

船舶事故調査報告書

船種船名 引船第十八明祐
船舶番号 260-46120兵庫
総トン数 19トン

船種船名 台船SK-106
船舶番号 なし
全 長 65m

事故種類 転覆
発生日時 平成27年3月27日 14時26分ごろ
発生場所 北海道函館市^{おおほな}大鼻岬南東方沖
渡島住吉港東防波堤灯台から真方位188° 2.7海里付近
(概位 北緯41° 42.6' 東経140° 43.0')

平成28年6月30日

運輸安全委員会(海事部会)議決

委員長 中橋和博
委員 庄司邦昭(部会長)
委員 小須田 敏
委員 石川敏行
委員 根本美奈

要 旨

<概要>

引船第十八明祐は、船長ほか2人が乗り組み、船長指導員1人を乗せ、台船SK-106をえい航し、北海道函館市^{おおほな}大鼻岬南南東方沖を南～南南西進中、平成27年3月27日14時26分ごろ転覆した。

第十八明祐は、船長及び船長指導員が死亡するとともに、甲板員1人が行方不明となり、別の甲板員1人が負傷し、船体は全損となった。

<原因>

本事故は、第十八明祐が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下、函館港を出港し、‘長さ約200m、直径約55mmのえい航用ロープを全て伸出し、台船SK-106を含めた全長約300mの引船列’（A船引船列）を構成して石巻港に向けて航行を開始し、大鼻岬南南東方1～3海里付近を南～南南西進中、第十八明祐が、波浪、台船の振れ回りが発生した際の索張力及び風圧を受け、横引き状態となり、左舷傾斜角が、復原力の最大値が生じる角度より大きくなり、復原力が減少し、ブルワークが海中に没したため、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続く波を受け、左舷側へ転覆したことにより発生した可能性があると考えられる。

A船引船列が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下で出港したことは、第十八明祐の運航者であるパールライン株式会社の責任者が、19トン型の引船兼押船に出港中止基準を口頭で指示していたものの、パールライン株式会社の出港中止基準の周知及び乗組員の同基準に対する認識が不十分であったことが関与した可能性があると考えられる。

1 船舶事故調査の経過

1.1 船舶事故の概要

引船第十八明祐^{めいゆう}は、船長ほか2人が乗り組み、船長指導員1人を乗せ、台船SK-106をえい航し、北海道函館市大鼻岬^{おおほな}南南東方沖を南～南南西進中、平成27年3月27日14時26分ごろ転覆した。

第十八明祐は、船長及び船長指導員が死亡するとともに、甲板員1人が行方不明となり、別の甲板員1人が負傷し、船体は全損となった。

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27年3月27日、本事故の調査を担当する主管調査官（函館事務所）ほか1人の地方事故調査官を指名した。

なお、後日、主管調査官を船舶事故調査官に、担当調査官を船舶事故調査官に交替した。

1.2.2 調査の実施時期

平成27年3月27日、28日、30日、4月3日、4日、7日 現場調査

平成27年4月8日、11日、24日、5月1日、7日、11日、20日、22日、6月6日、7月17日、21日、29日、8月5日、20日、9月4日、18日、平成28年4月6日、5月2日 口述聴取

平成27年4月14日 口述聴取及び回答書受領

平成27年4月30日 現場調査及び口述聴取

平成27年5月18日、6月12日 回答書受領

1.2.3 調査の委託

本事故の調査に当たり、国立研究開発法人海上技術安全研究所（現 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所）に対し、第十八明祐の復原性、並びに風浪中で台船SK-106をえい航する際に作用する風浪及びえい航索の外力による第十八明祐の横傾斜その他の挙動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 事故発生までの経過

本事故が発生するまでの経過は、第十八明祐（以下「A船」という。）の船内から救出された甲板員（以下「甲板員A₁」という。）、大鼻岬北西方1.8海里（M）付近でA船を視認した貨物船（以下「B船」という。）の船長（以下「船長B」という。）、本事故現場西方でA船を視認したフェリー（以下「C船」という。）の一等航海士（以下「航海士C」という。）、A船の運航者であるパールライン株式会社（以下「A社」という。）の責任者（以下「A社責任者」という。）、A社の運航担当者（以下「A社担当者」という。）及び積荷の船体ブロック^{*1}を製造した業者（以下「ブロック製造業者」という。）の担当者の口述によれば、次のとおりであった。

(1) A船

A船は、船長（以下「船長A」という。）及び甲板員A₁ほか甲板員1人（以下「甲板員A₂」という。）が乗り組み、船長Aにえい航の操船を指導する船長指導員1人（A社の乗組員、以下「指導員A」という。）を乗せ、平成27年3月27日朝、北海道函館市函館港のブロック製造業者の岸壁において、台船SK-106（以下「台船A」という。）に船体ブロック11個（重量計約140t）の積荷役を行った。

熊本県天草市のA社にいたA社責任者は、10時00分ごろ、指導員Aに電話をかけて荷役状況を確認した際、積荷の固縛^{こぼく}が終わり次第A船が台船Aをえい航して宮城県石巻市石巻港に向けて出港することを聞いた。

A社責任者は、12時30分ごろ、指導員Aから出港したとの連絡を受け、天候は大丈夫かと尋ねたところ、南西の風7～8m/s程度であり、大丈夫だろうとの回答を受けた。

A船は、函館港を出港した後、函館港の西防波堤沖で停船し、長さ約200m、直径約55mmのえい航用ロープ（以下「主ロープ」という。）を全て伸出し、台船Aを含めた全長約300mの引船列（以下「A船引船列」という。）を構成し、南進を開始した。

甲板員A₁は、甲板員A₂が12時～16時の当直のために操舵室に上がるのを見た後、休憩するため、下甲板の船首側にある船員室に行き、左舷側

^{*1} 「船体ブロック」とは、船体全体を適当な大きさに区分したブロックをいう。造船所における船体の組立ては、あらかじめ工場で組み立てた船体ブロックを船台まで運んで溶接で接合して行う。

の自室で寝台に横になった。

甲板員A₁は、A船のピッチング*²が大きく、また、ローリング*³も次第に大きくなったので、外の状況を見ようと‘上甲板上の右舷側にある居住区出入口’（以下「居住区出入口」という。）から船外通路に出て船首側の一段高くなったところに上ると、右舷船首に波しぶきがかかっており、船尾方を振り向くと、主ロープが緊張して波面から出たり、緩んで海に浸^つかったりし、台船Aの前部甲板が波に洗われているのを見た。

甲板員A₁は、居住区出入口から船内に入って風雨密戸を閉め、自室に戻って横になっていたところ、A船が左右どちらかに大きく回頭したように感じた。

A社責任者は、14時21分ごろ、社用携帯電話からの着信を受け、「もしもし」と指導員Aの声が聞こえたので、「もしもし」と答えたところ、「ザーッ」という音がして通話が途切れ、不審に思って折り返し電話をかけたが、呼出し音も鳴らず、通じなかった。

A船は、船体が横に傾斜してから5分もかからずに転覆した。

(2) B船

B船は、大鼻岬北西方1.8M付近を北進中、船長Bが、右舷前方に船首を時々南西方に振りながら約2～3ノット(kn)の速力(対地速力、以下同じ。)で南進しているA船を認め、13時43分ごろA船引船列から約0.5M離して航行した。

(3) C船

C船は、青森県青森市青森港に向けて大鼻岬西南西方を針路約195°(真針路、以下同じ。)として航行中、航海士Cが、14時18分ごろ、船首から波をかぶり、波に見え隠れしながら台船Aをえい航し、大鼻岬南南東方1～3M付近を約4～5knの速力で南～南南西進しているA船を視認した。

航海士Cは、C船が約200°に変針した14時26分ごろ、C船の左舷正横方3M付近を航行するA船引船列を視認した。

なお、民間情報会社が受信したC船の船舶自動識別装置(AIS)*⁴の情報記録によれば、C船の14時26分ごろの船位は、北緯41°43.5′東経140°39.1′付近であった。

*² 「ピッチング」とは、船体の重心を通る水平な船体横方向軸回りの回転運動(縦揺れ)をいう。

*³ 「ローリング」とは、船体の重心を通る水平な船首尾線方向軸回りの回転運動(横揺れ)をいう。

*⁴ 「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、針路等に関する情報を自動的に送受信し、船舶相互間、陸上局の航行援助施設等との間で交換できる装置をいう。

本事故の発生日時は、平成27年3月27日14時26分ごろであり、発生場所は、渡島住吉港東防波堤灯台から真方位188° 2.7M付近であった。

(付図1 事故発生経過概略図 参照)

2.1.2 事故発生後の捜索救助の経過

甲板員A₁及びA社責任者の口述並びに海上保安庁の情報によれば、次のとおりであった。

(1) A船引船列発見までの経過

A社責任者は、指導員Aからの電話が途切れた後5分以内にA船の社用携帯電話、船舶電話、指導員A及び乗組員3人の個人の携帯電話にかけたものの、いずれもつながらなかったため、宮城県塩竈市のA社の東日本支店及び他の所属船にもA船と連絡をとるよう指示し、約5～10分後、応答がないとの回答を受けた。

甲板員A₁は、A船が転覆した後、天地逆となった船員室の天井を歩いて居住区出入口まで行き、風雨密戸を開けようとしたが開けなかったため、自室に戻ろうとして自室の反対側の船員室に入った。

甲板員A₁は、海水が徐々に船員室へ浸入して来たため、引き出しが飛び出してできた寝台の下の隙間の空気だまりに入った。

A社責任者は、3月27日14時52分ごろ、A船と連絡が取れない旨の118番通報をし、これを受けた海上保安庁がA船に連絡したが、つながらなかった。

海上保安庁は、住民から15時12分ごろ函館市住吉漁港東方1.5km付近に転覆した船を見たとの通報を受け、15時15分ごろ巡視船艇及び航空機による捜索救助活動を開始し、15時21分ごろ住吉漁港東方で転覆しているA船及び漂流している台船Aを発見した。

