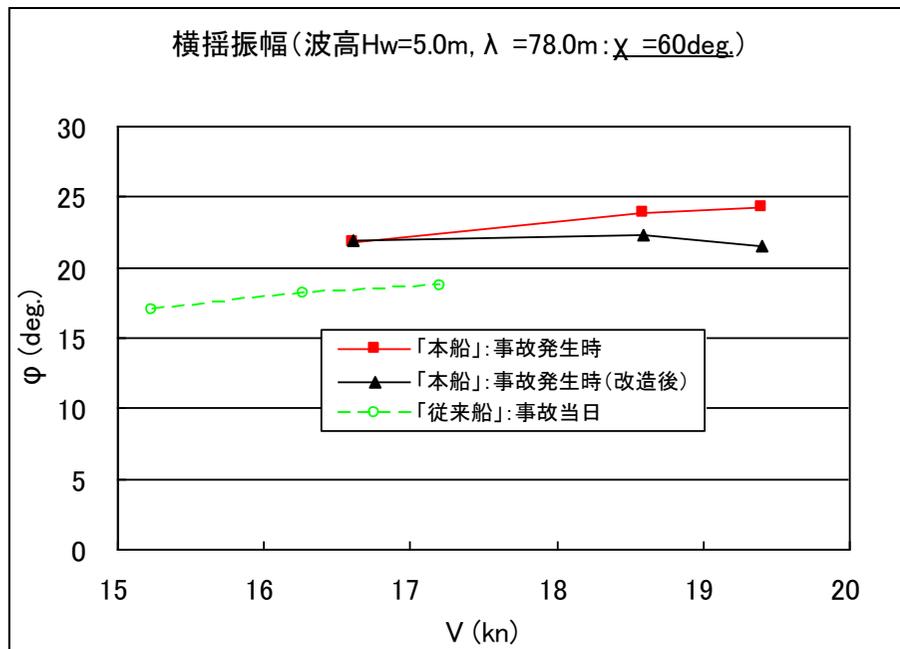
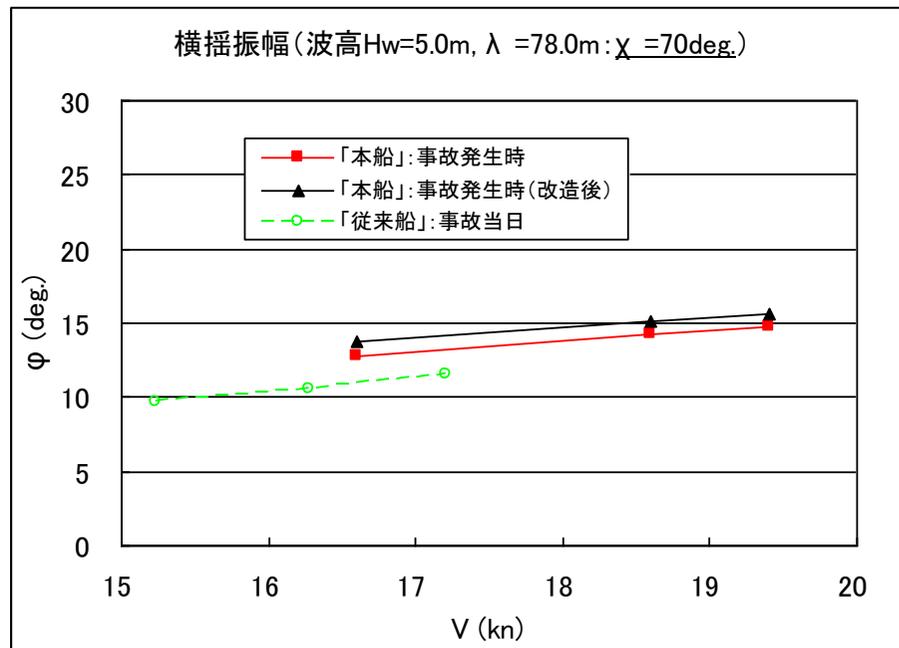
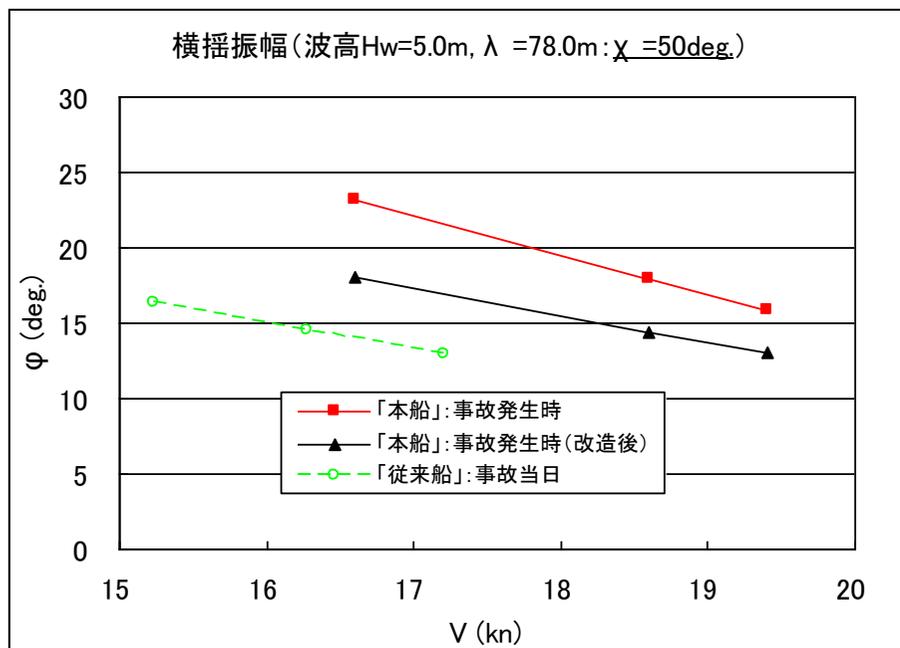


図 4.11 事故発生時の波浪に対する横揺振幅 (船速 V に対する変化: $\lambda=78.0\text{m}$, $H_w=5.0\text{m}$)

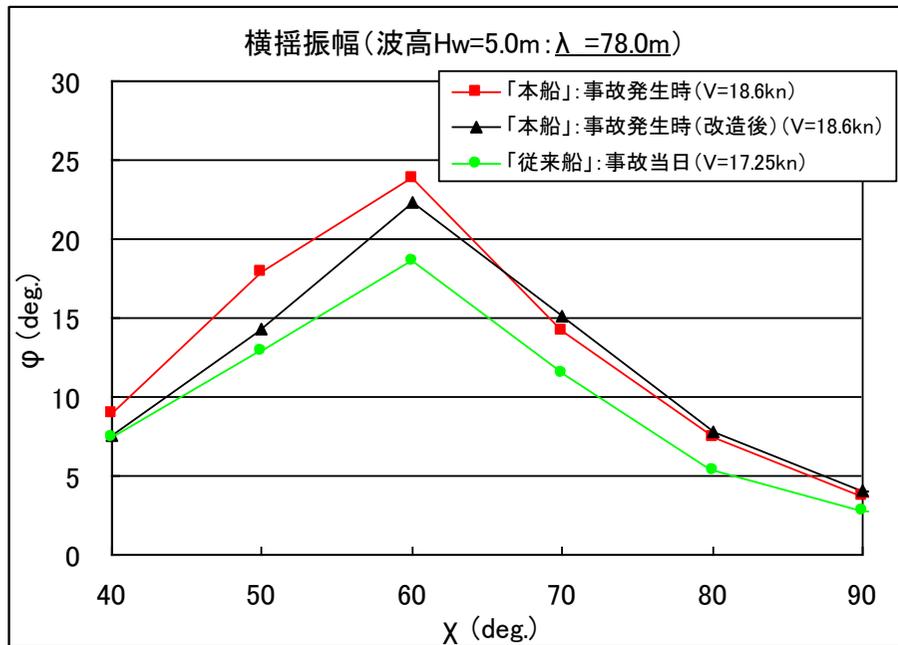
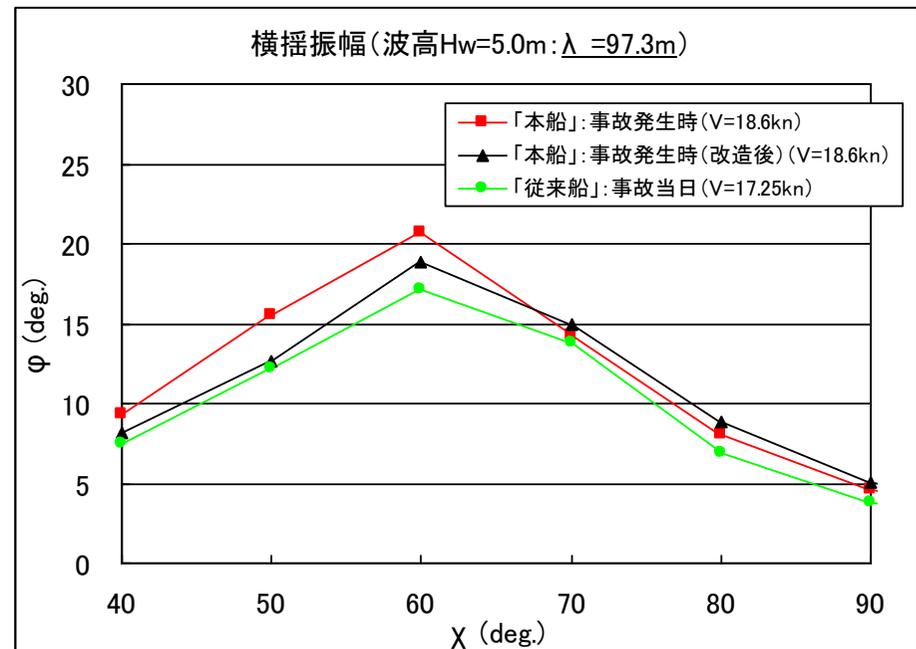
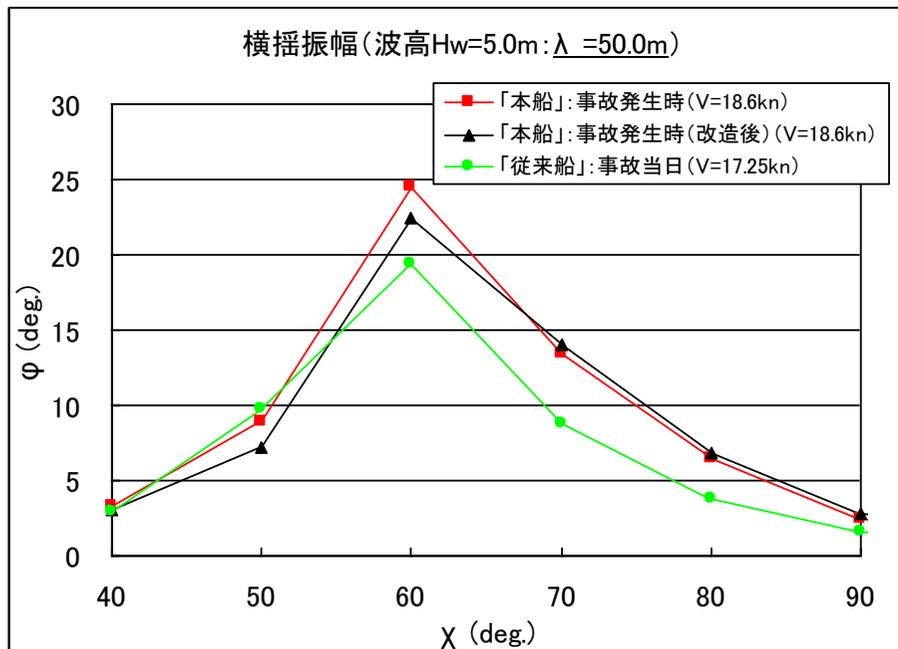


図 4.12 事故発生時の波浪に対する横揺振幅 (出会角 χ に対する変化: $H_w=5.0\text{m}$, $V=18.6\text{kn}$ (「本船」)、 17.25kn (「従来船」))

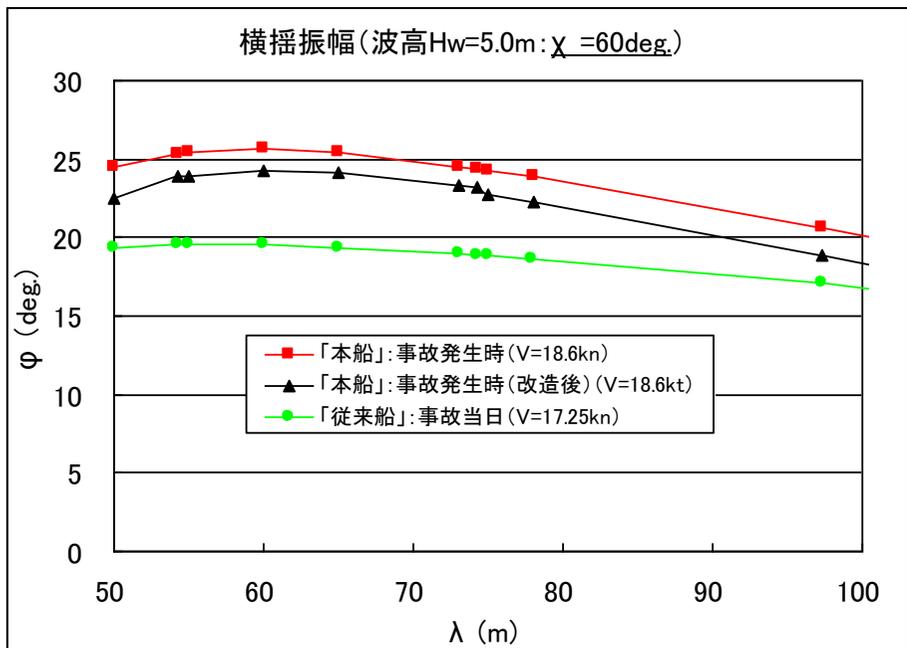
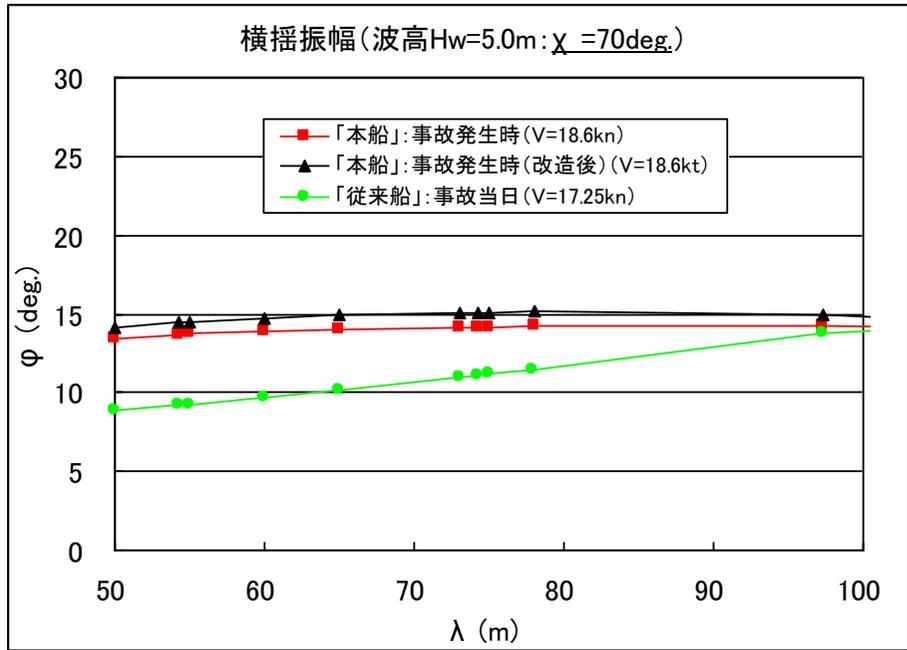
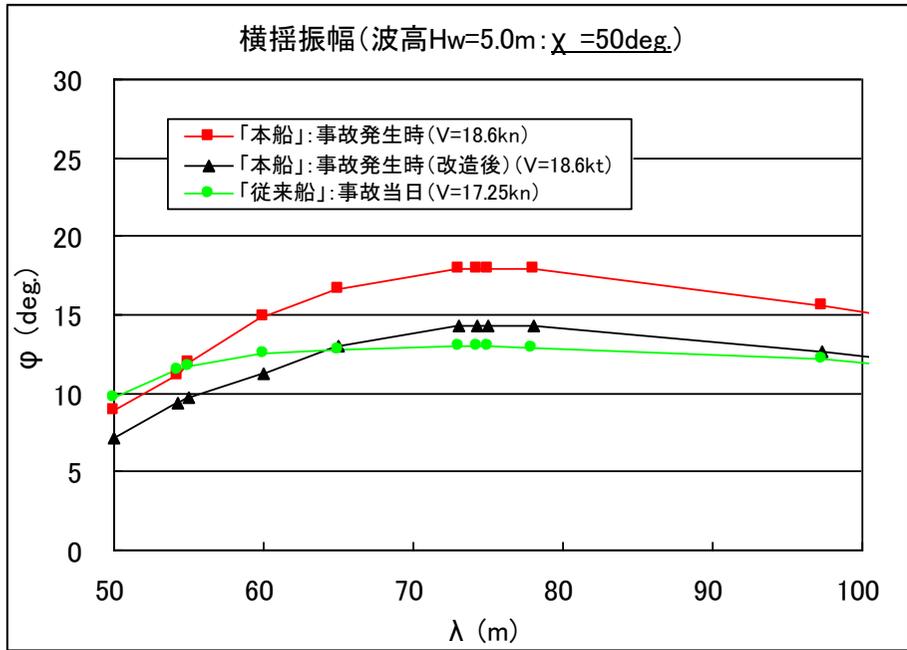