(2) 甲板員A₁が救助されるまでの経緯

甲板員A₁は、海水で体が濡れるようになったため、衣服を脱ぎ、絞ってはまた着ることを、2～3回繰り返した。

甲板員A₁は、船底を叩く音がしたため、海上保安庁の救助が来たと思い、浮いていた寝台の引き出しで船体を叩いた。

甲板員A₁は、横倒し状態になったA船船内を潜水捜索中の海上保安庁特殊救難隊隊員により28日05時40分ごろ発見及び救出され、ヘリコプターにより函館空港に移送後、06時15分ごろ救急車で病院に搬送され、約1か月間入院した。

(3) 乗組員の捜索及び救助の経過

指導員Aは、27日16時32分ごろ大鼻岬東方約2.1Mで救命胴衣を着用せずに漂流しているところを発見され、海上保安庁のヘリコプターで吊り上げ救助され、救急車により病院に搬送されたものの、19時02分ごろ死亡が確認された。

船長Aは、28日05時20分ごろ、函館市^{かまや}釜谷町の海岸に救命胴衣を着用せずに漂着しているところを発見されたものの、死亡が確認された。

甲板員A₂は、海上保安庁の巡視船艇等により、捜索が実施されたが、行方不明となった。

(4) 台船A及びA船

台船Aは、28日03時00分ごろつながれていた主ロープがA船のえい航フックから外れ、住吉漁港北東側の海岸に漂着し、30日にA社が手配したサルベージ業者により、引き出された後、函館港中央ふ頭の岸壁にえい航された。

A船は、住吉漁港北北東方1.0M付近において左舷側を下に横倒し状態で水深約6mの海底に沈没していたところを、サルベージ業者により引き揚げられ、4月4日に函館港北ふ頭の岸壁に陸揚げされた。(写真2.1-1～写真2.1-3参照)



写真2.1-1 漂流中のA船及び台船A (海上保安庁提供)

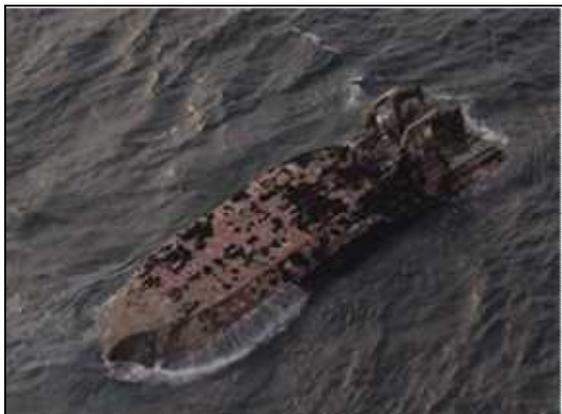


写真 2. 1 - 2 転覆したA船
(海上保安庁提供)



写真 2. 1 - 3 漂着した台船A

2. 2 人の死亡、行方不明及び負傷に関する情報

A社担当者の口述、死体検案書及び診断書によれば、次のとおりであった。

- (1) 船長A及び指導員Aは死亡し、死因はいずれも溺水であった。
- (2) 甲板員A₂は行方不明となった。なお、甲板員A₂は、後日、死亡認定により除籍された。
- (3) 甲板員A₁は偶発性低体温症*5等で、約1か月間入院した。

2. 3 船舶の損傷等に関する情報

A船は、操舵室上に設置されたマスト、レーダーアンテナ、操舵室上部等に破損、左舷船体外板に塗装の剝離、主機関の濡損等を生じた。(写真2. 3 - 1、写真2. 3 - 2参照)

A社が手配したサルベージ会社によれば、A船は、全損となり、後日、解体処理された。

A社担当者の口述によれば、台船A、積荷、主ロープ等に損傷はなかった。

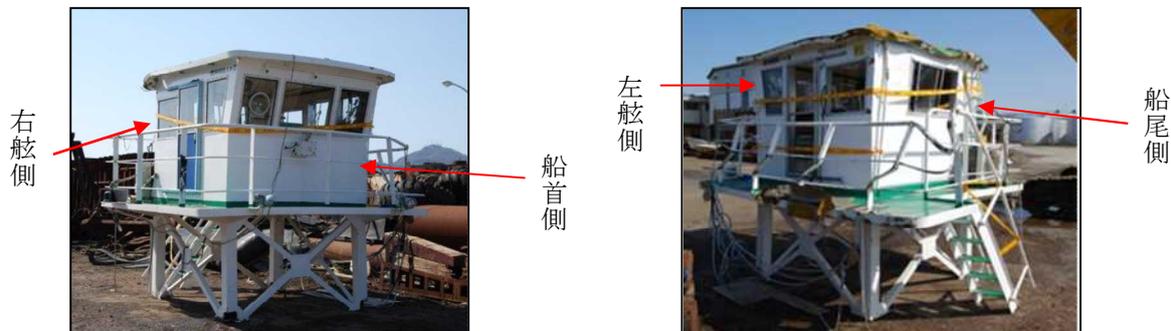


写真 2. 3 - 1 A船操舵室

*5 「偶発性低体温症」とは、事故や不慮の事態に起因する低体温を意図的に低体温とした場合と区別するために、偶発性低体温症と呼び、深部体温（直腸温、膀胱温、食道温、肺動脈温等）が35℃以下に低下した状態をいう。



(右舷側)



(左舷側)



(船尾側)

写真 2.3-2 A船船体

2.4 乗組員等に関する情報

(1) 性別、年齢、操縦免許証

① 船長A 男性 39歳

二級小型船舶操縦士

免許登録日 平成26年5月2日

免許証交付日 平成26年5月2日

(平成31年5月1日まで有効)

② 指導員A 男性 43歳

一級小型船舶操縦士・特定

免許登録日 平成23年10月14日

免許証交付日 平成23年10月14日

(平成28年10月13日まで有効)

③ 甲板員A₁ 男性 64歳

一級小型船舶操縦士・特殊小型船舶操縦士・特定

免許登録日 平成11年7月1日

免許証交付日 平成27年2月23日

(平成32年2月22日まで有効)

④ 甲板員A₂ 男性 44歳

二級小型船舶操縦士

免許登録日 平成26年10月9日

免許証交付日 平成26年10月9日

(平成31年10月8日まで有効)

⑤ A社責任者 男性 70歳

一級小型船舶操縦士・特定

免許登録日 昭和50年8月22日

免許証交付日 平成25年3月19日

(平成30年6月29日まで有効)

(2) 主な乗船履歴等

甲板員A₁、A社責任者及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

① 船長A

いか釣り漁船への乗船経験があり、平成24年ごろA社に入り、甲板員として乗り組んでいた。A船には、平成25年ごろから甲板員として、平成26年ごろから船長として乗り組んでおり、19トン型の引船兼押船（以下「小型引船」という。）で台船Aと同じ全長65.00mの台船（以下「大型台船」という。）をえい航した経験があった。

本事故当時、健康状態は良好に見えた。

② 指導員A

平成7年ごろから砂利採取運搬船に乗り組み、平成15年ごろA社に入り、指導員として乗船し、新人の船員に実務指導を行っており、また、小型引船による大型台船のえい航も含め、えい航の経験は豊富で、A船には、平成27年3月18日に船長Aの指導員として初めて乗船した。

本事故当時、健康状態は良好に見えた。

③ 甲板員A₁

学校を卒業後、大型トロール船の機関員として60歳まで乗り組み、その後、陸上の仕事を経て平成24年ごろA社に入り、A船に甲板員として何度も乗船し、大型台船のえい航を3～4回した経験があり、A船には、平成27年3月ごろから甲板員として乗船していた。

本事故当時、健康状態は良好であった。

④ 甲板員A₂

平成24年ごろA社に入り、A船には、平成27年3月ごろから甲板員として乗船していた。

本事故当時、健康状態は良好に見えた。

⑤ A社責任者

昭和43年に親族が所有する内航貨物船に船長として乗り組み、約15年間小型引船等でのえい航に従事した経験があった。平成19年9月の安全管理規程の策定時にA社の安全統括管理者兼運航管理者に就任した。

2.5 船舶等に関する情報

2.5.1 船舶の主要目等

(1) A船

船舶番号	260-46120兵庫
船籍港	兵庫県明石市

船舶所有者	むねた 宗田造船株式会社（以下「B社」という。）
運航者	A社
総トン数	19トン
L×B×D	16.00m×5.40m×1.95m
船質	鋼
航行区域	沿海区域（限定）
最大搭載人員	船員3人、その他の乗船者3人計6人
用途	引船兼押船兼作業船
機関	ディーゼル機関2基
出力	625kW/基 合計1,250kW
推進器	固定ピッチプロペラ2個
進水年月	平成20年11月

(図2.5-1 A船 参照)

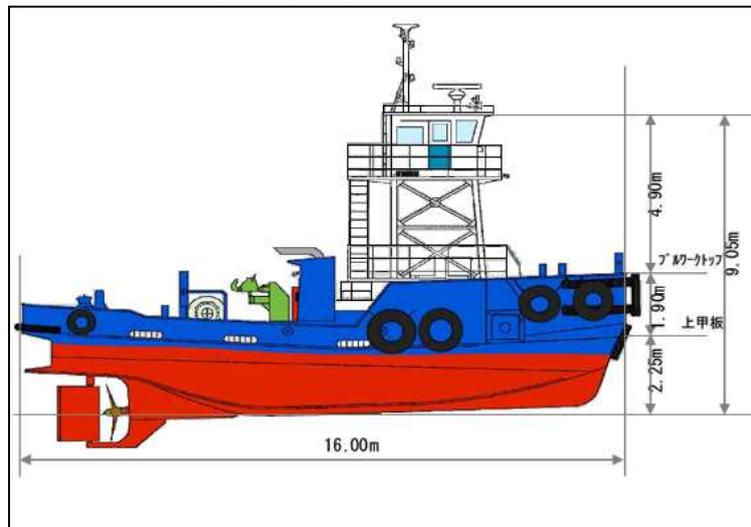


図2.5-1 A船

(2) 台船A

船舶所有者	B社
運航者	A社
L×B×D	65.00m×23.00m×3.50m
船質	鋼

(図2.5-2 台船A 参照)

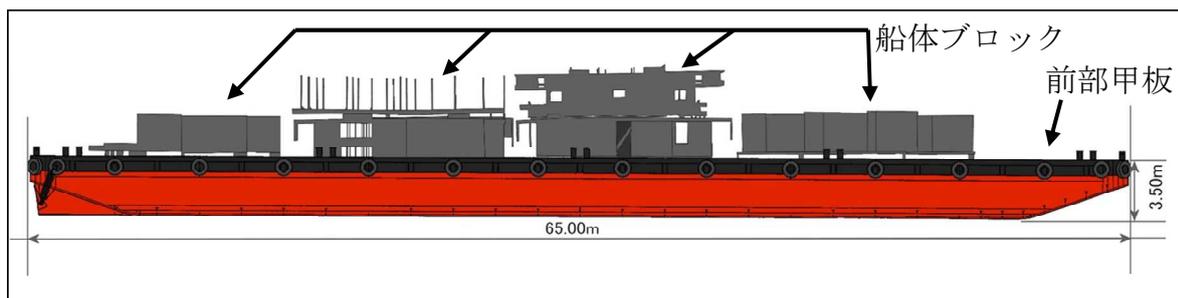


図 2.5-2 台船A

(3) A船引船列

甲板員A₁及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

A船引船列は、A船及び台船Aで構成され、両端がアイスプライス*⁶で輪状（以下「アイ」という。）となった主ロープの一端をA船のえい航フックに掛け、他端を長さ約30mのえい航用取付けロープ（以下「ブライドル」という。）2本のそれぞれの一端と連結し、ブライドルの他端を台船Aの船首部各舷にあるボラード*⁷にそれぞれ掛けていた。（図2.5-3参照）

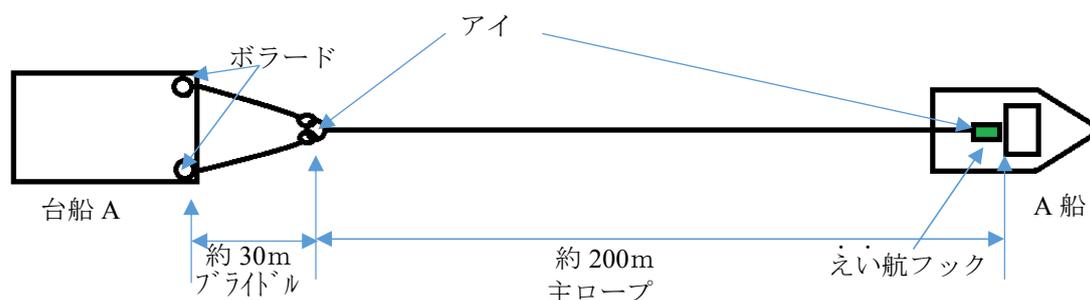


図 2.5-3 A船引船列状況図

主ロープは、平成27年1月に、直径55mm、長さ200mのロープ（12本打ち、破断荷重508kN）に新替えされた。

(4) 喫水の状況

① A船

本事故前の函館港出港時に撮影されたA船の写真によれば、本事故前の出港時、船首約1.25m、船尾約2.90mであった。

*⁶ 「アイスプライス」とは、ロープの末端加工の一種で、ロープ端をストランド（細い繊維をより合わせたもの（ヤーン）を更により合わせたもの）にばらし、ロープ本体に差し込んで継ぎ合わせ、輪状に加工したものをいう。アイはロープの輪、スプライスはより継ぎを意味する。

*⁷ 「ボラード」とは、船に係留させるときに係船索を巻き付けて係止させる甲板上に設置した柱をいう。一般に2本一組に作られたものをボラードといい、1本のをビットという。

② 台船A

本事故後の3月30日、全ての貨物を積んだ状態で函館港中央ふ頭に着岸した際、船首尾共約0.50mであった。

(5) 同型船の復原性に関する情報

A船の同型船における復原性資料によれば、同型船の復原性は、小型船舶安全規則（昭和49年運輸省令第36号）で規定する沿海区域を航行するために必要な復原性能を有していた。

2.5.2 構造、設備等

(1) A船

① 操舵室

操舵室は、甲板室天板上に組まれた^{やぐら}櫓の上に設置され、周囲の見通しは良好であった。

操舵室には、船首側に操舵スタンド、レーダー、国際VHF無線電話装置*8等が設置され、船尾側に寝台等が備えられており、EPIRB*9の搭載義務はなく、設置されていなかった。（写真2.5-1参照）



操舵スタンド

機関操縦盤

機関操縦レバー

写真2.5-1 A船操舵室内

② 上甲板等

上甲板上には、船首側から順に、休憩室、甲板室、機関室囲壁、えい航フック（えい航力15t型）等が、下甲板には、船首側から順に、清水タンク、船員室、機関室、燃料タンク、倉庫等がそれぞれ配置されていた。

*8 「国際VHF無線電話装置」とは、船舶相互間の通信や港務通信、船舶の通航に関する通信のほか、公衆電話や国際公衆電話と接続しても使用することができる無線電話通信装置をいう。なお、16チャンネルは「遭難」、「安全」及び「呼出し」用で常時聴取が義務付けられており、使用目的により使用チャンネルの枠が決められている。

*9 「EPIRB（極軌道衛星利用非常用位置指示無線標識装置）」とは、人工衛星に向けて遭難信号を発するブイ方式の無線装置であり、船舶が沈没したときに水圧センサーが働いて自動的に浮揚し、遭難信号を発信する自動式のもの及び乗組員が手動で発信スイッチをONにする持ち運び式のものがある。また、小型船舶はEPIRBを1台備えることとなっているが、小型船舶安全規則第58条第3項により、沿岸小型船舶等に備えることを要しない。

上甲板は、高さが船首側約1.90m、中央部付近約0.65m、船尾側約0.80mのブルワーク^{*10}で囲われており、各舷の中央部から船尾側までのブルワーク下部に、放水口が3か所設けられていた。

甲板室には、居住区出入口に風雨密戸が、船尾側の機関室出入口に扉がそれぞれ1個設けられ、船員室は、甲板室の船首側の階段を降りた下甲板の各舷側に配置されていた。

船尾側上甲板には、中央にえい航フック1個、その船尾側にリール3個が設けられていた。(写真2.5-2参照)

(付図2 A船船体概略図 参照)



写真2.5-2 A船後部甲板（船首側より撮影）

③ 救命設備

甲板員A₁及びA社責任者の口述によれば、救命浮器及び救命浮環各1個が甲板室天板上方の各舷の後部に、救命胴衣が操舵室及び甲板室にそれぞれ3個ずつ置かれ、船長A、甲板員A₂及び指導員Aは、ふだん、操舵室で当直中に救命胴衣を着用していなかった。

(2) 台船A

台船Aは、長方形の平坦な甲板を有する非自航式の鋼製台船であり、錨が1個備えられていた。

(3) その他

甲板員A₁及びA社責任者の口述によれば、本事故当時、A船の船体、機関及び機器類に不具合又は故障はなく、台船Aの船体に不具合はなかった。

^{*10} 「ブルワーク」とは、暴露甲板の舷側に沿って設けられた波よけの側壁をいう。

2.5.3 燃料等の積載状態

甲板員A₁及びA社担当者の口述によれば、A船の清水及び燃料タンクの満載時及び函館港出港時の状況は次のとおりであった。

清水タンク積載量

清水タンク	満載時 (kℓ)	出港時の容量 (kℓ)
船首部	4.0	3.0
機関室前部右舷側	1.5	1.5
機関室前部左舷側	1.5	1.5
合 計	7.0	6.0

燃料タンク積載量

燃料タンク	満載時 (kℓ)	出港時の容量 (kℓ)
機関室後部右舷側	3.0	3.0
機関室後部左舷側	3.0	3.0
船尾部右舷側	5.0	2.5
船尾部左舷側	5.0	2.5
合 計	16.0	11.0

2.6 気象及び海象等に関する情報

2.6.1 観測値

海上保安庁の沿岸域情報提供システム（以下「MICS」という。）によれば、本事故現場の南東方約22kmに位置する大間埼灯台における観測値は、次のとおりであった。

時 刻	風 向	風 速
09時55分	西	21m/s
10時25分	西南西	20m/s
10時55分	西南西	20m/s
11時25分	西	21m/s
11時55分	西南西	21m/s
12時25分	西南西	21m/s
13時55分	西南西	20m/s
14時25分	西南西	23m/s
14時55分	西	22m/s

本事故現場の北方約12kmにある函館地方气象台（函館市美原三丁目四番四号）の観測によれば、天気は晴れ、正午から15時の間の風向は西南西から南西、風速

は平均 6.7 m/s で、最大瞬間風速は 12 時 10 分に計測した 13.9 m/s であった。

2.6.2 B 船及び C 船による観測

(1) B 船による観測

船長 B の口述によれば、本事故現場付近の大鼻岬南方約 3 M における観測値は次のとおりであった。

13 時 30 分 天気 曇り、風向 南西、風速 約 15～16 m/s、
波向 南西、波高 約 3.0～3.5 m

(2) C 船による観測

航海士 C の口述によれば、本事故現場付近の大鼻岬西方約 3 M における観測値は次のとおりであった。

14 時 26 分 天気 曇り、風向 南西、風速 約 17 m/s、
視程 約 20 km、波向 南西、波高 約 3.0～4.0 m

2.6.3 気象注意報及び警報

函館地方気象台発表の函館市及び津軽海峡における気象注意報及び警報は、次のとおりであった。

3月26日	11時35分発表	津軽海峡 海上強風警報 ^{*11} (以後27日も継続中)
	12時49分発表 17時31分発表	函館市 強風注意報 ^{*12} 強風及び波浪注意報 ^{*13} (以後27日も継続中)