図 4.13 事故発生時の波浪に対する横揺振幅 (波長 λ に対する変化: Hw=5.0m, V=18.6kn (「本船」)、17.25kn (「従来船」))

4. 2. 2 風による傾斜

改造後の「本船」及び「従来船」に対する事故発生時の風（平均：風速 12～13m/s、事故現場付近：風速 15～17m/s）による横傾斜の推定は、4.1.2 節と同一の方法で行った。その際、「本船」の船速は 18.6kn、「従来船」の船速は 17.25kn とした。

表 4.5 に事故発生時の風による傾斜角の計算に必要な船体に関するデータをまとめて示す。表中には参考のため「本船」事故発生時の値も示している。「本船」事故発生時（改造後）の状態では、改造工事により喫水が増加したこと（表 3.11）に伴い、風圧側面積 A_w は減少するが、風圧側面積中心から喫水の半分までの垂直距離 H_{wind} はほとんど変化しない。

表 4.5 事故発生時の排水量 (W)、メタセンタ高さ (GM)、風圧側面積 (A_w)
及び風圧側面積中心から喫水の半分までの垂直距離 (H_{wind})

船名	計算状態	W (t)	GM (m)	A_w (m ²)	H_{wind} (m)
「本船」	事故発生時	2449	1.49	906.9	7.69
	事故発生時(改造後)	2520	1.55	900.5	7.69
「従来船」	事故当日	2059	1.22	808.2	7.39

表 4.6 及び表 4.7 に、事故発生時の風による横傾斜角 ϕ_{wind} の計算結果を示す。計算は、風向は南東、船首方位（針路）は真方位 45 度として行った。表 4.6 が事故発生時（改造後）の状態の「本船」の計算結果、表 4.7 が事故当日の状態の「従来船」の計算結果である。事故発生時の風による傾斜角は、風速 12m/s の場合、「本船」事故発生時（改造後）の状態では 1.4 度、「従来船」事故当日の状態では 1.9 度である。また、風速 17m/s の場合では、「本船」事故発生時（改造後）の状態では 2.6 度、「従来船」事故当日の状態では 3.4 度と推定され、事故発生時の波浪による横揺振幅（図 4.11～図 4.13）に比べて小さい。

図 4.14 に、「本船」事故発生時の状態も含めて、風による横傾斜角 ϕ_{wind} の計算結果をまとめて示す。赤線は「本船」事故発生時の状態、黒線は「本船」事故発生時（改造後）の状態、緑線は「従来船」事故当日の状態の計算結果である。

図 4.14 から、

- ①改造工事により「本船」の風による横傾斜角は、若干小さくなること、
- ②事故当日の状態「従来船」では、事故発生時の状態の「本船」に比べて風による横傾斜角は大きくなるが、その差異は 0.5 度程度であることが分かる。

表 4.6 風による横傾斜角 (ϕ_{wind}) の計算結果（「本船」：事故発生時（改造後））

Vw (m/s)	Vw_rel (m/s)	v w (deg.)	k	Dw (m)	ϕ_{wind} (deg.)
12.0	15.3	51.4	0.018	0.038	1.4
13.0	16.1	53.6	0.020	0.044	1.6
15.0	17.8	57.5	0.024	0.056	2.1
16.0	18.6	59.1	0.026	0.062	2.3
17.0	19.5	60.6	0.029	0.069	2.6

表 4.7 風による横傾斜角 (ϕ_{wind}) の計算結果 (「従来船」: 事故当日)

Vw (m/s)	Vw_rel (m/s)	v w (deg.)	k	Dw (m)	ϕ_{wind} (deg.)
12.0	14.92	53.5	0.017	0.039	1.9
13.0	15.74	55.7	0.019	0.045	2.1
15.0	17.43	59.4	0.023	0.058	2.7
16.0	18.30	61.0	0.025	0.065	3.0
17.0	19.18	62.4	0.028	0.072	3.4

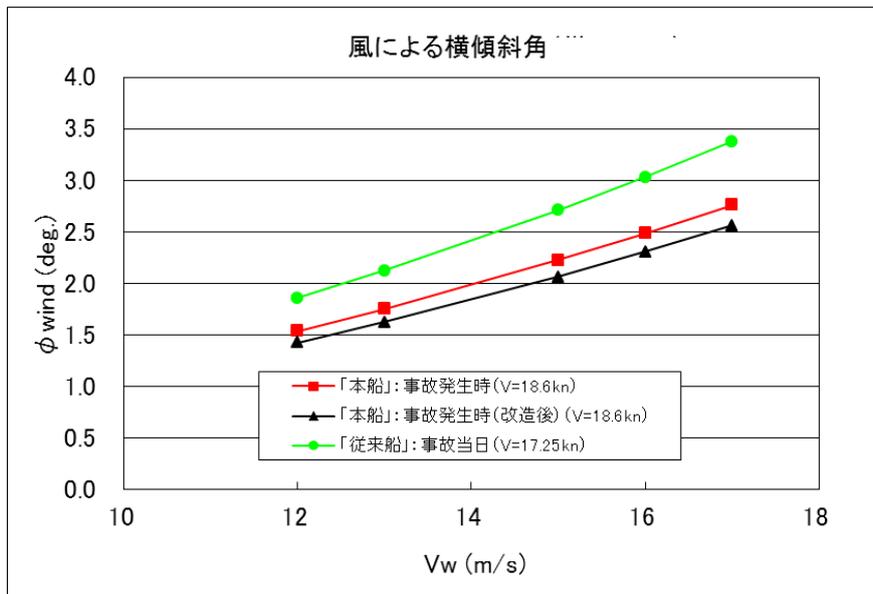


図 4.14 風による横傾斜角の比較 (V=18.6kn (「本船」)、17.25kn (「従来船」))

4. 3 大傾斜防止策の検討

4.1 節で報告したとおり、「本船」が大傾斜した主要因は、波高 5m の波浪であり、事故発生時の状況として、波高 5m の大波の波長を 78m、波との出会角を 60 度～70 度と想定し、また船速は 18.6kn～19.4kn とすると、波浪による傾斜角は約 14 度～約 24 度と推定される (図 4.5)。それに加えて、風による傾斜の他、車両の移動や操舵に伴う傾斜も影響を及ぼした可能性が考えられるが、例えば風速 17m/s の風による傾斜角は 3 度程度であり (表 4.2)、事故発生時の状況でこれらの要因による傾斜角は、波浪による傾斜角に比べて小さい。そのため、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、波浪による傾斜角を小さくする必要がある。

波浪による傾斜 (横揺) は、一般的に、①波浪状況 (波長、波高) と②運航状況 (船速、針路 (波との出会角)) によって変化する。「本船」事故発生時の状態の横揺特性は、図 4.1 及び図 4.2 に示したように、波長が船長と同程度以下の波 (波長船長比 $\lambda/L \leq 1$) では、出会角が 60 度で横揺応答が最も大きくなり、船速が 18.6～19.4kn の範囲では、横揺応答に顕著な差異が見られない。そのため、「本船」は、事故発生時には、横揺応答が大きくなる状況下にあったと考えられ、波高 5m の波を受けて大傾斜したと推測される。一方、付録 3 に示したように、通常運航時の上限に近い波高として想定される波高が 2.5m (事故発生時の波高の 1/2) の場合、事故発生時と同様に横揺が大きくなる状況下で横揺を計算したところ、今回計算した中で最も横揺が大きくなる波長 $\lambda=60\text{m}$ 、船速 $V=18.6\text{kn}$ 、出会角 $\chi=60\text{deg.}$ の場合でも横揺は 12 度程度であり、車両が

移動するような大傾斜には至らないと考えられる。また、本船乗組員及び運航管理者によると波が高くなる海域（五島沖、長崎沖）及び状況は、ほぼ判明しているとのことである。そのため、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、一義的には、大波に遭遇しないように、波が高くなる状況では当該海域を避けて航行することが重要であると考えられる。

なお、上述したとおり、波浪による横揺の大きさは、運航状況（船速、針路（波との出会角））によっても変化するが、事故発生時の状況では、波長 $\lambda=78\text{m}$ 、出会角 $\chi=60\text{deg}$.の場合に船速を18.6knから16.6knに2kn落としても、横揺は約24度から約22度に2度程度減少するだけである（図4.5）。一方、事故発生時の状況では、針路を変更して波との出会角を変えることで、横揺が小さくなる。例えば、波長 $\lambda=78\text{m}$ 、船速 $V=18.6\text{kn}$ の場合に出会角を60度から20度変化させて40度あるいは80度にすると、横揺は約24度から10度未満へと半分以下に小さくなる（図4.4）。但し、「本船」の場合、船速18.6knではFroude数が0.346となり、出会角が小さな追波状態で航行した場合には、波乗り、ブローチングの発生の危険性⁴があることや、出会角が大きな場合には、事故発生時より長い波長の波で横揺同調となり横揺が大きくなることなどに留意する必要があると考えられる。

なお、「本船」は、改造工事によって事故発生時の状態に比べて復原性能は向上し（図3.2及び表3.11）、横揺応答は小さくなっており（図4.10）、大傾斜や転覆に対する安全性は向上したと考えられる。しかしながら、「本船」は改造工事後の状態でも、事故発生時の状況下（波長 $\lambda=78\text{m}$ 、波高 $H_w=5\text{m}$ 、船速 $V=18.6\text{kn}\sim 19.4\text{kn}$ 、波との出会角 $\chi=60\text{deg}.\sim 70\text{deg}.$ ）での横揺は約14度～約22度と推定され（図4.11）、また、事故発生時の状態と改造工事後の状態で、通常運航時の上限に近い波高として想定される波高が2.5mでの横揺の大きさに顕著な差異がない（付録3）。そのため、改造工事後の「本船」でも、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、大波に遭遇しないように、波が高くなる状況では当該海域を避けて航行することが重要であると考えられる。

また、「従来船」は、事故発生時の状況下の横揺は最大で20度未満であり、「本船」の横揺に比べて小さい（図4.11～図4.13）。しかしながら、同じ船速で比較すると、改造工事後の「本船」と「従来船」で横揺の大きさに顕著な差異はない（図4.11）と考えられることなどから、「従来船」についても、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、波浪状況に留意して運航する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 池田良穂、高田浩、田中紀男：中型カーフェリーの横揺れ特性に関する実験的研究、関西造船協会誌第213号、pp.51-56、平成2年3月
- 2) 渡辺恵弘、井上正祐：船の横揺抵抗所謂Nの計算方法について、西部造船会会報第14号、pp.39-48、昭和32年10月
- 3) 渡辺恵弘、井上正祐、村橋達也：N係数計算法の肥大船型への修正、西部造船会会報第27号、pp.69-81、昭和39年3月
- 4) International Maritime Organization：Revised Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Adverse Weather and Sea Conditions, MSC.1/Circ.1228, 2007年1月

5. 固縛の解析

5. 1 車両甲板での固縛実態調査

(1) 船体側固縛資材

本船の車両甲板上には、車両固定用金具として、クローバーリーフプレート(Raised Type)が溶接されている(写真 5.1, 5.2 参照)。クローバーリーフプレートには、表面が床と同一となるフラッシュタイプと床面から盛り上がるレイズドタイプがあるが、本船では後者を採用している。

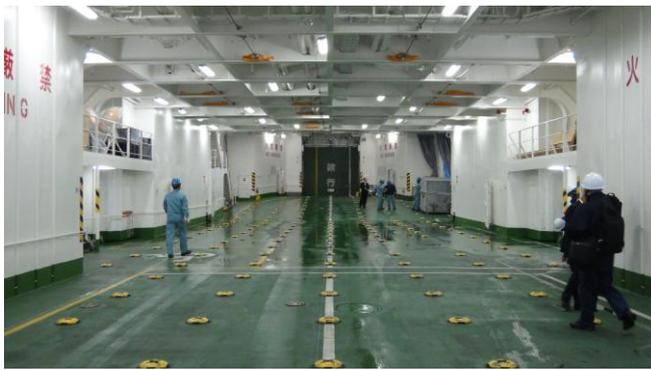


写真5.1 車両甲板



写真5.2 クローバーリーフプレート

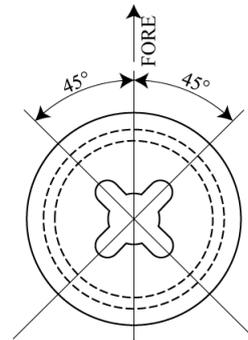
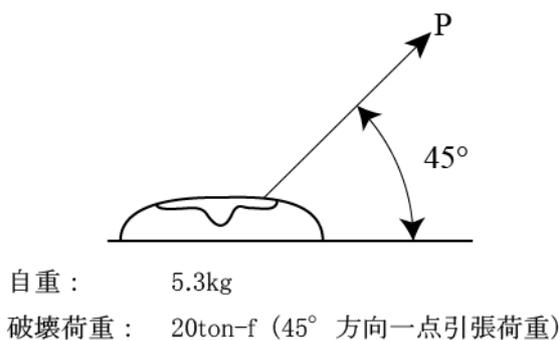


図5.1 レイズドタイプクローバーリーフプレート¹⁾ 図5.2 クローバーリーフプレートの向き¹⁾

クローバーリーフプレートの破壊荷重は、図 5.1 の様に接地面から 45°方向の一点引張荷重で定義されており、20ton-f である。また、クローバーリーフプレートは図 5.2 に示す様に船首方向から 45°ずらした向きで設置されている。

クローバーリーフプレートを使用するためには、写真 5.3 に示すエレファントフット (Elephant Foot) という特殊な形状の終端金具をクローバーリーフプレートに引っかけて、図 5.3 の様に使用する必要があり、通常のフック型の金具は使用できない。また張力は、クローバーリーフプレートの十字方向、床面から上向きに 45°の角度で掛かるように設計されている。したがって、エレファントフットのカローバーリーフプレートへの取り付けは、平面的にはクローバーリーフプレートの十字の切れ込み方向、つまり、船首・船尾から左右 45°方向でなくてはならないし、立面方向では甲板面から 45°にしなければならない。重量車両では図 5.4 の様に、トラック 1 台につき前方向 45°方向に左右 2 本ずつ、後ろ方向 45°方向に左右 2 本ずつ、合計 8 本での固縛方法をメーカーは推奨している¹⁾。車両甲板中央部で実測した結果、本船のカローバーリーフプレートは前後方向に 2.10m、左右方向に 1.55m の間隔で配置されている。



写真5.3 エレファントフット

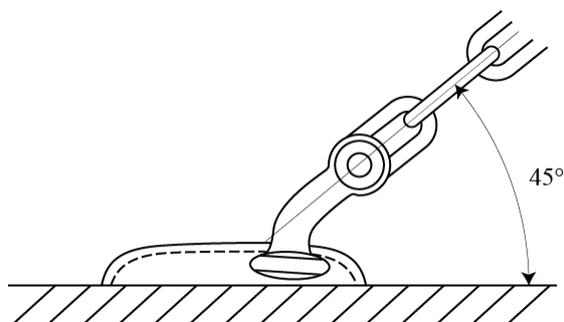


図5.3 エレファントフット¹⁾

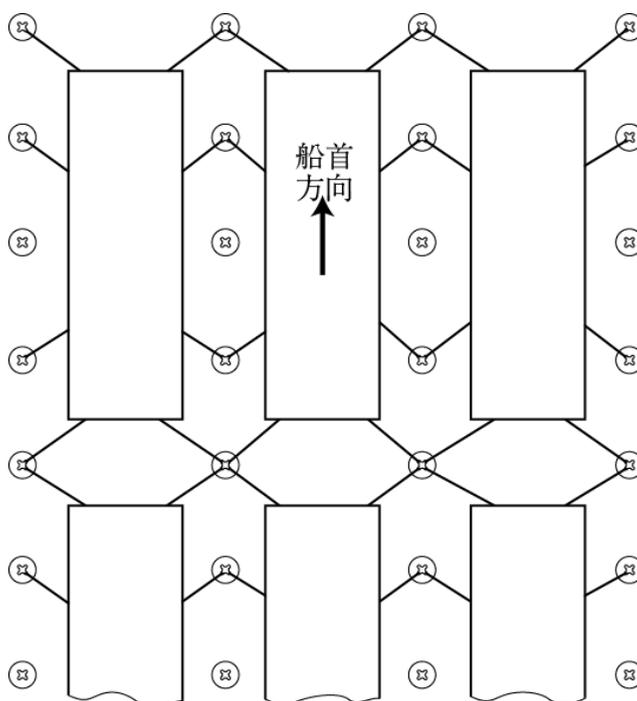


図5.4 メーカー推奨の重量車両固縛方法¹⁾

一方、車両甲板天井にはワイヤーが張られており、これにシャックルをかけ、リフティングスリングを組み合わせることにより、天井からの固縛準備が可能となる（写真 5.4）。



写真5.4 車両甲板天井の固縛装置

(2) 車両固縛資材

本船で使用している主な車両固縛資材を表5.1に整理する。表中で用いられている荷重関係の用語は、5.3節に整理しておくので参照されたい。ton-f≒10kNである。

表5.1 本船で使用している主な車両固縛資材

0.5	ベルト幅(mm)	長さ(m)	型式	破断荷重	最大使用荷重	使用荷重	試験荷重	数量(本)
ロックナー	28	—	K-205 H/H	2ton-f以上	(0.35 ton-f)	0.5ton-f	1.0ton-f	120
ロックナー	45	—	T-802 E/H	6ton-f以上	(1.0 ton-f)	1.5ton-f	3.0ton-f	200
リフティングスリング	25	1	ⅢE-25	5ton-f以上	0.8t以下	—	—	60
リフティングスリング	50	3.5	ⅢE-50	10ton-f以上	1.6t以下	—	—	42

1) ベルト式固縛機 (ロックナー)

カーフェリーでは通常、チェーンタイプのカーSTOPパーが用いられることが多いが、本船では主にポリエステル製ベルト式固縛機 (ロックナー) (大洋製器製) を用いて固縛が行われている。ベルト式固縛機はベルト幅 28mm と 45mm の 2 種類がある。

ベルト幅 28mm の固縛機 (K-205) (図 5.5) は、両端に小型フックがついており、本体金具で締め付けが可能である。フックを直接ローバリーフプレートにかけて使用することは想定されていないが、補助用の固縛装置としてバイク等の固縛に使用されている。カタログ上、使用荷重 0.5ton-f 以下、破断荷重 2ton-f 以上となっている。布製のリフティングスリングでは破断荷重が明確でないため、一般的に安全係数 6 が使用されるが、ベルト式固縛機の布製ベルトには安全係数の規定が無いいため、船舶用固縛装置の一般的な安全係数 4 を用いてベルト式固縛機全体の使用荷重としている。スリングベルトと同様に考えれば、安全係数 6 を用いて、最大使用荷重 0.34ton-f 以下と考えるべきである。

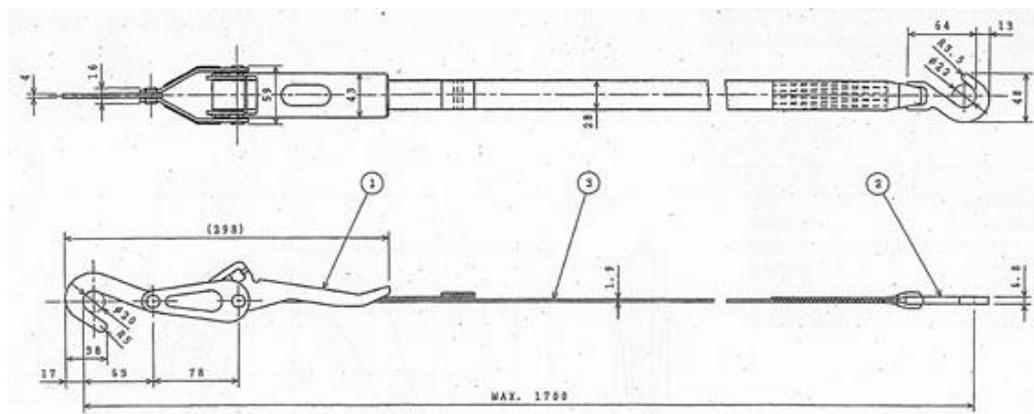


図5.5 ベルト幅28mmのベルト式固縛機 (ロックナー)

ベルト幅 45mm のベルト式固縛機 (T802-E/H) (図 5.6) は、トラックの固縛にメインに使用される固縛装置である (写真 5.5 参照)。下端にはエレファントフット (図 5.3 参照) がついており、これをクローバーリーフプレートに、上端フックを車両にかけて使用する。カタログ上、固縛機としての使用荷重 1.5ton-f 以下、破断荷重 6ton-f 以上であるが、これも最大使用荷重としては 1.0ton-f 以下と考えるべきである。今回の事故では 45mm の固縛機のベルト部分が破断したり (写真 5.6)、本体部分がはずれたり (写真 5.7) しており、6ton-f 以上の張力がかかったと考えられる。



写真5.5 スリング幅45mmのベルト式固縛機 (ロックナー)

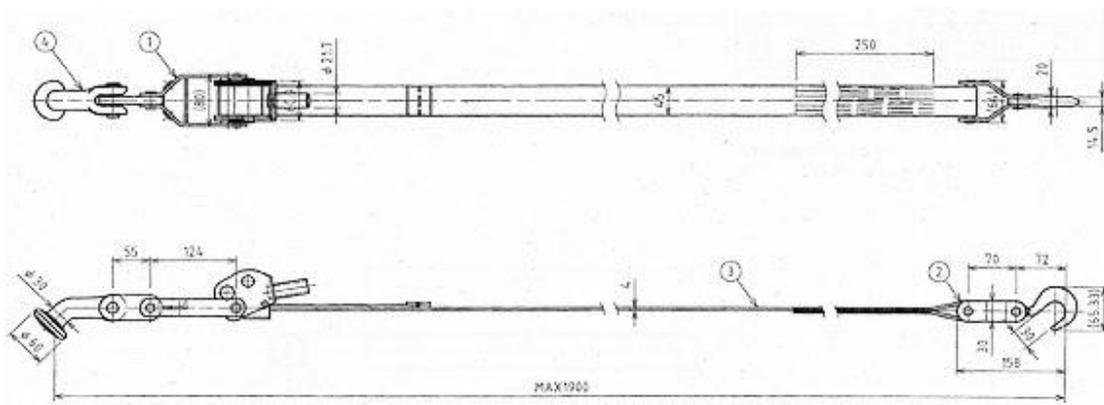


図 5.6 スリング幅 45mm のベルト式固縛機 (ロックナー)



写真 5.6 スリングの切断



写真 5.7 本体部分がはずれた様子

クローバーリーフプレートやベルト式固縛機等の固縛用具は平成 23 年に納入された新品で、管理状態は良好であった。自家用車等の軽い車両は、車止めとベルト式固縛機を用いておおむね適切に固縛されていた。荒天でない場合は、ベルト式固縛機は車両の前後に 2 本だけ使用して留めている。

一方、大型トラックの固縛は短い時間内に効率的に実施されていた。クローバーリーフプレートの横方向の間隔が大型トラックの横幅と近い関係で、写真 5.8 に示すように、車同士の間隔が非常に狭くなり、固縛は 45 度に近い適切な角度ではなく、真下に近い角度でとられていることが多い。この角度では、車両の横滑りに対してはほとんど効果がない。また、車両側に適当なフックをかける位置が見つからない場合、フックをとる位置もばらばらである。



写真5.8 大型トラックの固縛の例

2) リフティングスリング

リフティングスリングは、エステル製のもので、両端にアイがついており、ベルト幅 25mm と 50mm の 2 種類がある (写真 5.9 参照)。ベルトスリングの JIS 規格 (JIS B 8818) では、等級が I ~IV 等級まであり、同じベルト幅でも等級が高いほど最大使用荷重が大きくなるが、III 等級のものである。幅 25mm の最大使用荷重が 0.8ton-f 以下、破断荷重が 5ton-f 以上 (50kN 以上)、幅 50mm の最大使用荷重が 1.6ton-f 以下、破断荷重が 10ton-f 以上 (100kN 以上) で、いずれも安全係数 6 となっている。天井部のリフティングスリングを含めて、あくまでも補助的に使用されている。トラック後部ドアのヒンジ部に延長用としてリフティングスリングをかけ、これにベルト式固縛機を組み合わせ下向きに張力をかけているものも散見されたが、これは大きな船体傾斜時の横滑りには全く効果がないと考えられる。



写真 5.9 リフティングスリング

3) その他の固縛装置

この他には、クローバーリーフプレートではなく、床面に D リングがあるところでは、チェーンとワイヤーと組み合わせてカーストッパーもトラック固縛用として一部利用されている。また、ゴム製または木製のホイールチョーク (くさび) もタイヤ固定のため多数使用されている。(写真 5.10、5.11 参照)

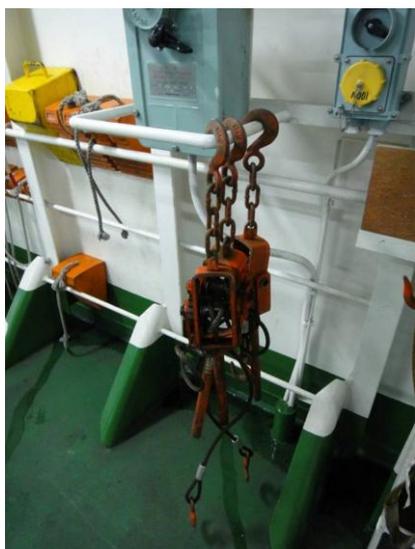


写真 5.10 カーストッパー



写真 5.11 ホイールチョーク

5. 2 車両甲板での車両事故の状況

船体傾斜による車両甲板での事故時の状況を、船主提供のデータから整理しておく。表 5.2 に事故時積載していた車両の一覧表を、図 5.7 に事故前の車両の位置及び積付状態と事故後の車両位置を示す。積付重量については、船主側提供の推定値である。事故時の車両台数は 21 台で、積載可能面積の約 8 割程度を占めており、かなり車両を多く積んだ状態であった。

長さ 12m 重量 12~16 トンの大型トラック 5 台を船体中心に積載し、その左右舷に小型のトラックや乗用車を配置している。乗用車、軽乗用車では、固縛をしなかったものもあったにもかかわらず、動いたものは⑫⑮だけであったが、これは大型トラック⑩及び⑭が横滑りしたためであり、乗用車単独で動いたものはない。この 2 台に車両⑪⑯⑲を加えた左舷側で損傷した 5 台は、いずれも大型トラック⑩及び⑭が横滑りしたため、トラックと船内側壁との間で挟まれて破損したものであり、固縛単独での問題は生じていないと考えられる。右舷側のもは⑰のトラックを除き動いておらず、損傷もしていない。したがって今回問題となるのは、大型トラック 5 台②⑤⑩⑭⑲、及び左舷の⑥、右舷の⑰の普通トラック 2 台の計 7 台の固縛が適切であったかということになる。

表 5.2 事故時積載車両一覧

番号	車種	全長 (m)	推定重量 (t)	固縛方法	破損状況
①	トラック	5	2	固縛マニュアル 3/4	
②	トラック	12	15	固縛マニュアル 3/4	破損
③	乗用車	5	1	固縛マニュアル 3/4	
④	トラック	8	4	固縛マニュアル 3/4	
⑤	トラック	12	15	固縛マニュアル 3/4	破損
⑥	トラック貨物扱	9	4	固縛マニュアル 3/4	破損
⑦	乗用車	5	1	固縛マニュアル 3/4	
⑧	乗用車	5	1	車体に固縛箇所なし	
⑨	乗用車	5	1	固縛マニュアル 3/4	
⑩	トラック貨物扱	12	16	固縛マニュアル 3/4	破損
⑪	軽トラック	4	0.6	車体に固縛箇所なし	ひどい破損
⑫	乗用車	5	1	車体に固縛箇所なし	破損
⑬	トラック	5	2.5	固縛マニュアル 3/4	
⑭	トラック貨物扱	12	15	固縛マニュアル 3/4	ひどい破損
⑮	軽乗用車	4	0.6	固縛マニュアル 3/4	破損
⑯	トラック貨物扱	5	2	車体に固縛箇所なし	破損
⑰	トラック	6	8	固縛マニュアル 3/4、アウトリガー使用	破損
⑱	トラック	5	2.5	固縛マニュアル 3/4	破損
⑲	軽乗用車	4	0.6	車体に固縛箇所なし	
⑳	トラック貨物扱	12	12	固縛マニュアル 3/4	破損
㉑	乗用貨物扱	5	1	車体に固縛箇所なし	