2.6.4 海水温

気象庁発表の日別海面海水温によれば、平成27年3月27日の本事故現場付近の海面海水温は約 10℃ であった。

^{*11} 「海上強風警報」とは、海上で最大風速が 34 kn 以上 48 kn 未満（風力階級は 8 又は 9）の状態に既になっているか、又は 24 時間以内にその状態になると予想される場合に発表する警報をいう。（出典：気象庁の海上警報・予報の解説：気象庁ホームページ中、知識・解説に掲載）

^{*12} 「強風注意報」とは、渡島地方では、平均風速が陸上で 13 m/s、津軽海峡で 18 m/s に達すると予想される場合に発表される注意報のことをいう。（出典：函館地方気象台の警報・注意報発表基準一覧表：気象庁ホームページ中、知識・解説に掲載）

^{*13} 「波浪注意報」とは、渡島地方では、津軽海峡で有義波高 3.0 m に達すると予想される場合に発表される注意報のことをいう。（出典：函館地方気象台の警報・注意報発表基準一覧表：気象庁ホームページ中、知識・解説に掲載）

2.6.5 海水温と生存可能な時間に関する情報

文献^{*14}によれば、通常衣服着用時、海水温度10℃での水中における生存可能時間は、個人差はあるが、6時間以下である。

2.7 A船の操船に関する情報

甲板員A₁の口述によれば、次のとおりであった。

A船で台船をえい航するときは、ふだん、自動操舵で、レーダーを見て台船とA船との位置関係に注意しながら陸岸から約2.5M沖を航行していた。また、台船えい航時の速力は、主機を回転数毎分（rpm）1,200～1,250とし、約4～6knであった。

2.8 運航状況及び安全管理等

2.8.1 運航状況

A社責任者及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

- (1) A社は、平成16年ごろから、総トン数約100～150トンの引船3隻で内航運送を行っていたが、東日本大震災以後の復興需要に対応するため、塩竈市に東日本支店を置いて運航管理等を行い、平成23年3月にA船を含む小型引船4隻を借り入れて計7隻の船舶により、台船等を押航又はえい航する形態で内航運送を行っていた。
- (2) A社は、主に船体ブロック、復興工事用資材等を輸送し、時々、これらの貨物を小型引船で大型台船をえい航しており、荷役地は仙台塩釜港、石巻港、函館港、京浜港等であった。

2.8.2 安全管理等

A社責任者及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

(1) 定時連絡等

A社及び所属船舶は、運航中、1日5回程度（08時、10時、出入港時等）電話による連絡を取り合うこととし、また、気象及び海象が悪化する場合、引船等が避難する場合等には、その都度、船長からA社責任者に連絡していた。

(2) 出港基準等

A社は、A社責任者が口頭で、港内及び航行中予想される気象及び海象

^{*14} 文献：「訓練手引書 SOLAS TRAINING MANUAL」（国土交通省海事局運航労務課監修、平成27年8月船員災害防止協会発行第27版）

が、風速10m/s、波高1.5m以上の場合は出港を中止するよう指示しており、荒天避難、出港及び運航中止の判断については、各船長とA社責任者とが協議し、最終的に各船長が行っていた。

A社所有の小型引船船長（以下「僚船船長」という。）の口述によれば、大型台船をえい航する際は、えい航可能と判断する上限を風速約15m/s又は波高約2.0mとしていた。

(3) 研修及び教育等

A社は、月に1回、仙台塩釜港又は石巻港で安全会議を開き、A社所属船舶の船長を集めて土木工事、押航又はえい航、気象等に関する安全研修を行っていた。

また、A社責任者が2か月に1回程度訪船し、船内の整理整頓^{とん}、気象及び海象の入手等について乗組員を指導していた。

2.8.3 気象、海象情報等の入手状況

A社責任者、甲板員A₁及び僚船船長の口述によれば、次のとおりであった。

- (1) 船長Aは、ふだん、1時間ごとに携帯電話で気象及び海象情報等（以下「気象情報等」という。）を入手していた。
- (2) 指導員Aは、ふだん、携帯電話等で気象情報等を入手していた。
- (3) A社責任者は、ふだん、携帯電話、テレビ等で気象情報等を入手しており、所属船の航行海域が荒天又は荒天が予想される状況のときは、出港前に各船の船長に現地の気象及び海象情報を聞いて出港の可否を協議していた。
- (4) A社責任者は、27日の朝、06時のテレビで気象情報等を見ていたが、本事故当時、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表されていたことを知らなかった。

2.8.4 内航海運業法

内航海運業法（昭和27年法律第151号）によれば、同法第3条第2項に規定される総トン数100トン未満の船舶であって長さ30m未満のものによる内航運送業を営む者は、同法第9条の安全管理規程を定めなければならない内航海運業者（総トン数100トン以上の船舶又は長さ30m以上のものによる内航運送業を営む者）には該当しない。

2.8.5 安全管理規程

A社責任者及びA社担当者の口述並びにA社の安全管理規程によれば、A社は、所有する総トン数約100～150トンの引船3隻による内航運送業を営むため、

平成19年9月1日に安全管理規程（運航基準、作業基準、事故処理基準等を含む。）を定めており、運航基準に出港中止基準が記載されていた。

2.9 台船等をえい航中の引船の転覆事故例

旧海難審判庁の裁決書（平成3年～平成20年）及び運輸安全委員会の船舶事故調査報告書（平成20年～平成27年）によれば、台船等をえい航中、気象及び海象の影響により台船等が引船の船尾方向からやや横方向に移動して引く横引き状態となり、引船が転覆又は沈没した事故は、次の3件であった。

	発生年月日 場 所 総トン数	要 旨	死傷等
1. 沈没	H10.1.15 和歌山県潮岬沖 50.36トン	台船のえい航中、波の打ち込み及び強風で横引き状態となり、左舷側に傾斜し、左舷側出入口の隙間等から浸水し、約5分後に沈没	乗組員3人のうち、2人行方不明
2. 転覆	H18.3.3 宮崎県細島港南方沖 19トン	ケーソンのえい航中、左舷後方からの波で船首が左方に振れ、横引き状態となり、えい航索が緊張し、左舷から波を受け、横傾斜して約10分後に転覆	乗組員2人のうち、1人死亡、1人行方不明
3. 沈没	H21.1.12 和歌山県市江崎南西方沖 49.75トン	台船のえい航中、風浪、斜め向波により横引き状態となり、ブルワーク上端が海面に浸かり、更に、海水が打ち込み、転覆して沈没	乗組員3人全員行方不明

2.10 国立研究開発法人海上技術安全研究所による解析

A船の復原性、並びに風浪中で台船Aをえい航する際に作用する風浪及びえい航索の外力による横傾斜その他の挙動に関する調査を国立研究開発法人海上技術安全研究所（以下「海技研」という。）に委託した結果、次のとおりであった。

2.10.1 本事故時の復原性の推定

A船の同型船の重量重心計算書に記載された軽荷状態を基に算定したところ、本事故当時のA船のメタセンタ高さ^{*15}は0.877m、横揺れ固有周期が5.540s

^{*15} 「メタセンタ高さ」とは、浮体の重心から、浮体が直立して釣り合っているときの浮力の作用線と、横方向にごく僅かに傾いたときの浮力の作用線との交点（メタセンタ）までの長さをいい、GMという。

及び復原性（復原力曲線^{*16}及びブルワーク上端が海水に浸かる横傾斜角）は図2.10-1のとおりであった。

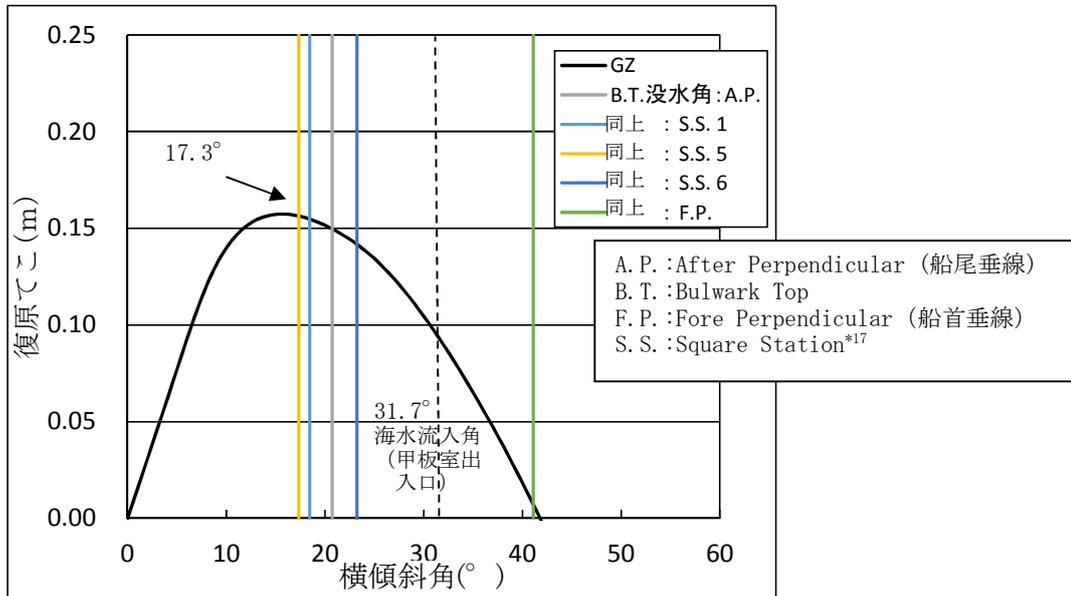


図2.10-1 事故発生時の復原力曲線

また、本事故時のA船の海水流入角は甲板室出入口が最も小さく約31.7°であり、ブルワーク上端が海水に浸かる角度（ブルワーク没水角）は約17.3°であった。

2.10.2 A船のえい航能力の推定

A船は、機関を2基搭載し、最大回転数は1,500rpm、出力625.0kW（850PS）である。えい引力を1tf/100PSとすると、A船のえい引力は約1.6tf（約156.91kN）と推測される。A船は、ふだん、出力75%、回転数1,200rpmでえい航しており、本事故当時も同様とするとえい引力は約1.2tf（約117.68kN）で、これより自船の抵抗を引いた値がえい航力となるため、更に小さくなる。