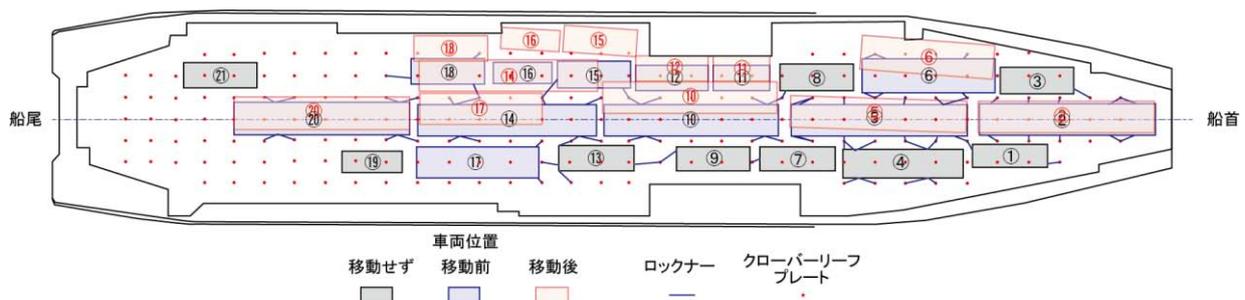


図 5.7 事故時車両積付状態

5. 3 荷重関係の用語の整理

ここで、荷重関係の用語や規定を整理しておく。ただし、用語は統一されていない部分もある。

- 破断荷重 (Breaking Load または Breaking Strength(BL))
破壊強度と称される場合もあり、新品のワイヤロープ、チェーン、スリング等の1本を、ゆっくりと引っ張っていった際に破断する荷重である。
- 最大使用荷重 (Working Load Limit (WLL))
場合によっては、基本使用荷重または基本安全荷重 (安全荷重) とも称される。1本のワイヤロープ、チェーン、スリング等に負荷することができる最大の質量を表す。ISO規格による用語では安全使用荷重 (Safe Working Load (SWL)) であったが、JIS規格の改定で1996年以降はWLLとなった。
- 使用荷重 (Working Load (WL))
つり方、つり本数、つり角度、使用雰囲気などを考慮したうえで使用できる最大の荷の質量を表す。1本つりの場合、最大使用荷重と同値となる。
- 試験荷重 (Proof Test Load (PTL))
試験機で引っ張り、規格以上の変形をしてはならない荷重である。
- 安全係数
安全係数 = 破断荷重 / 最大使用荷重
チェーンのJIS規格 (JISB8816 巻上用チェーンスリング) では、安全係数の値は4以上となっているが、玉掛け作業に使用する場合はクレーン等安全規則第213条の2では安全係数は4以上又は5以上と規定されている。フック等のJIS規格 (JISB8816 及び JISB2803 フック) では、安全係数の値は4以上となっているが、クレーン等安全規則第214条では安全係数5以上と規定されている。ベルトスリングのJIS規格 (JISB8818 ベルトスリング) では、安全係数の規定はないが、布製品は破断荷重が明確でないため、業界では安全係数は6以上ととしている場合が多い。一方、フェリー等の固縛装置では、船舶安全法関係法令に基づき、安全係数は4以上と定められている。
- 最大固縛荷重 (Maximum Securing Load (MSL))
IMOのCode of safe Practice for Cargo Stowage and Securing (CSSコード)²⁾では最大固縛荷重を破断荷重 (Breaking Load (BL)) から表5.3の様に定めている。この場合、 $MSL \geq SWL$ (WLL) であるが、固縛装置としては $MSL = SWL$ と考えて良く、安全係数は1.2~3.0と国内の基準に比べてかなり小さい。

表 5.3 CSS 規則での破断荷重からの最大使用荷重の定義²⁾

固縛用具	最大使用荷重
軟鋼製シャックル、リング、デッキアイ、ターンバックル	破断荷重の50%
繊維ロープ	破断荷重の33%
織りベルト	破断荷重の50%
ワイヤーロープ (非再使用品)	破断荷重の80%
ワイヤーロープ (再使用品)	破断荷重の30%
帯鉄 (再使用品)	破断荷重の70%
チェーン	破断荷重の50%

5. 4 摩擦係数について

車両甲板表面の状態は、鮮魚や家畜を積んだ後は車両甲板の清掃のために水を撒くため、濡れている場合が多い（写真 5.12 参照）。濡れている場合、甲板の摩擦力は極めて小さくなる。



写真5.12 車両甲板への散水の様子

平成21年11月の熊野灘航行中の大型フェリー事故を受けて、通達された「フェリー・RORO 船の安全対策について」³⁾では、実験を行った結果、車両甲板と貨物の中で作用する摩擦力の評価のための係数は以下の通りとしている。

- 甲板（鋼） 対 タイヤ・ゴムマット（ゴム）の場合 摩擦係数 0.4
- 甲板（鋼） 対 コンテナ（鋼）の場合 摩擦係数 0

また、IMOのCSS規則²⁾では摩擦係数を以下の表5.4の通りとしている。

表 5.4 IMO の CSS 規則での摩擦係数²⁾

接触材料	摩擦係数 (μ)
木材-木材（湿潤時または乾燥時）	0.4
鋼-木材または鋼-ゴム	0.3
鋼-鋼（乾燥時）	0.1
鋼-鋼（湿潤時）	0.0

一方、本船の車両甲板には、珪砂を用いて摩擦を高めたハルテックスエポキシレジジン LW（5号珪砂）（図 5.8 参照⁴⁾）が塗布されており、その摩擦係数は試験により、1.23（乾燥時）、1.21（湿潤時）、0.75（油湿潤時）とかなり高いことが報告されているが、これらの値は試料を用いた試験室での静摩擦計測によって求めたものであり、実際の車両と車両甲板の摩擦係数はこれよりかなり小さくなる。一般的な車両甲板で積荷を実際に引っ張って計測した例³⁾では、鋼-ゴムで乾燥時 0.6、湿潤時 0.3 程度との報告がある。

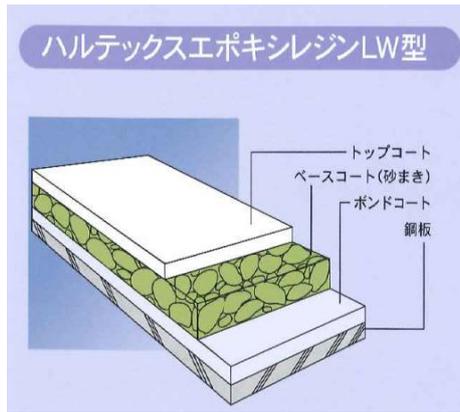


図 5.8 ハルテックスエポキシレジン LW⁴⁾

5. 5 固縛の強度評価計算方法

(1) 車両に作用する外力の算定

強度評価で用いる座標系は図 5.9 のものとする。

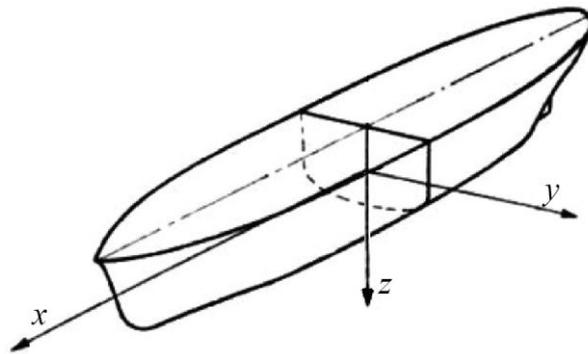


図 5.9 強度評価で用いる座標系

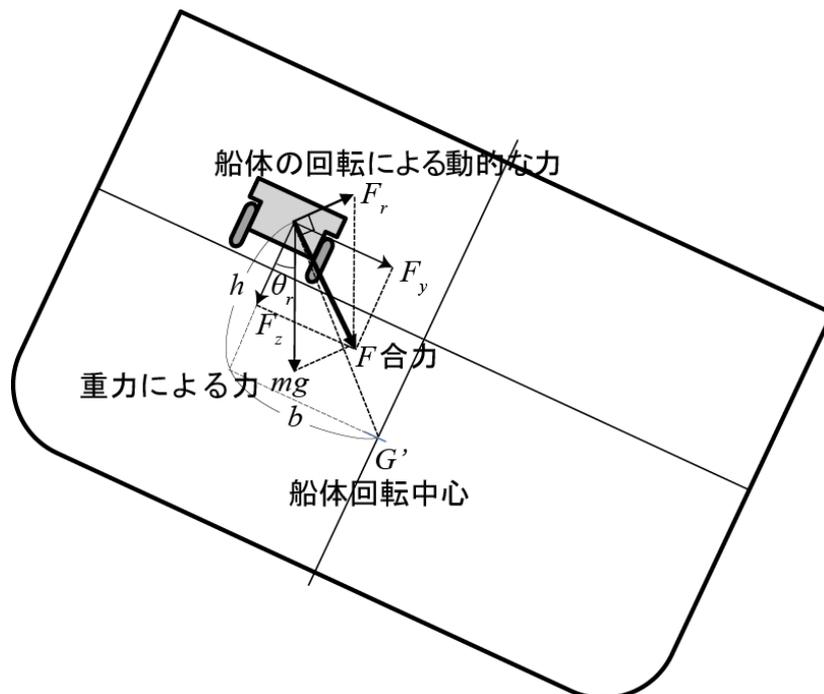


図 5.10 船体に作用する外力のイメージ

車両の固定に用いた固縛装置に掛かる張力を算定するためには、車両に加わる外力を算定する必要がある。ここでは、算定方法の簡略化を図るため、船が波などの影響で規則的に動揺している状況を想定して外力を算定することとする。算定する外力の船体断面でのイメージは図 5.10 のとおりで、車両には重力による力 mg と船体回転中心 G' 周りのローリングによる力 F_r の合力が作用している。船体長手方向で考えると、さらにピッチングによる力 F_p が作用している。

また、船体回転中心 G' と車両位置の関係は図 5.11 のとおりである。

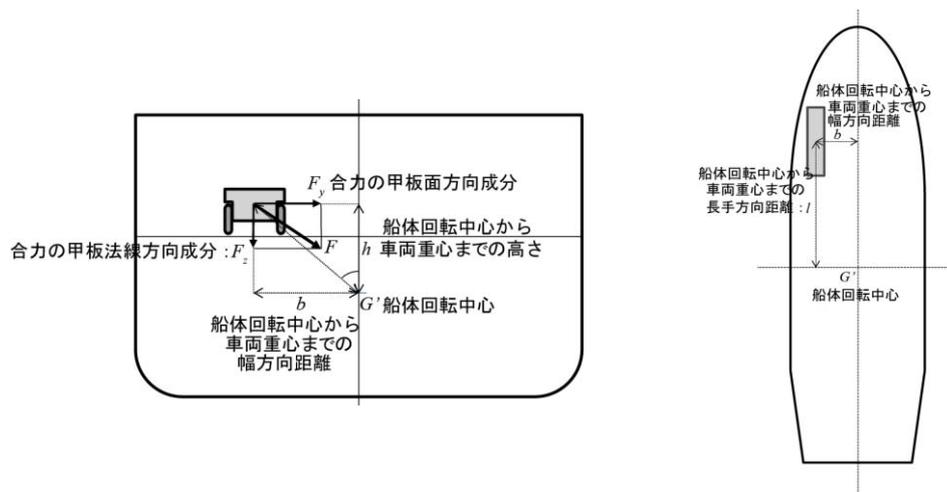


図 5.11 船体の断面図・平面図と車両位置の関係

まず、船体の回転中心 G' を求める。参考文献³⁾では、上下方向の回転中心 G' を次式により算定することとしている。

$$KG' = (KG + KB) / 2 \quad (5.1)$$

又は

$$KG' = 0.5 \times (D/2 + d) \quad (5.1)'$$

ここで G : 重心、 B : 浮心、 K : キール、 D : 型深さ、 d : 喫水である。ローリングが小さい場合の回転中心は喫水面上にあると考えられるが、傾斜角が大きくなると変化する。ここでは式(5.1)を採用する。前後方向の回転中心位置は、単純に垂線間長中心位置とする。

続いて、車両の質量 m (kg)、傾斜角 θ_r (rad)、 θ_p (rad)、貨物の位置 b (m)、 l (m)、 h (m) に基づき、車両に作用する外力の回転の円周方向成分の最大加速度からローリング、ピッチングによる力 F_r と F_p の最大値を求める。算定にあたって必要な船体の縦揺・横揺の周期 T_r と T_p は、前章までで計算により求めた値を用いるものとする。

$$F_r = m (b^2 + h^2)^{1/2} \theta_r (2\pi / T_r)^2 \quad (5.2)$$

$$F_p = m (l^2 + h^2)^{1/2} \theta_p (2\pi / T_p)^2 \quad (5.3)$$

次に、 F_r と F_p と重力による力 mg との合力の甲板面横方向の成分 F_y と甲板法線方向の成分 F_z を求める。この場合、力の方向（プラス、マイナス）により値が変わることになるが、いずれも車両にとって最も厳しい状態となる外力を求めることとすると、船幅方向、長手方向ともに回転によって高くなる側に車両があった場合が F_z が最小、 F_y が最大となり、最も厳しい状態となる。

$$F_y = mg \sin \theta_r + F_r h / (b^2 + h^2)^{1/2} = m \{g \sin \theta_r + h \theta_r (2\pi/T_r)^2\} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} F_z &= mg \cos \theta_r - F_r b / (b^2 + h^2)^{1/2} - F_p l / (l^2 + h^2)^{1/2} \\ &= m \{g \cos \theta_r - b \theta_r (2\pi/T_r)^2 - l \theta_p (2\pi/T_p)^2\} \end{aligned} \quad (5.5)$$

(2) 車両の固縛装置に作用する力

上記で求めた外力をもとに、車両の固縛装置に掛かる力を算定し、固縛装置の強度の評価を行う。なお、固縛装置の強度評価にあたっては、①転倒、②並行移動のそれぞれのモードについて、独立して強度の評価を行うこととする。

① 転倒モーメントと固縛装置に掛かる力

車両等を剛体とみなして、片側の接地点の端を軸に転倒モーメントが作用するとした場合の固縛装置に掛かる力を算定する。実際には、車両のバネ、ダンパー等が影響を及ぼすが、その影響は小さいものとして無視する。また船体横方向への移動は無視する。

車両の重心を G_c 、車両のトレッド幅を b_c 、車両甲板から重心までの高さを h_c と表わすと、力のイメージは次の図 5.12 のとおりである。

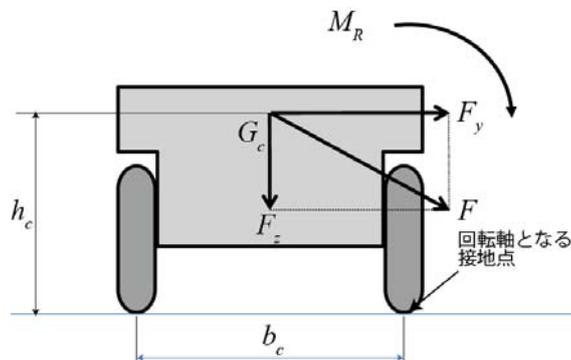


図 5.12 車両に作用する転倒モーメント

車両に加わる転倒モーメント M_R は以下の式で表わされる。

$$M_R = h_c F_y - b_c F_z / 2 \quad (5.6)$$

次に、固縛装置 1 本に掛かる張力 T を用いて、固縛による反転倒モーメント M_A を求める。車両・コンテナの固縛装置の本数を n とする。例えば両側で 8 点の固縛装置で取っている場合は $n = 4$ となる。また、転倒モーメントの回転軸となる接地点（図 5.13 の例では、甲板と設置している右の端点）から固縛装置の延長線上に垂線を下ろしたときの距離を k とする。 k は図 5.13 に示すように、固縛による反転倒モーメントのこの長さである。

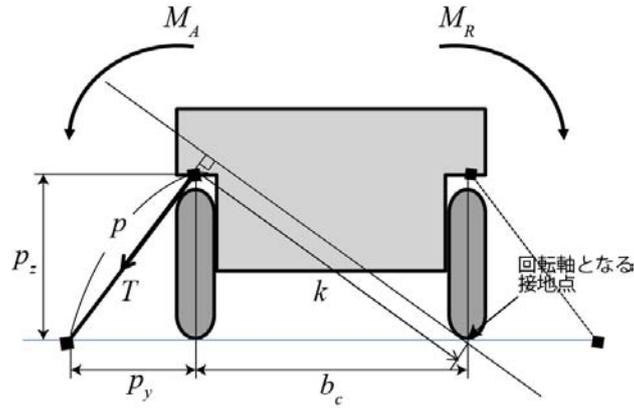


図 5.13 転倒モーメント M_R 及び反転倒モーメント M_A と
転倒防止方向に作用する固縛装置の張力

固縛装置の甲板上位置と車輻上位置との距離の x, y, z それぞれの方向の長さを図 5.14 に示すように p_x, p_y, p_z 、固縛装置の長さを p とする。 $p = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)^{1/2}$ である。