2.10.3 A船及び台船Aの挙動推定

A船による台船Aのえい航時の挙動並びにえい航索張力（以下「索張力」という。）及びえい航索方向（以下「索方向」という。）を計算した結果は、表2.10-1及び表2.10-2のとおりであった。

*16 「復原力曲線」とは、船体が横傾斜したときの復原てこ（GZ：横傾斜を元に戻そうとする偶力を排水量で除した値）をグラフ化したものをいう。

*17 「S.S. (Square Station)」とは、一般的に、船首材と計画満載喫水線の交点を通る垂線を船首垂線、船尾材の中心線を通る垂線を船尾垂線としてこの間を10等分した垂直面をいう。

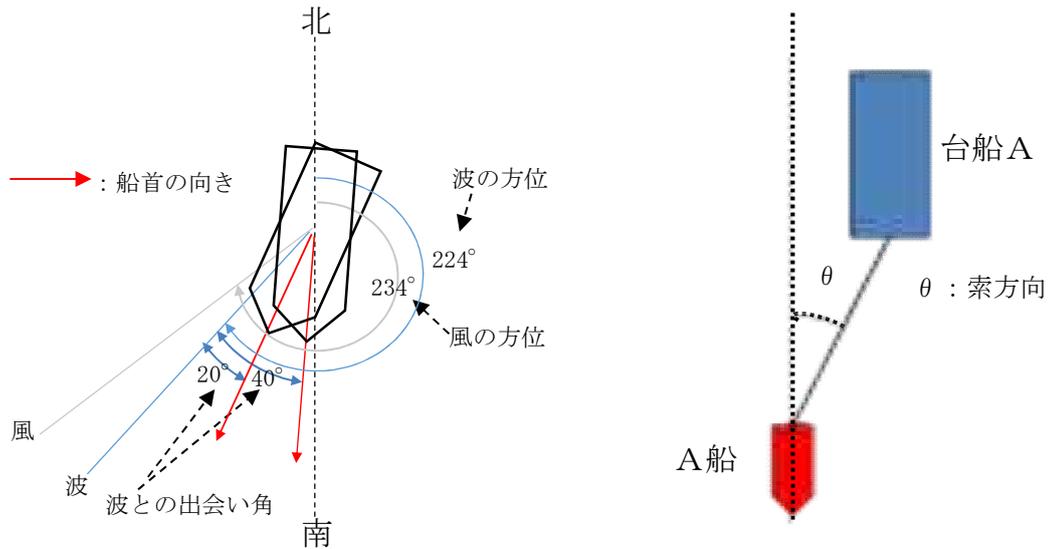


図 2.10-2 波と風との出会い角及び索方向（索方向 θ ）

ただし、風速及び波高は、船長B及び航海士Cの口述により 17 m/s及び 3.0 m、波周期は、海技研が所有する波と風を統計解析したデータベースから作成した津軽海峡距岸 2 Mの有義波高と有義波周期の発生頻度表より 6.97 s、波との出会い角は 0° 、 10° 、 20° 、 30° 及び 40° 、えい航速力は、船長B及び航海士Cの口述により 4 kn及び 5 knとして計算を行った。

表 2.10-1 索張力及び索方向（船速 4 kn、風速 17 m/s、波高 3.0 m）

波との出 会い角 ($^\circ$)	えい航状態	索張力T(tf) (括弧内の値 : kN)		索方向 θ ($^\circ$)	
		定常値又は平均値	最大値	定常値又は平均値	最大値
0	安定	5.511(定常値) (54.044)	5.604 (54.956)	3.74(定常値)	0.36
10	安定	5.495(定常値) (53.888)	5.985 (58.693)	10.01(定常値)	10.62
20	振れ回り (振幅20.8 m)	5.423(平均値) (53.181)	13.248 (129.918)	17.40(平均値)	17.94
30	不安定	5.649(平均値) (55.398)	26.451 (259.396)	18.12(平均値)	22.34
40	不安定	5.655(平均値) (55.457)	32.062 (314.421)	24.65(平均値)	14.91

索張力T:主ロープに生じる張力(tf)

表 2. 1 0 - 2 索張力及び索方向 (船速 5 kn、風速 1 7 m/s、波高 3. 0 m)

波との出 合会い角 (°)	えい航状態	索張力T(tf) (括弧内の値:kN)		索方向θ(°)	
		定常値又は平均 値	最大値	定常値又は平均値	最大値
0	振れ回り (振幅3.8m)	6.883(平均値) (67.500)	9.881 (96.900)	3.08(平均値)	3.79
10	安定	5.608(定常値) (54.996)	6.177 (60.576)	8.55(定常値)	9.67
20	安定	5.698(定常値) (55.878)	6.602 (64.744)	14.36(定常値)	16.00
30	振れ回り (振幅21.8m)	5.388(平均値) (52.839)	7.319 (71.775)	21.27(平均値)	24.18
40	安定	5.293(定常値) (51.907)	5.834 (57.212)	26.85(定常値)	25.85

※波又は風との出会い角はA船の船首正面の向かい状態を0°で反時計回りとし、風向と波向との差を10°とした。また、えい航状態欄の「安定」、「振れ回り」及び「不安定」は、一定時間のシミュレーション計算を行った結果、それぞれ「引船及び台船とも、えい航初期に横振れを生じるものの横振れがすぐに減衰して安定してえい航できる状態」、「引船及び台船とも横振れを生じてそれぞれの横振れ振幅が異なる状態」及び「引船及び台船とも横振れを生じてそれぞれの横振れ振幅が異なり、位相がずれている状態」、また、索張力欄及び索方向欄の「定常値」、「平均値」及び「最大値」については、それぞれ「横振れが減衰して安定した状態の値」、「一定時間に生じる横振れ振幅の平均値」及び「一定時間に生じる横振れ振幅の最大値」をいう。

前記の結果から、4 kn及び5 knのえい航速力において、振れ回りが発生しなければ、索張力は定常値約5.3～5.7 tf (約51.9～55.9 kN) であるが、振れ回りが発生した場合、索張力の最大値が約7.3～13.0 tf (約71.8～129.9 kN) となる。

振れ回りが発生した場合、A船のえい引力が約12 tf (約117.68 kN) であるので、前記の気象及び海象条件下において、A船の推進抵抗を差し引けば、いずれの速力においてもえい航は困難になる。

2.10.4 本事故当時の風浪及び台船のえい航に伴う定常横傾斜角の計算

(1) 本事故当時の風及び索張力による定常横傾斜

前記2.10.3の計算と同じ気象、海象等条件において、風及び台船のえい航の際に生じる索張力による定常横傾斜角は、最大で約4.4°であった。(表2.10-3参照)

表2.10-3 風及び索張力による定常横傾斜角

波及び風との出会い角(波°/風°)	風による定常横傾斜角(°)	風及び索張力による定常横傾斜角船速4kn(°)	風及び索張力による定常横傾斜角船速5kn(°)
0/10	0.36	0.79	0.80
10/20	0.71	1.86	1.74
20/30	1.04	3.08	2.70
30/40	1.34	3.43	3.66
40/50	1.59	4.40	4.33

(2) 波浪による横揺れ

波との出会い角を0°(向波)から90°(横波)まで10°ごとに変化させて本事故発生時の横揺れ角を算定したところ、振れ回りが発生する場合の横揺れ角は、船速4kn、出会い角20°では7.15°及び船速5kn、出会い角30°では9.40°となった。(図2.10-3、表2.10-4参照)

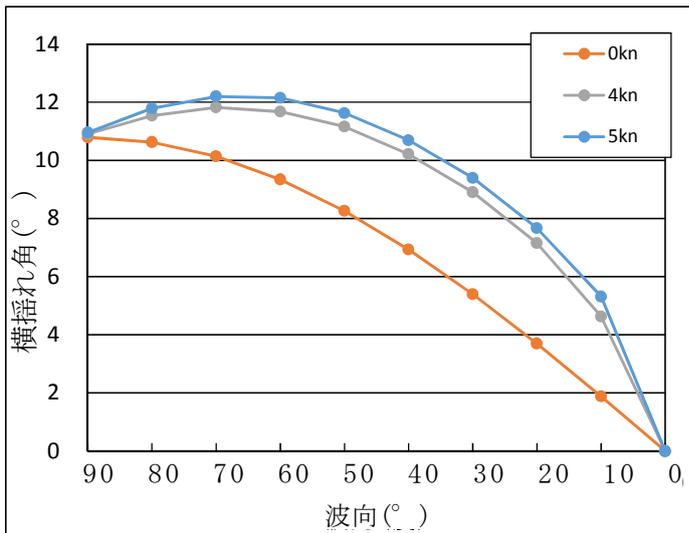


表2.10-4 波浪による横揺れ角(船速=4kn、5kn)

船速-出会い角	横揺れ角(°)	船速-出会い角	横揺れ角(°)
4kn-0°	0.00	5kn-0°	0.00
(安定)		(振れ回り)	
4kn-10°	4.63	5kn-10°	5.31
(安定)		(安定)	
4kn-20°	7.15	5kn-20°	7.67
(振れ回り)		(安定)	
4kn-30°	8.90	5kn-30°	9.40
(不安定)		(振れ回り)	
4kn-40°	10.21	5kn-40°	10.69
(不安定)		(安定)	