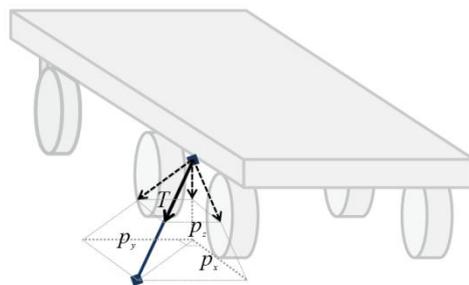


図 5.14 固縛装置の取り付け位置の図

反転倒モーメント M_A は以下のとおり表される。

$$M_A = (p_y^2 + p_z^2)^{1/2} n T_1 k / p \quad (5.7)$$

ここで、 k は、以下の通り表わされる。

$$k = (b_c + p_y) p_z / (p_y^2 + p_z^2)^{1/2} \quad (5.8)$$

モーメントの釣り合いにより、 $M_R = M_A$ となることから、(5.6) ,(5.7), (5.8) 式を用いて転倒モーメントにより固縛装置 1 本に掛かる最大の張力 T_1 を求めると、以下の式で表わせる。

$$T_1 = (h_c F_y - b_c F_z / 2) p / \{(b_c + p_y) n p_z\} \quad (5.9)$$

② 船体横方向への並行移動と固縛による反力

次に、船体横方向への並行移動する場合の固縛装置に掛かる力を算定する。車輻甲板と貨物の間の摩擦係数を μ として、甲板面方向の力の釣り合いを考えると図 5.15 のようになる。

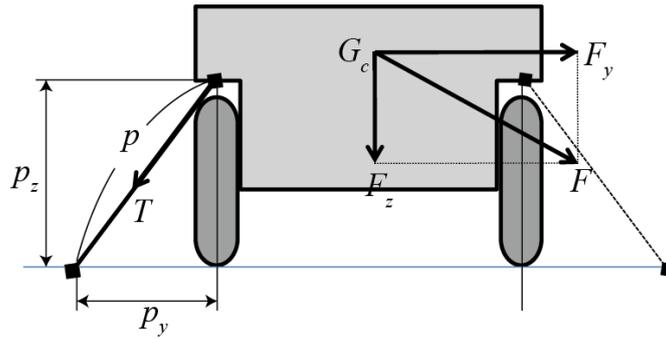


図 5.15 車両に作用する並行移動外力と移動防止方向に作用する固縛装置の張力

甲板面方向の成分 F_y を求めると次式で表される。

$$F_y = n p_y T_2 / p + \mu (F_z + n p_z T_2 / p) \quad (5.10)$$

横方向への並行移動により固縛装置に掛かる最大の張力 T_2 は、以下の式で表わせる。

$$T_2 = p / n \times (F_y - \mu F_z) / (p_y + \mu p_z) \quad (5.11)$$

5. 6 事故時に固縛装置に掛かった力

前節で求めた計算に従って、事故時に各車両の固縛装置にかかった力を求めていく。まず、式(5.1)に従って、回転中心位置 KG' (m) を求めると 4.38 (m) となる。各車共通の船体関係のデータを表 5.5 にまとめる。「外洋を航行するフェリー・RORO 船の貨物固縛方法について (ガイドライン)」³⁾では固縛評価計算のための傾斜角を横 25°、縦 5°と指示しているが、横傾斜角は本報告で用いた事故時の傾斜角 27°を、縦傾斜角は指示のとおり 5°を用いた。

表 5.5 各車共通のデータ

記号	内容	値
KG	: 重心位置 (m)	6.39
KB	: 浮心位置 (m)	2.37
KG'	: 回転中心位置 (m)	4.38
KM _r	: 横メタセンタ位置 (m)	7.96
T_r	: 動揺周期 (ローリング) (s)	12.27
T_p	: 動揺周期 (ピッチング) (s)	4.42
θ_r	: 船体の横傾斜角 (rad)=27°	0.471
θ_p	: 船体の縦傾斜角 (rad)=5°	0.087
g	: 重力加速度 (m/s ²)	9.81
h_a	: 車両甲板のキールからの高さ (A.P.) (m)	6.55
h_m	: 車両甲板のキールからの高さ (船体中央) (m)	5.60
h_f	: 車両甲板のキールからの高さ (F.P.) (m)	6.30

次に、計算を行うため、各車両個別の値を決める。船体回転中心から車両重心までの幅方向と長手方向の距離は、船主提供の初期状態の位置から求めた。車両重心までの高さは表 5.5 で示した車両甲板のキールからの高さを考慮した。大型トラックは、25 トンの大型トラックの標準的な値を用い、⑥は標準的な 4 トン中型トラック、⑰は作業車等、ショート中型トラックとして、値を決めた。先に述べたようにクローバーリーフプレートの横方向の配置間隔が、左右方向に 1.55m であることから、クローバーリーフプレートを 1 列あけて使用したとして、固縛固定位置と車両固定位置との横方向間隔を決定した。

表 5.6 各車個別のデータ

記号	内容	大型トラック					中型	中型
		②	⑤	⑩	⑭	⑳	左舷⑥	右舷⑰
m	車両の質量 (kg)	15,000	15,000	16,000	15,000	12,000	4,000	8,000
b	船体回転中心から車両の重心までの幅方向距離 (m)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0
l	船体回転中心から車両の重心までの長手方向距離 (m)	32.0	18.5	5.5	7.5	20.5	22.0	9.5
h	船体回転中心から車両の重心までの高さ (m)	7.7	7.3	7.1	7.2	7.4	7.0	6.7
b_c	車両のトレッド幅 (m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.8
h_c	車両甲板から車両の重心までの高さ (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0
p	固縛装置の長さ (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3
p_y	固縛装置の甲板上位置と車両上位置との距離 y 成分 (m)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
p_z	固縛装置の甲板上位置と車両上位置との距離 z 成分 (m)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.1
μ_1	甲板(鋼)-タイヤ(ゴム)の摩擦係数(乾燥状態)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
μ_2	甲板(鋼)-タイヤ(ゴム)の摩擦係数(ウエット)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
μ_3	塗料-ゴムの摩擦係数(水湿潤状態)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
n	ロックナー使用本数(片側)	5	5	4	4	4	3	1

車両甲板とタイヤとの摩擦係数については、海事局のガイドライン³⁾に従った標準状態 $\mu_1=0.4$ と摩擦をなしとした状態 $\mu_2=0.0$ に、ハルテックスエポキシレジン LW (5 号珪砂) 塗装の試験結果(水湿潤状態) $\mu_3=1.2$ を加えた、3 ケースを計算することとした。各車個別のデータ一覧を表 5.6 にまとめる。

横揺れによって車両に掛かる円周方向成分 F_r と半径方向成分 F_p を式(5.2)と式(5.3)を用いて、甲板面横方向の成分 F_y と甲板法線方向の成分 F_z を式(5.4)と式(5.5)を用いて求める。これから、式(5.9)を用いて転倒モーメントにより固縛装置に掛かる力 T_1 と、式(5.11)を用いて船体横方向への並行移動と固縛に掛かる力 T_2 とを求める。 T_2 については、 μ の違いによる 3 ケースを計算した。結果を表 5.7 にまとめて示す。ベルト幅 45mm のベルト式固縛機の最大使用荷重を使用荷重と同じ 1.0ton-f (10kN)、破断荷重を 6.0ton-f (60kN) とし、最大使用荷重を超えた荷重を黄色、破断荷重を超えた荷重を赤色で塗って示した。

表 5.7 事故時に固縛装置の掛かった力

記号	内容	大型トラック					中型	中型
		②	⑤	⑩	⑭	⑳	左舷⑥	右舷⑰
F_r	ローリングにより生ずる力 (N)	14,180	13,531	14,038	13,346	10,973	3,742	7,212
F_p	ピッチングにより生ずる力 (N)	87,031	52,608	25,340	27,501	46,121	16,274	16,359
F_y	車両にかかる外力の横方向成分 (N)	80,984	80,336	85,296	80,150	64,417	21,250	42,203
F_z	車両にかかる外力の鉛直方向成分 (N)	46,466	82,176	124,334	111,273	61,508	17,962	53,558
T_1	転倒モーメントにより固縛装置に加わる力 (N)	7,142	3,649	430	1,065	4,179	910	0
T_{21}	横方向への並行移動により固縛に加わる力 $\mu_1=0.4$ (N)	22,075	16,792	15,726	15,761	17,606	7,256	32,159
T_{22}	横方向への並行移動により固縛に加わる力 $\mu_2=0.0$ (N)	80,984	80,336	106,620	100,188	80,521	23,021	137,160
T_{23}	横方向への並行移動により固縛に加わる力 $\mu_3=1.2$ (N)	12,498	12,397	16,454	15,461	12,426	5,354	31,898

破断荷重超過 最大使用荷重超過

5. 7 固縛強度の評価と固縛の改善策の検討

前節で求めた貨物の固縛装置に掛かる力をもとに、固縛装置の強度の評価を行う。なお、転倒に対する力と、並行移動による力は、外力が加わった際にいずれかが発生するものであり、同時に発生するものではないため、それぞれの力ごとに個別に評価を行う。

(1) 固縛強度の評価

この簡易計算ではピッチングによって生じる力をやや大きめに評価しすぎる傾向があることに注意は必要であるが、車両に掛かる外力の横方向成分が比較的一定になるのに比べ、鉛直方向成分は船体中央付近で大きくなる。

転倒モーメントにより固縛に掛かる力はいずれも使用荷重に比べて低く、今回の事故時のように 27° ものローリング下でも車両が転倒することはない。固縛装置に掛かる力は比較的小さく、最大使用荷重範囲内に十分入っている。

一方、横方向への並行移動により固縛に掛かる力は、 $\mu_3=1.2$ では大型トラック 2 台と⑰で最大使用荷重を超えており、 $\mu_1=0.4$ では左舷の⑥を除いた車両で固縛が最大使用荷重を超える。さらに、 $\mu_2=0.0$ では、⑥を除いた車両で固縛が破断荷重を超えてしまう。 $\mu_3=1.2$ という値は試験値であり、実際の摩擦係数はこれよりかなり低い値となる³⁾。この簡易計算では、車両もベルト式固縛機もすべて剛体として考えているが、実際には車両のスプリングや布製ベルトの弾力性により、力はある程度分散されるものの、船体の衝撃的な動きで車両の横滑りが少しでも始まると、摩擦は静摩擦から動摩擦となって急激に小さくなり $\mu_2=0.0$ の結果に近づき、剛体と仮定していた全体のバランスが崩れてベルト式固縛機に破断荷重以上の力が加わり破断すると考えられる。また、布製のベルトはチェーン等の金属に比べて一般的にスナップ荷重に弱い。 $\mu_1=0.4$ という値は、水や油やゴミのついた実際の床面の摩擦係数というだけでな

く、これら諸々の現象に対する安全を考慮した値となっている。したがって、たとえ高摩擦の塗料を塗布してあっても、摩擦係数としては0.4を用いた計算で、すべての固縛装置が最大使用荷重範囲内に十分入っていることを確認することが、固縛の状態が適切であるかを評価には必要であると考えられる。

(2) 強度評価結果を踏まえた固縛の改善策の検討

1) 大型トラック5台②⑤⑩⑭⑳

標準的な25トンの大型トラックの全幅は約2.49mであるが、クローバーリーフプレートの横方向の配置間隔が1.55mであることから、クローバーリーフプレートを1列おきに使用するとして、その差は $1.55\text{m} \times 2 - 2.49\text{m} = 0.61\text{m}$ 、片側では p_y が約30cmしかないことになる。車両側のフックをかける位置は荷台下付近が多く、 p_z が1mより高いため、真下に引っ張る感じとなる。この結果、転倒に対しては強いが、横滑りに対しては非常に弱い固縛となっている。この固縛角度のまま摩擦力がゼロの場合でも横滑りによって固縛装置に掛かる張力を最大使用荷重以下に抑えようとする、実現性がないほどの多くの本数で固縛する必要がある。

事故再発防止策としては、なるべく固縛の角度を理想的な 45° に近づけることが肝要であるが、クローバーリーフプレートの間隔が大型トラックの幅に近く、位置は容易に変えられないことから、 45° に近づけるためには、大型トラック側のフック位置をなるべく低くする必要がある。本船の場合、大型トラックは船主所有のものも多く、定期的な利用者が大半ということから、車両側のシャーシ下部といった低い位置にフックをとるための金具を溶接してつけておくことが、安全面でも固縛の効率面でも非常に有効である。また、どうしても p_y を大きくできない場合は、固縛をたすき掛け（左右でクロス）にとることも有効な方法である（図5.16参照）。ただし、たとえクロスに固縛したとしても、 p_z が今のままで基本使用荷重を越えないようにするには、12本取りが必要であることから、荒天時の8本取りはやや本数が少なすぎると考えられる。最大使用荷重がベルト式固縛機より大きいカーストッパー（写真5.10参照、最大使用荷重が2.25ton-fとベルト式固縛機より大きい）等、チェーンを用いた固縛装置を使用することも考えられるが、これらの固縛装置は自重が大きく、作業性はベルト式固縛機に比べて大きく劣る。

2) 左舷のトラック⑥

全長から標準の中型トラックと考えられ、推定重量4トンと比較的軽い。右舷側でだいたい同じ位置にあった同じ重量のトラック④が横滑りしていないが、これとの違いは固縛の本数である。④が8本取りをしているのに対し、⑥は6本取りと少ない。ただし、最大使用荷重は越えたが、破断荷重は越えていないので、固縛が破断したのは固縛に自体に問題があったか、中央の大型トラック②または⑤に押されたことをきっかけとして横滑りした可能性もある。

3) 右舷のトラック⑰

推定重量8トンと、大型トラックを除けば一番重い、全長が6mしかないことから中型の作業車と考えられる。このトラックの横滑りが車両甲板後半部での数台の衝突の引き金となったと考えられるが、その原因は、重量が大きいにもかかわらず、アウトリガーを使用し、固縛を後部の2本しかとらなかったという点にある。アウトリガーは転倒防止には効果があるが、横滑り防止には効果がない。さらに、アウトリガーを使用することにより、比較的摩擦力のあるタイヤと床面の接触でなく、アウトリガーと床面の鋼-鋼が直接接触することとなり、摩擦力

はかぎりなくゼロに近づくという弊害もある。新しく定めた固縛マニュアルでは、アウトリガーを使用しないことにしているが、転倒防止のために使用することは有効であるが、重量が大きい作業車での固縛では横滑り防止をメインに考えて、他のトラック以上の固縛本数をとる必要がある。

4) 固縛機器メーカー推奨の固縛方法

固縛機器メーカー推奨の固縛方法をイラストで示したのが、図5.16である。左右方向にゆとりをもって固縛しているが、横方向の滑りへの対処として、コンテナの下、シャーシーで固縛することが望ましい。また、前後方向の滑りを考えると、先に図5.4に示したように様に、重量車両ではトラック1台につき前方向45°方向に左右2本ずつ、後ろ方向45°方向に左右2本ずつ、前後から張るように合計8本のカーストッパーでの固縛方法をメーカーは推奨している¹⁾。固縛は平面的に見てトラックの前後45°方向から引っ張り、立面方向では甲板面から45°方向に引っ張るのが、横転と横滑り両者を均等に防止する理想的な方向である。ただしこの場合でも、荒天時にはさらにオーバーラッシング等により固縛本数を増やさなければならない。