図2.10-3 波浪による横揺れ角

2.10.5 転覆に至るメカニズムの検討

(1) 本事故時の状況について、風上側（右舷側）に最大限横揺れした時点で、索張力による傾斜モーメントが急激に増大したとして、風下側（左舷側）への最大傾斜角等を、波による船体を横傾斜させるエネルギーと船体の横傾斜に伴い発生する動復原力エネルギーとが等しくなるまで横傾斜すると仮定する「エネルギーバランス」の考え方で推定した。

(2) エネルギーバランスの計算

エネルギーバランスの計算は、振れ回りが発生した船速が4knで出会い角が20°の状態及び船速5knで出会い角が30°の状態における、索張力及び風による定常横傾斜並びに波による横揺れを考慮した場合について、計算を行ったところ、次のとおりであった。（表2.10-5、図2.10-4参照）

表2.10-5 エネルギーバランス計算

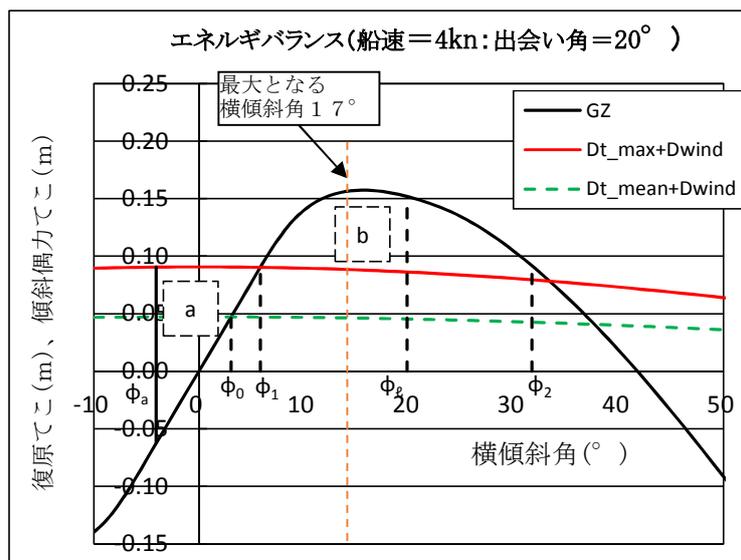
	定常傾斜角 ϕ_0 (°)	右舷への最大傾斜角 ϕ_a (°)	索張力が最大値をとった場合の定常傾斜角 ϕ_1 (°)	海水流入角 ϕ_2 (°)	傾斜エネルギー a (m-°)	動復原力 b (m-°)	動復原力と傾斜エネルギーの比 c (=b/a)	左舷への最大傾斜角 ϕ_e (°)
索張力+風	3.08	-4.07	5.86	31.73	0.758	1.284	1.69	19.85

(船速=4kn、 出会い角=20°)

	定常傾斜角 ϕ_0 (°)	右舷への最大傾斜角 ϕ_a (°)	索張力が最大値をとった場合の定常傾斜角 ϕ_1 (°)	海水流入角 ϕ_2 (°)	傾斜エネルギー a (m-°)	動復原力 b (m-°)	動復原力と傾斜エネルギーの比 c (=b/a)	左舷への最大傾斜角 ϕ_e (°)
索張力+風	3.66	-5.74	4.88	31.73	0.876	1.658	1.89	18.64

(船速=5kn、 出会い角=30°)

※c < 1 のとき、動復原力より傾斜エネルギーが大きくなり、転覆する。



※Dt_max+Dwind は、索張力の最大値に対応する傾斜偶力てこ+風による傾斜偶力てこ
Dt_mean+Dwind は、索張力の平均値に対応する傾斜偶力てこ+風による傾斜偶力てこ
図2.10-4 エネルギーバランス計算 (船速=4kn、 出会い角=20°)

船速4knで出会い角が 20° の状態及び船速5knで出会い角が 30° の状態では、動復原力と傾斜エネルギーの比(c)は1.69及び1.89でA船は転覆しないが、左舷側への最大傾斜角(ϕ_l)は 19.85° 及び 18.64° となり、復原てこが、最大となる横傾斜角 17° 及びブルワーク上端没水角 17.3° を超えるものと想定される。

横傾斜角が、復原力の最大値が生じる角度(以下「最大復原力角度」という。)より大きな角度まで達すると復原力曲線が横傾斜の増加に応じて単純減少し、更に横傾斜角がブルワーク上端没水角を超え、海中に没したブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続いて入射する波の作用で転覆に至るものと想定される。

3 分析

3.1 事故発生の状況

3.1.1 事故発生に至る経過

2.1.1から、次のとおりであった。

- (1) A船は、平成27年3月27日12時30分ごろ石巻港に向けて函館港を出港した旨の連絡をA社責任者に連絡し、函館港の西防波堤沖で停船して主ロープを約200mまで伸ばしてA船引船列を構成した後、航行を続けたものと考えられる。
- (2) A船は、13時43分ごろ、大鼻岬北西方約1.4Mを速力約2~3knで南進したものと考えられる。
- (3) A船は、14時18分ごろ、大鼻岬南南東方1~3M付近を南西の風を受け、南西方からの波を船首からかぶりながら、速力約4~5knで南~南南西進したものと考えられる。
- (4) A船は、船体が横に傾斜してから5分もかからずに転覆した可能性があると考えられる。

3.1.2 事故発生日時及び場所

(1) 事故発生日時

次のことから、本事故の発生日時は、平成27年3月27日14時26分ごろであった可能性があると考えられる。

- ① 2.1.1(1)及び2.1.2(1)から、平成27年3月27日14時21分ごろ、指導員AからA社責任者の携帯電話に着信があつて不通となつた後、5分

以内にA社責任者が、船舶電話等にかかけ直したものの、電話がかからなかったこと。

- ② 2.1.1(3)から、航海士Cが、平成27年3月27日14時18分ごろ及び26分ごろ、大鼻岬南南東方を、船首から波をかぶり、波に見え隠れしながら南～南南西進していたA船引船列を視認したこと。

(2) 事故発生場所

2.1.1(3)から、前記(1)②の事故発生日時におけるA船の船位は、14時26分ごろのC船から東方3.0M付近の場所であることから、事故発生場所は、北緯41°42.6′ 東経140°43.0′（渡島住吉港東防波堤灯台から真方位188°2.7M）付近であった可能性があると考えられる。

3.1.3 死傷者等の状況

2.2から、船長A及び指導員Aが溺死し、甲板員A₂が行方不明となって、後日、死亡認定されて除籍となり、甲板員A₁が偶発性低体温症等により約1か月入院した。

3.1.4 損傷の状況

2.1.2及び2.3から、A船は、転覆後、台船Aと主ロープでつながれた状態で漂流後に沈没し、海底に左舷側を下にして横倒し状態となり、操舵室上のマスト、レーダーアンテナ、操舵室上部等に破損、左舷船体外板に塗装の剥離、主機関の濡損等を生じ、全損となったものと推定される。

3.2 事故要因の解析

3.2.1 乗組員等の状況

2.4から、次のとおりであった。

- (1) 船長A、指導員A、甲板員A₁及び甲板員A₂は、適法で有効な操縦免許証を有していた。

本事故当時、船長A、指導員A及び甲板員A₂の健康状態は、良好であった可能性があると考えられる。

また、甲板員A₁の健康状態は良好であったものと考えられる。

- (2) 船長Aは、小型引船による台船のえい航の経験があり、また、指導員Aは豊富な経験を有していたものと考えられる。

3.2.2 船舶の状況

- (1) 2.5.1(5)から、A船は、同型船と同様に沿海区域を航行するために必要な

復原性を有していたものと考えられる。

- (2) 2.5.2(3)から、A船は、船体、機関及び機器類に不具合又は故障はなく、台船Aは、船体に不具合はなかったものと考えられる。

3.2.3 気象及び海象の状況

2.6及び2.10.3から、次のとおりであった。

本事故時、天気は曇り、風速約17m/sの南西風が吹き、南西方から波高約3.0mの波があり、波周期は約6.97sであったものと考えられる。

函館地方气象台は、3月26日11時35分津軽海峡に海上強風警報を、12時49分函館市に強風注意報を、また、17時31分函館市に強風及び波浪注意報をそれぞれ発表し、27日も継続していた。

3.2.4 転覆に関する解析

2.9及び2.10から、次のとおりであった。

- (1) A船及び台船Aの位置関係は、船速4kn及び5knで振れ回りを起こす状況においては、横引き状態が発生するものと考えられる。

- (2) A船は、船速4kn及び波との出会い角 20° の状態並びに船速5kn及び出会い角 30° の状態でえい航している台船が振れ回りを起こす状況においては、索張力及び風による定常横傾斜並びに波による横揺れを考慮しても、直ちに転覆に至ることはないが、左舷側への最大傾斜角は、最大復原力角度より大きく、ブルワーク上端没水角 17.3° を超えるものと考えられる。

- (3) A船は、‘波浪、台船の振れ回りが発生した際の索張力及び風圧’（以下「複合的な外力」という。）を受け、横引き状態となり、左舷傾斜角が、最大復原力角度より大きくなり、復原力が減少し、ブルワークが海中に没したことから、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続く波を受け、転覆した可能性があると考えられる。

- (4) 前記(3)及び過去の事例から、荒天下に台船等をえい航する小型引船を含む引船は、複合的な外力により、横引き状態となり、大きな横傾斜が発生しやすく、転覆する危険性があるものと考えられる。

なお、A船の横揺れ固有周期は5.540sで、波周期は約6.97sであるため、同調横揺れはないものと考えられる。

3.2.5 救命設備等の状況に関する解析

2.1.2(3)、2.5.2(1)から、次のとおりであった。

A船は、救命浮器1個、救命浮環1個及び救命胴衣6個を備えていたものと考えられる。

船長、甲板員A₁及び指導員Aは、ふだん、操舵室で当直中に救命胴衣を着用していなかったこと及び救助時に救命胴衣を着用していなかったことから、本事故当時、救命胴衣を着用していなかったものと考えられ、また、甲板員A₂は、行方不明となったことから、救命胴衣の着用状況を明らかにすることはできなかった。

3.2.6 安全管理に関する解析

(1) 気象及び海象の把握状況

2.1.1、2.8.3及び3.2.3から、次のとおりであった。

- ① 船長Aは、ふだん、1時間ごとに携帯電話で、指導員Aは、携帯電話等で気象情報等をそれぞれ入手しており、また、指導員Aが、27日12時30分ごろにA社責任者へ電話をかけた際、天候は大丈夫かとの問いに対し、南西の風7～8m/sで大丈夫だろうと返答をしていたことから、船長A及び指導員Aは、函館港出港前に気象情報等を入手していた可能性があると考えられる。
- ② A社責任者は、27日の朝、テレビで気象情報等を見ていたものの、本事故当時、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表されていたことを知らなかったものと考えられる。

(2) 運航中止の判断等

2.1.1、2.8及び3.2.3から、次のとおりであった。

- ① A社責任者は小型引船の出港中止基準を、港内及び航行中に予想される気象及び海象が、風速10m/s以上又は波高1.5m以上と口頭で指示しており、出港時に津軽海峡の予想される平均風速が最大18m/s以上及び有義波高が約3.0mだったことから、船長A及び指導員Aは、本事故当時、出港中止を検討すべき状況であったものと考えられる。
- ② A社責任者は、荒天避難、出港及び運航中止の判断をせず、船長A及び指導員Aが最終的な判断を行った可能性があると考えられる。

(3) A社の連絡体制

2.1.1及び2.8.2から、A社は、1日5回程度、航行中の所属船船長とA社責任者の間で連絡を取っており、また、気象及び海象の悪化が予想される場合、避難する場合等は、その都度、船長からA社責任者に連絡しており、本事故時もA社責任者は指導員Aから連絡があったことから、A船の異変に気付くことができ、海上保安庁に通報できたものと考えられる。

(4) 運航基準に関する解析

2.8及び3.2.3から、次のとおりであった。

- ① A社は、総トン数100トン以上又は長さ30m以上の引船でのえい航

に関して、運航基準により出港中止の気象等の条件を定めていたが、100トン未満であって長さ30m未満の引船であるA船については、発航中止基準等のマニュアル等を定めていなかったものと考えられる。

- ② 僚船船長は、えい航可能と判断する上限を風速約15m/s又は波高約2.0mとしていたものと考えられる。
- ③ A社責任者は、小型引船に出港中止基準を口頭で指示していたものの、前記①及び②から、A社の出港中止基準の周知及び乗組員の同基準に対する認識が不十分であったものと考えられる。

3.2.7 事故発生に関する解析

3.1.1、3.1.2、3.2.3、3.2.4及び3.2.6から、次のとおりであった。

- (1) 船長A及び指導員Aは、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下、函館港を出港し、A船引船列を構成して石巻港に向けて航行を開始したものと考えられる。
- (2) A船は、14時18分ごろ、風速約17m/sの南西の風及び南西からの波高約3.0mの波を船首からかぶりながら、大鼻岬南南東方1～3M付近を南～南南西の針路、約4～5knの速力で複合的な外力を受けながら台船Aをえい航していたものと考えられる。
- (3) A船は、14時26分ごろ、複合的な外力を受け、横引き状態となり、左舷傾斜角が、最大復原力角度より大きくなり、復原力が減少し、ブルワークが海中に没したことから、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続き波を受け、転覆した可能性があると考えられる。
- (4) A社責任者は、小型引船に出港中止基準を口頭で指示していたものの、A社の出港中止基準の周知及び乗組員の同基準に対する認識が不十分であったものと考えられ、このことは、A船引船列が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下、出港したことに関与した可能性があると考えられる。

3.3 救助及び被害の軽減措置に関する解析

3.3.1 救助の状況に関する解析

2.1、2.2、2.5.2、2.9及び3.2.6(3)から、次のとおりであった。

- (1) A船は、転覆して漂流していたところを陸上にいた住民により発見され、15時15分ごろ通報を受けた海上保安庁の巡視船等が出動し、指導員Aは漂流中、船長Aは漂着した海岸、甲板員A₁は船室内において、それぞれ救助され、船長A及び指導員Aは溺水で死亡し、甲板員A₁は偶発性低体温症

等で入院したものの、甲板員A₂は行方不明となったものと考えられる。

- (2) A社は、ふだんからA船との連絡を取っていたことからA船の異変に気付くことができ、海上保安庁に連絡することができたものの、A船は、自動的に遭難信号等を発信する装置を備えていなかったことから、本事故の発生を海上保安庁に直接通報することができなかったものと考えられる。
- (3) A船が、事故の発生を迅速、かつ、確実に救助機関に通報できるよう、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を備えていれば、早期に発見及び救助された可能性があると考えられる。

小型引船は本事故及び過去の事例から比較的短時間で転覆する可能性があることから、設置義務はないものの、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を設置することを検討する必要があるものと考えられる。

3.3.2 被害の軽減に関する解析

2.1.2、2.6.4、2.6.5及び3.2.5から、次のとおりであった。

- (1) 甲板員A₁は、転覆から約15時間後に救助されたが、A船が転覆した後、空気だまりとなった船員室に戻り、海水に浸からないよう寝台の下の隙間に入って座り、その後、海水が増えて体が濡れるようになったので、衣服を脱いで絞ってはまた着ることを繰り返したことから、体温低下を遅らせて意識を保つことができ、生存できたものと考えられる。
- (2) 船長A等は、救命胴衣を着用して脱出していれば、早期に発見及び救助された可能性があると考えられる。

4 結 論

4.1 原因

本事故は、A船が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下、函館港を出港し、A船引船列を構成して石巻港に向けて航行を開始し、大鼻岬南南東方1～3M付近を南～南南西進中、A船が、複合的な外力を受け、横引き状態となり、左舷傾斜角が、最大復原力角度より大きくなり、復原力が減少し、ブルワークが海中に没したため、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続く波を受け、左舷側へ転覆したことにより発生した可能性があると考えられる。

A船引船列が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下で出港したことは、A社責任者が、小型引船に出港中止基準を口頭で指示していたものの、A社の出港中止基準の周知及び乗組員の同基準に対する認識が不十

分であったことが関与した可能性があると考えられる。

4.2 その他判明した安全に関する事項

- (1) 小型引船は、荒天下で台船等をえい航する場合、複合的な外力により、横引き状態となり大きな横傾斜が発生しやすく、転覆する危険性があるものと考えられる。
- (2) 本事故においては、甲板員A₁は転覆した船内から救出されたが、A船は自動的に遭難信号等を発する装置を備えていなかったことから、本事故の発生を通報できなかったものと考えられる。

小型引船では、本事故及び過去の事例から比較的短時間で転覆する可能性があることから、事故の発生を迅速、かつ、確実に救助機関に通報できるよう、設置義務はないものの、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を備えていれば、早期に発見及び救助された可能性があると考えられる。

5 再発防止策

本事故は、A船が、津軽海峡に海上強風警報が、函館市に強風及び波浪注意報が発表された状況下、函館港を出港し、航行中に複合的な外力を受け、横引き状態となり、左舷傾斜角が、最大復原力角度より大きくなり、復原力が減少し、ブルワークが海中に没したため、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、引き続く波を受け、転覆した可能性があると考えられる。

また、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を備えていれば、早期に発見及び救助された可能性があると考えられる。

したがって、次の措置を講じる必要がある。

- (1) A社は、小型引船が荒天下で台船等をえい航する場合、複合的な外力により、転覆する危険性があることを踏まえ、以下の項目をマニュアル等で定め、船長及び乗組員が遵守するように指導及び支援する必要がある。
 - ① 出港及び運航中止基準（気象注意報、警報への対応等を含む）
 - ② 航行予定海域の気象情報等の入手、安全運航担当者への報告及び記録（チェックリスト化）
 - ③ 航行中の気象及び海象の変化に対する対応措置
- (2) 小型引船の運航者等は、事故の発生を迅速、かつ、確実に救助機関に通報できるよう、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を設置することについて検討することが望まれる。

5.1 事故後に講じられた事故等防止策

A社は、本事故後の平成27年4月5日、小型引船2隻の乗組員に対する安全講習を行い、本事故の概要及び引船の船尾に備えられたえい航アーチの中央付近にロープの輪を取り付け、えい航索を船尾中央部に保持し、索張力による船体の横傾斜を軽減する措置を実施した。(図5.1-1参照)

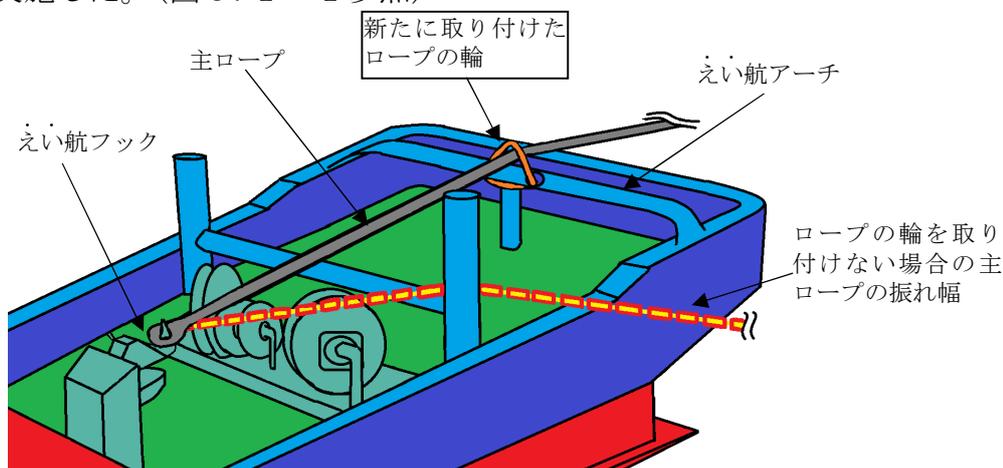


図5.1-1 A社再発防止策

5.2 今後必要とされる事故等防止策

5.2.1 A社

A社は、小型引船が荒天下で台船等をえい航する場合、複合的な外力により、転覆する危険性があることを踏まえ、以下の項目をマニュアル等で定め、船長及び乗組員が遵守するように指導及び支援する必要がある。