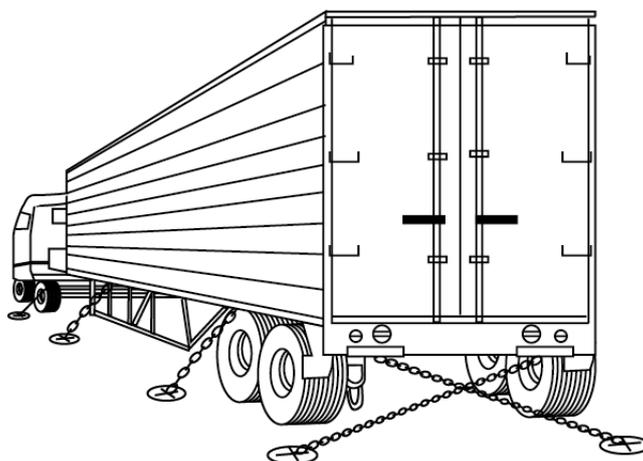


図 5.16 たすき掛けの固縛例³⁾

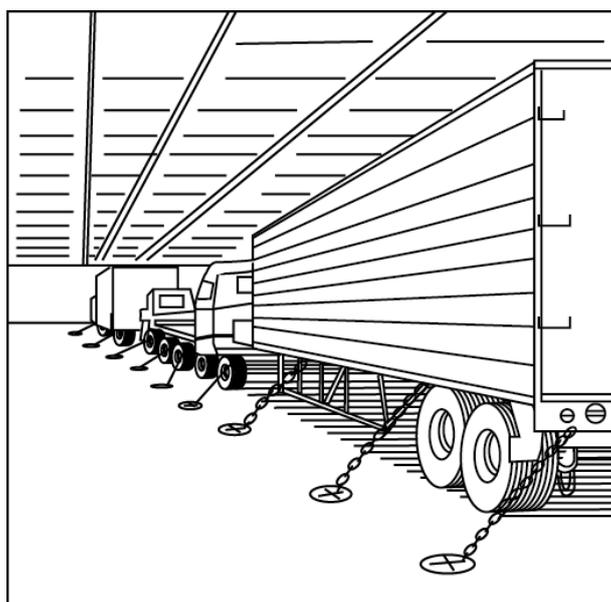


図 5.17 重量車両の固縛方法¹⁾

参考文献

- 1) TAIYO Lashing System for Container, Car, Lumber and Helicopter, 大洋製器工業株式会社
- 2) Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing 2011 Edition, International Maritime Organization.
- 3) フェリー・RORO 船の安全対策について (別紙 5)「外洋を航行するフェリー・RORO 船の貨物固縛方法について (ガイドライン)」、平成 23 年 4 月 28 日国土交通省海事局
- 4) 会社案内、株式会社コスモ

6. まとめ

平成 23 年 11 月 18 日、長崎県五島市福江港港外で発生した旅客フェリー旅客負傷事故の調査に資するため、①事故時の旅客フェリーの復原性を算出し、船体の大傾斜の可能性について検討するとともに、②積荷の固縛状況をもとに、荷崩れの可能性について検討を行った。

今回の解析調査によって得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(乗船調査)

- ①操舵時の船体傾斜の計測を行ったところ、ほとんどの場合、操舵角は 4～6 度であり、操舵に伴う傾斜角は 2～4 度、傾斜方向は舵角と逆方向（外方傾斜）であった。また、計測データからは、操舵直後の内方傾斜（舵を取った側への傾斜）が判読できなかった。
- ②操舵時の船速が事故発生時の速力に近い 18.5kn～19.5kn の計測結果を整理したところ、本船は操舵に伴い舵角の大きさと同程度船体が傾斜するとの調査官の説明と今回の計測結果との整合性が確認された。
- ③大型トラックの固縛は短い時間内に効率的に実施されていたが、クローバーリーフプレートの横方向の間隔が大型トラックの横幅と近い関係で、車同士の間隔が非常に狭くなり、固縛は 45 度に近い適切な角度ではなく、真下に近い角度でとられている場合が多く、この角度では、車両の横滑りに対してはほとんど効果がないと考えられた。また、車両側に適当なフックをかける位置が見つからない場合、フックをとる位置もばらばらであった。

(復原性の推定)

- ①事故発生時の本船のメタセンタ高さ GM は、満載出港状態より 0.28m も大きい 1.49m であり、海水流入角 ϕ_f も約 52 度と満載出港状態より 2 度程度大きかったと推定される。また、事故発生時の本船の復原力 (GZ) も満載出港状態の復原力より若干大きかったと推定されることから、事故発生時の本船の復原性は、設計時に復原性の検討が行われた満載出港状態と同等以上であったと考えられる。
- ②本船は船体後部船底に固定バラストを搭載したことで、事故発生時と同一の燃料、車両等搭載した場合でも、メタセンタ高さ GM が 1.55m と事故発生時の改造工事前の状態に比べて 0.06m 大きくなり、また、復原力 (GZ) も全般的に大きくなる。
- ③従来船の事故当日のメタセンタ高さ GM は 1.22m であり、事故発生時の本船の GM より 0.27m も小さい。但し、復原力 (GZ) を比較すると、傾斜角が約 10 度から約 40 度までの範囲で、事故当日の従来船の復原力は、事故発生時の本船の復原力より大きくなっている。

(船体傾斜の推定)

- ①事故発生時の状況として、波高 5m の大波の波長を船の全長より若干短い 78m、波との出会角を 60 度～70 度と想定し、また船速は 18.6kn～19.4kn とすると、本船の波浪による傾斜角は 14.2 度～24.3 度と推定される。また、事故現場付近の風速 15～17m/s の風による傾斜は 2.2 度～2.8 度と推定されることから、事故発生時の波浪及び風により、本船の船体は 16.4 度～27.1 度横傾斜したと推定される。
- ②一方、事故発生時の状況で、傾斜計位置での横方向加速度の影響で、傾斜計の指示値が実際の傾斜角より 8 度程度大きくなると見積もられることから、事故発生時の波浪及び風による船体

傾斜の船橋傾斜計の指示値は約 24 度～約 35 度になると推定され、その上限は大波を受けた際の船橋傾斜計の指示値（35 度）とほぼ一致する。

- ③車両の移動が比較的傾斜が小さい時点で発生したとすると、車両の移動に伴う傾斜モーメントにより実質的な復原モーメントが減少し、左舷側傾斜が増大したと推測される。
- ④大傾斜発生後の状況で、車両の移動に伴う傾斜角は 2.3 度、平均的な風速 12m/s の風による傾斜角は 1.5 度となり、車両の移動による傾斜と風による傾斜を合算すると、3.8 度左舷側に傾斜すると推測され、調査官から説明があった事故後の傾斜角（左舷側傾斜約 4 度）とほぼ一致する。
- ⑤事故発生時の状況では、波浪による傾斜が大傾斜の主要因と考えられることから、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、波浪による傾斜角を小さくする必要がある。なお、波が高くなる海域（五島沖、長崎沖）及び状況は、本船乗組員及び運航管理者が把握していることから、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、一義的には、大波に遭遇しないように、波が高くなる状況では当該海域を避けて航行することが重要であると考えられる。
- ⑥事故発生時の状況では、針路を変更して波との出会角を変えることで、横揺が小さくなると推測されるが、本船の場合、船速 18.6kn では出会角が小さな追波状態で航行した場合には、波乗り、ブローチングの発生の危険性があることや、出会角が大きな場合には、事故発生時より長い波長の波で同調して横揺が大きくなることなどに留意する必要があると考えられる。
- ⑦本船は、改造工事によって事故発生時状態に比べて復原性能は向上し、横揺応答は小さくなっており、大傾斜や転覆に対する安全性は向上したと考えられる。しかしながら、本船は改造工事後の状態でも、事故発生時の状況下での横揺は約 14 度～約 22 度と推定されることなどから、改造工事後の本船にあっても、今回の事故のような大傾斜を防止するためには、大波に遭遇しないように、波が高くなる状況では当該海域を避けて航行することが重要であると考えられる。

(固縛の解析)

- ①転倒モーメントにより固縛に掛かる力はいずれも使用荷重に比べて低く、今回の事故時のように 27 度ものローリング下でも車両が転倒することはない。固縛装置に掛かる力は比較的小さく、最大使用荷重範囲内に十分入っている。
- ②一方、横方向への並行移動により固縛に掛かる力は、車両甲板とタイヤとの摩擦係数として、車両甲板の塗装の試験結果（水湿潤状態）を用いた場合でも、大型トラック 2 台で最大使用荷重を超えている。なお、実際の摩擦係数はこれよりかなり低い値となることや、船体の衝撃的な動きで車両の横滑りが少しでも始まると、摩擦は静摩擦から動摩擦となって急激に小さくなることで、ベルト式固縛機に破断荷重以上の力が加わり破断すると考えられる。
- ③車両に対する固縛用ベルトの望ましい取付方法は、次のとおりである。
 - a)船体側固縛資材の設計及び設置条件の観点から
エレファントフットとクローバーリーフプレートの取り付けは、平面的にはクローバーリーフプレートの切れ込み方向、つまり船首・船尾から左右 45 度方向でなくてはならない。かつ、立面方向では甲板面から 45 度にしなければならない。
 - b)固縛の観点から
固縛は平面的に見てトラックの前後 45 度方向から引っ張り、立面方向では甲板面から 45

度方向に引っ張るのが、横転と横滑り両者を均等に防止する理想的な方向である。

- ④事故再発防止策としては、なるべく固縛の角度を理想的な 45 度に近づけることが肝要であるが、クローバーリーフプレートの間隔が大型トラックの幅に近く、位置は容易に変えられないことから、45 度に近づけるためには、大型トラック側のフック位置をなるべく低くする必要がある。
- ⑤本船の場合、大型トラックは船主所有のものも多く、定期的な利用者が大半ということから、車両側のシャーシー下部といった低い位置にフックをとるための金具を溶接してつけておくことが、安全面でも固縛の効率面でも非常に有効である。また、固縛をたすき掛け（左右でクロス）にとることも有効な方法である。
- ⑥アウトリガーは転倒防止には効果があるが、横滑り防止には効果がない。さらに、アウトリガーを使用することにより、比較的摩擦力のあるタイヤと床面の接触でなく、アウトリガーと床面の鋼-鋼が直接接触することとなり、摩擦力がかぎりなくゼロに近づくという弊害もある。新しく定めた固縛マニュアルでは、アウトリガーを使用しないことにしているが、転倒防止のために使用することは有効であるが、重量が大きい作業車での固縛では横滑り防止をメインに考えて、他のトラック以上の固縛本数をとる必要がある。
- ⑦重量車両ではトラック 1 台につき前方向 45 度方向に左右 2 本ずつ、後ろ方向 45 度方向に左右 2 本ずつ、前後から張るように合計 8 本のカーストッパーでの固縛方法をメーカーは推奨している。固縛は平面的に見てトラックの前後 45 度方向から引っ張り、立面方向では甲板面から 45 度方向に引っ張るのが、横転と横滑り両者を均等に防止する理想的な方向である。ただしこの場合でも、荒天時にはさらにオーバーラッシング等により固縛本数を増やさなければならない。

付録1 等価メタセンタ高さ

(1) 等価メタセンタ高さを使用した横揺計算

船体運動計算に常用される strip 法は微小変位を仮定した線形計算であり、横揺の復原力項 C_{44} は、(A1.1) 式のように表されている。

$$C_{44} = W \cdot \overline{GM} \quad (\text{A1.1})$$

ここで、 W は排水量、 GM はメタセンタ高さである。すなわち、strip 法では、横揺角を ϕ とした場合、横揺復原力（てこ） GZ を (A1.2) 式に示すように評価している。

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \cdot \phi \quad (\text{A1.2})$$

一方、今回の事故では、船橋に設置された傾斜計の読み取りで左舷側に 35 度傾斜したとのことであり、その場合 (A1.2) 式で評価した復原力は実際の値との間に比較的大きな差異 (図 A1.1) が生じることが想定される。そこで、図 A1.1 に示された復原力特性を考慮するため、横揺の復原力項に動復原力に注目した等価メタセンタ高さ (GM_e) を用いた ((A1.3) 式) strip 法計算を行って、「本船」の事故発生時車両移動前の状態 (以下、「事故発生時」と表記) 及び改造工事後の軽荷状態で事故発生時と同じ載荷状態とした場合 (以下、「事故発生時 (改造後)」と表記)、並びに、「従来船」の事故当日の載荷状態での横揺を推定した。

$$C_{44} = W \cdot \overline{GM}_e \quad (\text{A1.3})$$

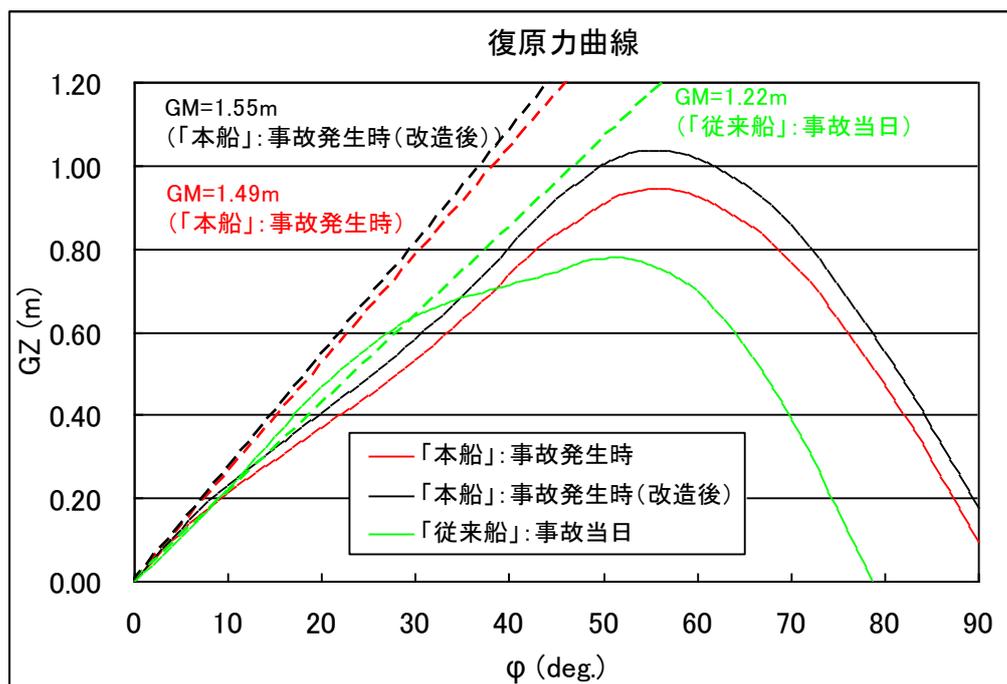


図 A1.1 復原力曲線 (「本船」事故発生時及び「従来船」事故当日)

(2) 等価メタセンタ高さの算定

等価メタセンタ高さ GM_e は、傾斜角 ϕ_e までの実際の動復原力 $Dst(\phi_e)$ ((A1.4) 式) と復原力を (A1.2) 式で評価した場合の動復原力を等値にするメタセンタ高さとして、(A1.5) 式で算定される。

$$D_{st}(\phi_e) = \int_0^{\phi_e} \overline{GZ}(\phi) d\phi \quad (\text{A1.4})$$

$$\overline{GM}_e(\phi_e) = \frac{\int_0^{\phi_e} \overline{GZ}(\phi) d\phi}{\frac{1}{2}\phi_e^2} = \frac{2D_{st}(\phi_e)}{\phi_e^2} \quad (\text{A1.5})$$

また、等価メタセンタ高さに対応する横揺固有周期 (Tr_e : 以下、等価横揺固有周期と言う。) は、(A1.6) 式で求めることができる。

$$\frac{Tr_e}{Tr} = \sqrt{\frac{\overline{GM}}{GM_e}} \quad (\text{A1.6})$$

ここで、 GM は通常の ($\phi_e \rightarrow 0$ とした場合の) メタセンタ高さであり、 Tr はそれに対応する横揺固有周期である。

図 A1.2～図 A1.4 に「本船」の事故発生時及び事故発生時 (改造後) の各状態、並びに、「従来船」の事故当日の載荷状態での等価メタセンタ高さ GM_e 及び等価横揺固有周期 Tr_e を横軸に傾斜角 ϕ_e をとって示す。等価横揺固有周期は 1/10 にした値を示している。

傾斜角 30 度程度までの範囲では、図 A1.1 に示した復原力特性から、「本船」では、傾斜角の増加に伴い、等価メタセンタ高さは減少し、横揺固有周期は長くなる。「従来船」では、逆に、傾斜角 40 度程度までの範囲で、傾斜角の増加に伴い、等価メタセンタ高さは若干増加し、横揺固有周期もそれに対応して短くなっている。なお、改造後の「本船」では事故発生時に比べて、傾斜角の増加に伴う等価メタセンタ高さの減少量は少ない。

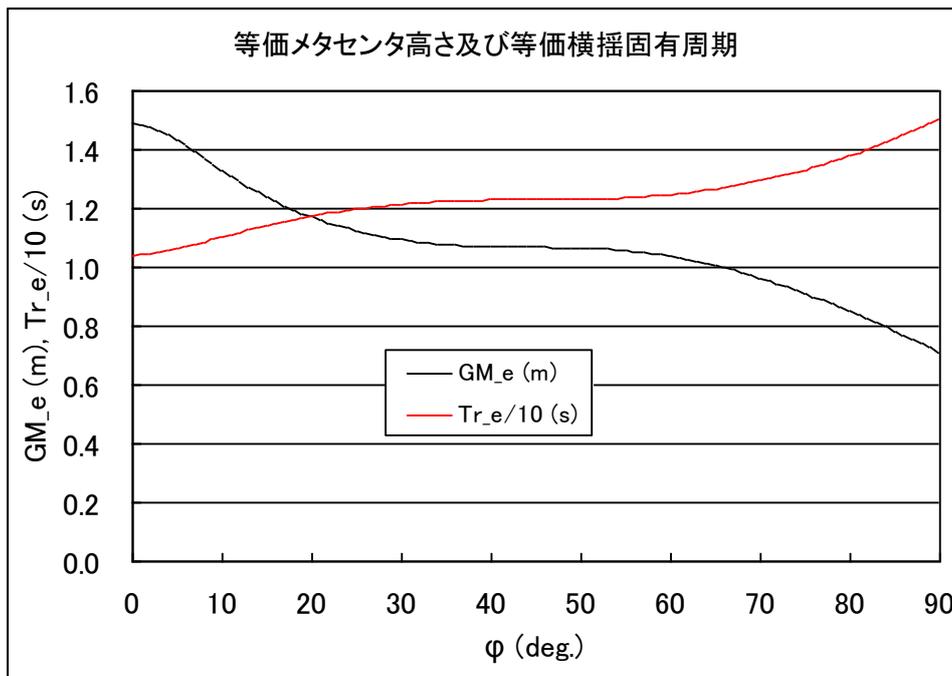


図 A1.2 等価メタセンタ高さ GM_e 及び等価横揺固有周期 Tr_e (「本船」: 事故発生時)

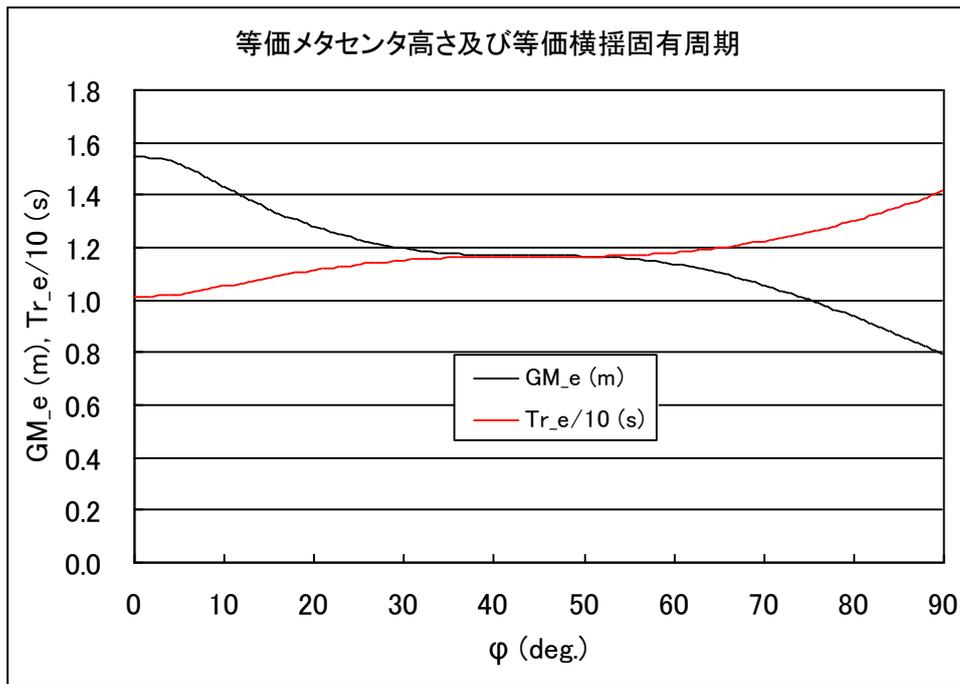


図 A1.3 等価メタセンタ高さ GM_e 及び等価横揺固有周期 Tr_e (「本船」: 事故発生時 (改造後))

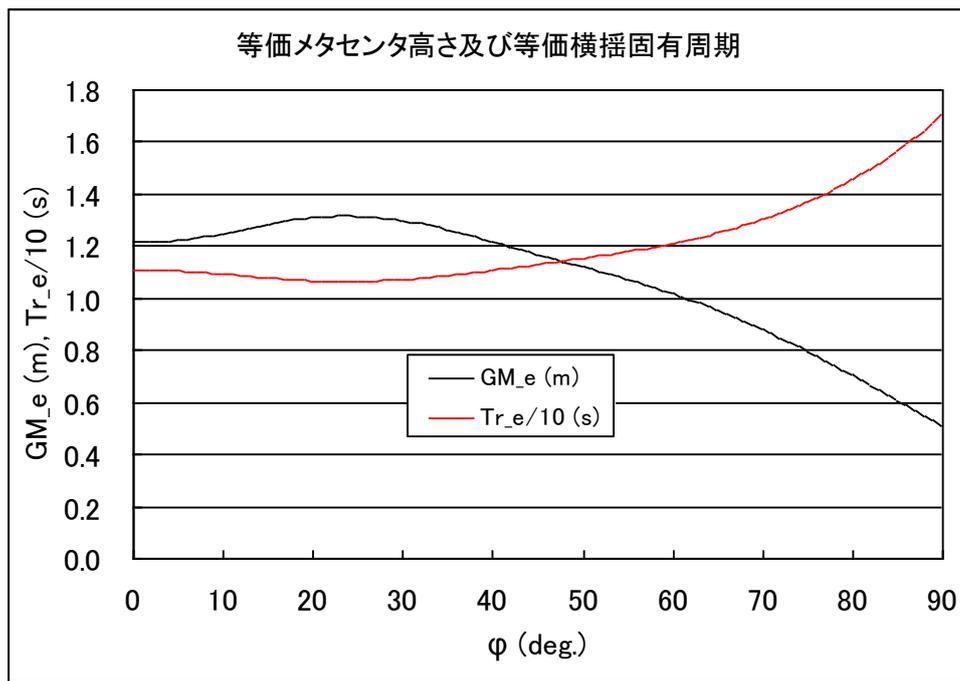


図 A1.4 等価メタセンタ高さ GM_e 及び等価横揺固有周期 Tr_e (「従来船」: 事故当日)

付録2 船橋に設置された傾斜計の指示角

事故時に本船の船橋に設置された傾斜計が 35 度を指していたことについて、横方向の加速度の影響¹⁾によって、どの程度の傾斜を示す可能性があるかを考察する。

最大傾斜位置では円周方向の速度はゼロとなるから、半径方向の遠心力は考慮する必要はない。横傾斜角が微少の場合は平均喫水を回転中心とする回転運動を行うが、傾斜角が大きいので、固縛関係のガイドラインにしたがい、浮心と重心の間を回転中心と仮定する。

出会周期： T (s)

実際の最大横傾斜角： θ_r 度

見かけの最大横傾斜角： θ_a 度

ブリッジの床面高さ (B.L.上)： l_b (m)

ブリッジ内での傾斜計取り付け位置： l_c (m)

重心高さ (事故発生時：B.L.上)： KG (m)

浮心高さ (事故発生時：B.L.上)： KB (m)

回転中心高さ (事故発生時：B.L.上)： KG' (m) = $(KG + KB)/2$

とすると、傾斜計は半径 $r = l_b + l_c - KG'$ の円周上を動くことになる。円周方向の振動中心からの距離を x (m)とすると、 x の最大値 x_{max} は下記のようなになる。

$$x_{max} = 2\pi r \times \theta_r / 360$$

これより x は時間 t (s)の関数として、以下の式のように単振動として定義される。

$$x = x_{max} \sin(2\pi t/T)$$

これを t で2階微分して加速度 $d^2x/dt^2 = \alpha$ を求めると下記のようなになる。

$$\alpha = -x_{max} (2\pi/T)^2 \sin(2\pi t/T)$$

したがって、加速度の最大値 $\alpha_{max} = x_{max} \times (2\pi/T)^2$ となる。

重力加速度 g とすると、下図のような関係となる。

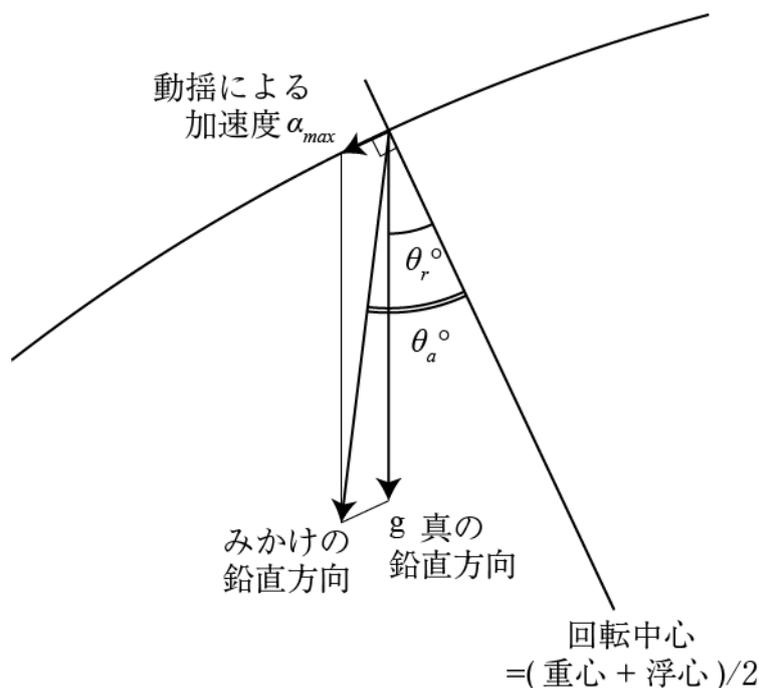


図 A2.1 真の鉛直方向と見かけの鉛直方向

これより見かけの最大横傾斜角 θ_a 度は下記の式により求まる。

$$\theta_a = \theta_r + 180/\pi \times \arctan[\alpha_{max} \cos(\pi\theta_r/180) / \{g + \alpha_{max} \sin(\pi\theta_r/180)\}]$$

本船の

ブリッジの床面高さ (B.L.上) : 16.04(m)

ブリッジ内での傾斜計取り付け位置 : 2.0(m)

であり、事故発生時の状態で

重心高さ (事故発生時 : B.L.上) : 6.39(m)

浮心高さ (事故発生時 : B.L.上) : 2.37(m)

回転中心高さ (事故発生時 : B.L.上) : 4.38(m)

であるので、船速18.6ktで出会角60度で航行していたと想定し、

① 波長 : 50(m) 出会周期 : 12.36(s)

② 波長 : 78(m) 出会周期 : 12.49(s)

で、

横傾斜角 : 25.0度~30.0度

として、計算すると、下記の様な結果が得られる。

表 A2.1 実際の傾斜角と見かけの傾斜角 (波長 50m, 出会周期 : 12.36s)

実際の最大横傾斜角 : θ_r 度	25.0	27.0	28.0	30.0
見かけの最大横傾斜角 : θ_a 度	32.7	35.0	36.2	38.5

表 A2.2 実際の傾斜角と見かけの傾斜角 (波長 78m, 出会周期 : 12.49s)

実際の最大横傾斜角 : θ_r 度	25.0	27.0	28.0	30.0
見かけの最大横傾斜角 : θ_a 度	32.5	34.9	36.1	38.4

したがって、傾斜計で 35 度の傾斜を観測したという事故時の傾斜は、実際には 27 度程度であり、風による定傾斜を考慮に入れれば、25 度程度の傾斜と考えるのが妥当である。

参考文献

- 1) 森田知治 : 船舶復原論—基礎と応用—, pp.148-149、海文堂、昭和 60 年 4 月

付録3 通常運航時の横揺

大傾斜の発生を防止するための方策の検討の参考にするため、「本船」の事故発生時、事故発生時（改造後）の状態及び「従来船」の事故当日の状態について通常運航時に想定される横揺を調査した。

計算方法は、第4章で報告したものと同一であり、計算条件は以下に示すが、波高を2.5mとした以外は、第4章の設定を踏襲した。

(1) 計算条件

(本船)

①運航状況

船速 V : 16.6kn、18.6kn、19.4kn

波との出会角（波向） χ : 40度（斜め右追波）～90度（右横波）

②波浪状況

波長 λ : 50.0m～97.3m（波長船長比 λ/L : 0.64～1.25）

波高 H_w : 2.5m

(従来船)

①運航状況

船速 V : 15.25kn、16.25kn、17.25kn（航海速力）

波との出会角（波向） χ : 40度（斜め右追波）～90度（右横波）

②波浪状況

波長 λ : 50.0 m～97.3m（波長船長比 λ/L : 0.67～1.30）

波高 H_w : 2.5m

(2) 計算結果

船速、波との出会角（波向）、波長を変えて横揺を計算した結果を図A4.1～図A4.3に示す。これらの図は、波高 H_w を5.0mとした計算結果である図4.11～図4.13に対応する。

図A4.1～図A4.3から、通常運航時に想定される波高2.5mでは、「本船」の事故発生時、事故発生時（改造後）の状態及び「従来船」の事故当日の状態で横揺の大きさに、顕著な差異がなく、横揺の最大値は15度未満であることが分かる。

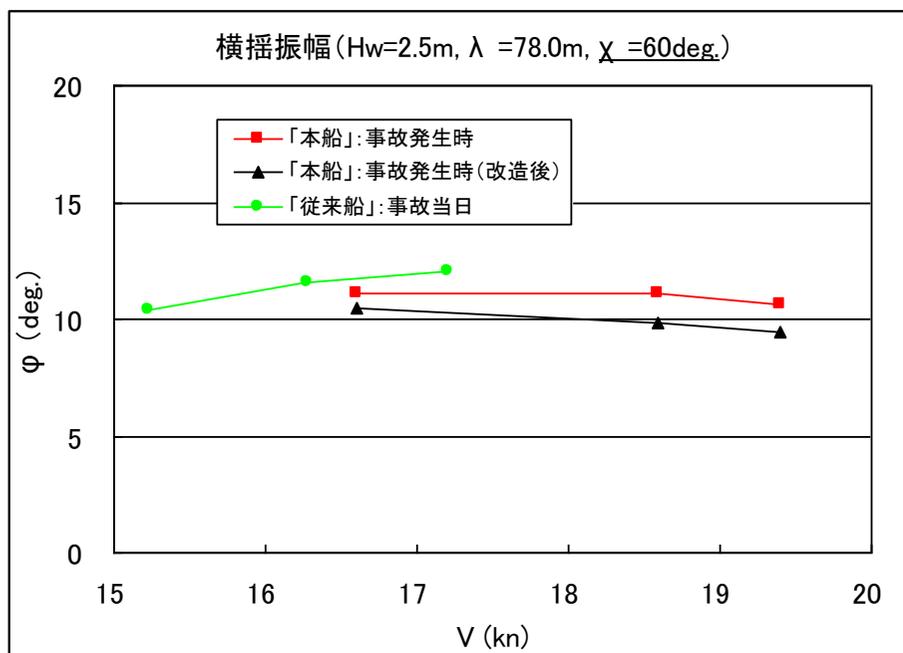
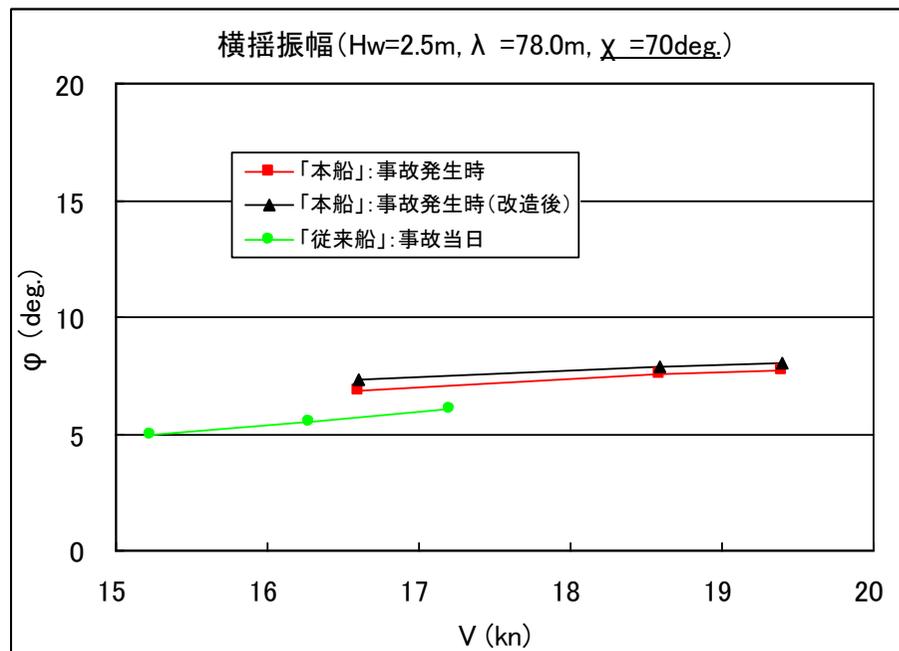
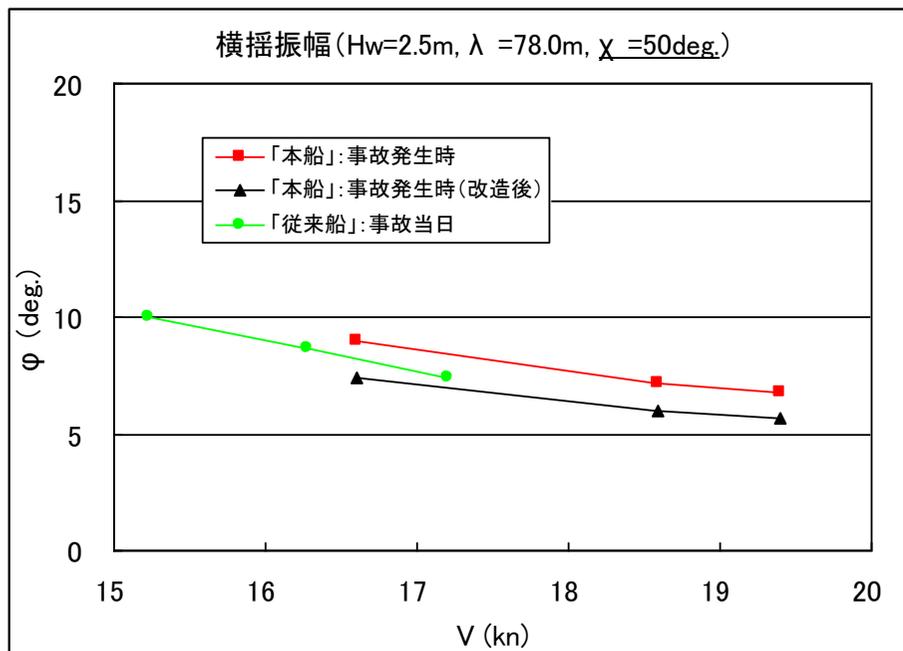


図 A4.1 通常運航時の波浪に対する横揺振幅 (船速 V に対する変化: $\lambda = 50.0\text{m}$, $H_w = 2.5\text{m}$)

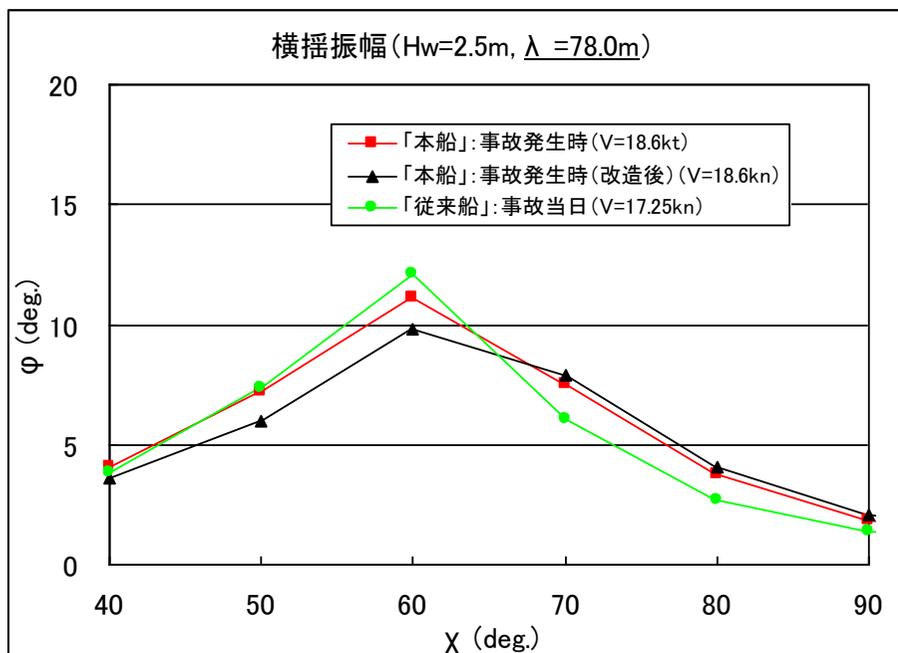
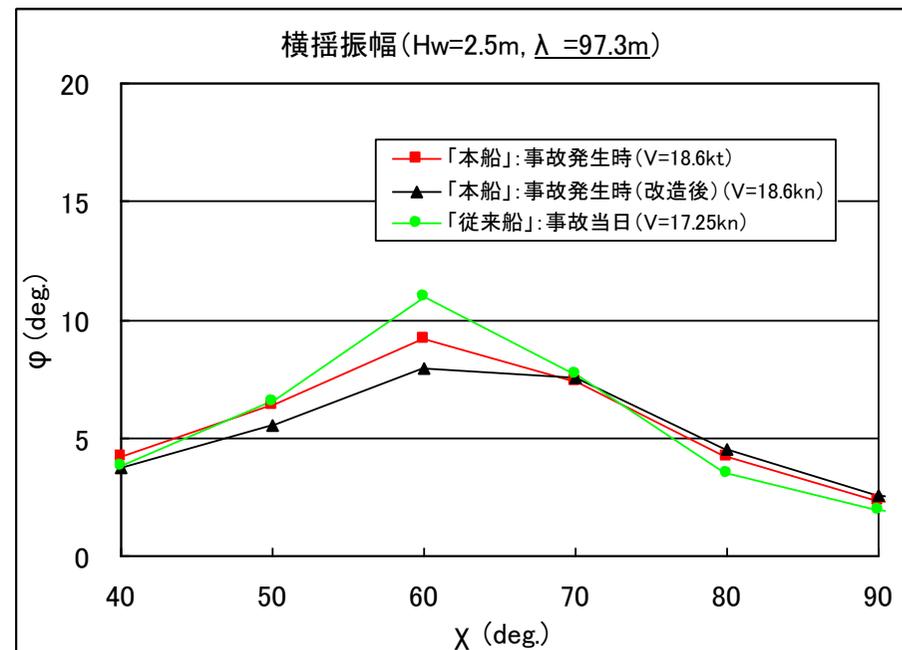
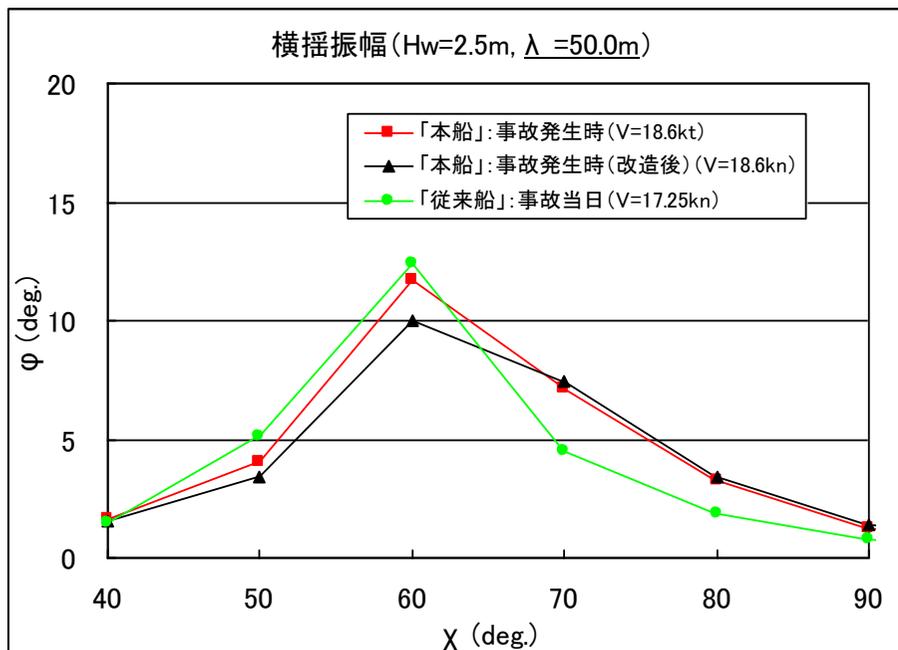


図 A4.2 通常運航時の波浪に対する横揺振幅 (出会角 χ に対する変化 : Hw=2.5m, V=18.6kn (「本船」)、17.25kn (「従来船」))

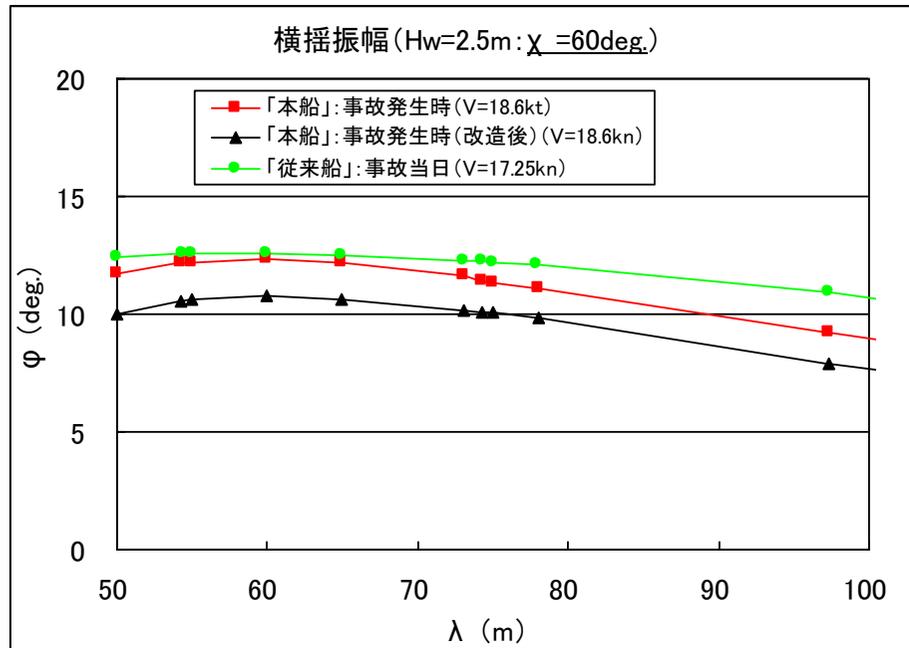
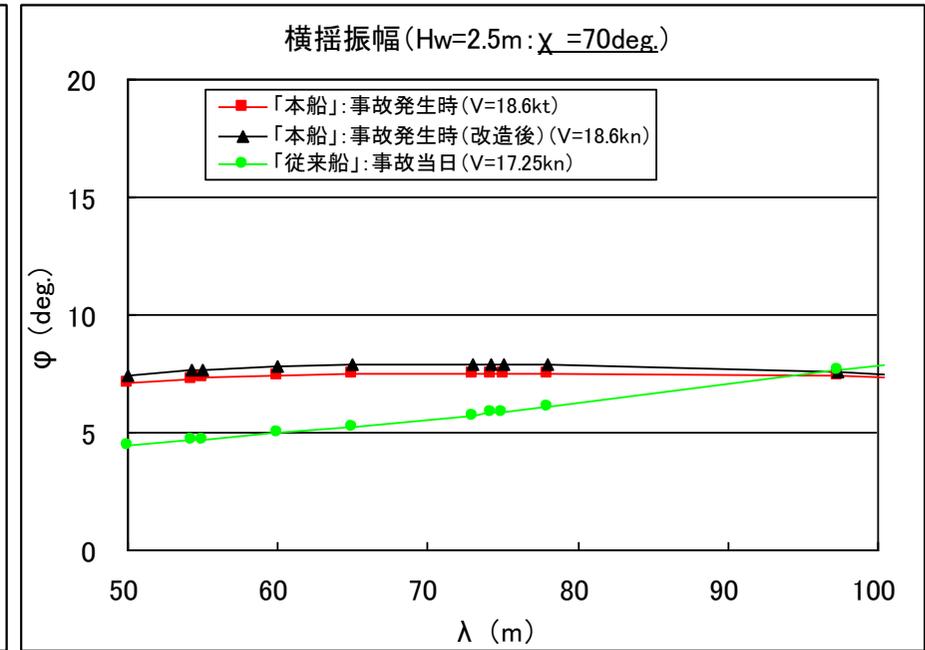
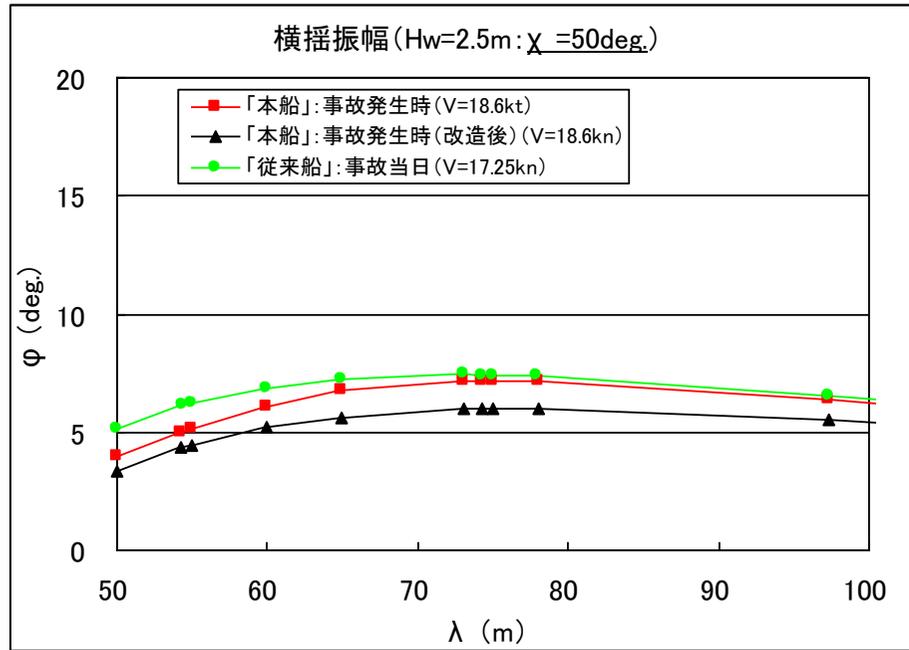


図 A4.3 通常運航時の波浪に対する横揺振幅 (波長 λ に対する変化: Hw=2.5m, V=18.6kn (「本船」)、17.25kn (「従来船」))