- (1) 出港及び運航中止基準（気象注意報及び警報への対応等）
- (2) 航行予定海域の気象情報等の入手、安全運航担当者への報告及び記録（チェックリスト化）
- (3) 航行中の気象及び海象の変化に対する対応措置

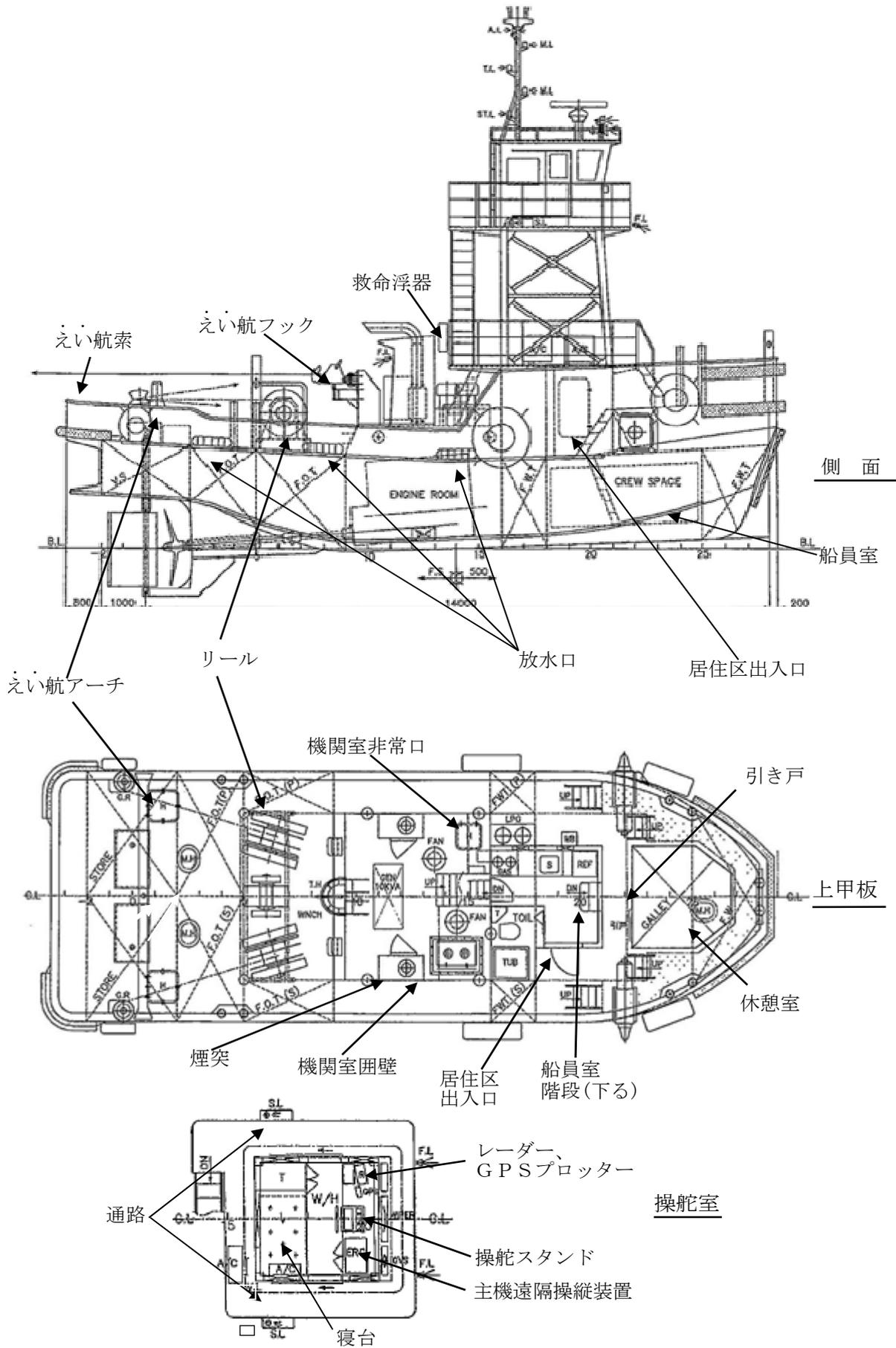
5.2.2 小型引船運航者等

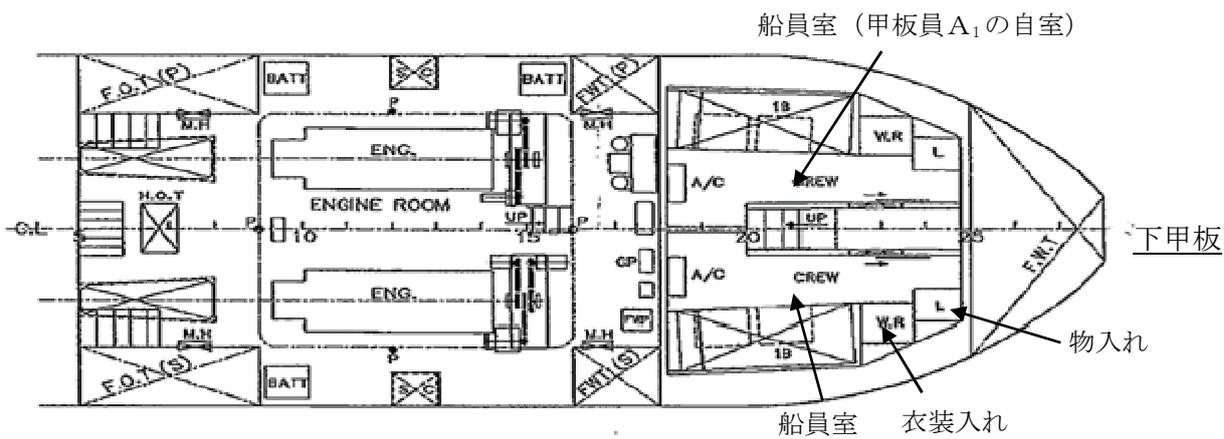
小型引船の運航者等は、事故の発生を迅速、かつ、確実に救助機関に通報できるよう、設置義務はないものの、遭難信号、位置情報等を自動的に発信する装置を設置することについて、検討することが望まれる。

付図1 事故発生経過概略図



付図2 A船船体概略図





転覆に係る解析調査
(引船 A 被引台船転覆事故)
報告書

平成 27 年 11 月

国立研究開発法人 海上技術安全研究所

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. 事故当時の気象海象の検討	2
3. 事故当時の復原性能の推定	13
3. 1 重量重心計算	13
3. 2 復原力計算結果	15
4. 事故当時の曳航状態の推定	18
4. 1 計算条件	18
4. 2 バージに働く力の推定	24
4. 3 曳航時の曳航索張力の挙動推定	29
4. 3. 1 曳船・被曳船の挙動と索張力計算法	29
4. 3. 2 曳航方向の設定	29
4. 3. 3 計算結果	29
4. 4 曳船の曳航能力	33
5. 台船の曳航に伴う横傾斜角の推定	34
6. 事故当時の風及び波浪による横傾斜角（横揺れ角）の推定	37
6. 1 風による横傾斜	37
6. 2 波浪による横揺れ	40
7. 転覆に至るメカニズムの検討	42
7. 1 事故発生時の状況の想定	42
7. 2 転覆メカニズムの検討	42
7. 2. 1 事故発生時の復原力及び傾斜外力	42
7. 2. 2 エネルギーバランスの計算	44
7. 3 まとめ	46
参考文献	47
付録1 事故発生時の喫水	48
付録2 船型データ	49
付録3 復原力計算入力データの検証	51
付録4 波長船長比ごとの船体動揺	54

1. はじめに

1. 1 解析調査の目的

本解析調査は、平成 27 年 3 月 27 日津軽海峡の函館市立待岬南方付近で発生した引船 A 被引台船転覆事故調査に資するため、次の解析を行い、また、台船曳航中の引船 A が転覆に至る状況を 3 次元 CG（コンピュータグラフィックス）化することを目的とする。

- ①引船 A の復原性の算定
- ②事故時の引船 A と台船との位置関係（引船船首方位と曳航索の角度：横引き角度）の推定
- ③上記位置関係における引船 A の横傾斜角度の算出
- ④引船 A の転覆に至るメカニズムの検討

1. 2 解析調査の概要

具体的な解析調査事項は以下の通りである。

- (1) 事故当時の気象海象の検討（第 2 章）
- (2) 事故当時の復原性能の推定（第 3 章）
- (3) 事故当時の曳航状態の推定（第 4 章）
- (4) 台船の曳航に伴う横傾斜角の推定（第 5 章）
- (5) 事故当時の風及び波浪による横傾斜角（横揺れ角）の推定（第 6 章）
- (6) 転覆に至るメカニズムの検討（第 7 章）

2. 事故当時の気象海象の検討

事故発生は平成 27 年 3 月 27 日 14 時 26 分に付近航行中の船舶（以後「付近船舶」という。）に目撃された後で、この時南南西に針路をとっていた付近船舶の座標は $41^{\circ}43'33''\text{N}$ 、 $140^{\circ}39'7.8''\text{E}$ であり、左舷 90° の 3 海里先に対象船の船列を目視したとし、付近船舶の座標より 3 海里の範囲を図 2-1 に示す。この時の対象船列の座標は $41^{\circ}42'40.14''\text{N}$ 、 $140^{\circ}42'59.85''\text{E}$ 周辺と推定される。本解析では事故発生時刻を 14 時 26 分以降の 14 時 30 分、発生地点を上記対象船列の座標周辺と仮定して気象海象の解析を行う。

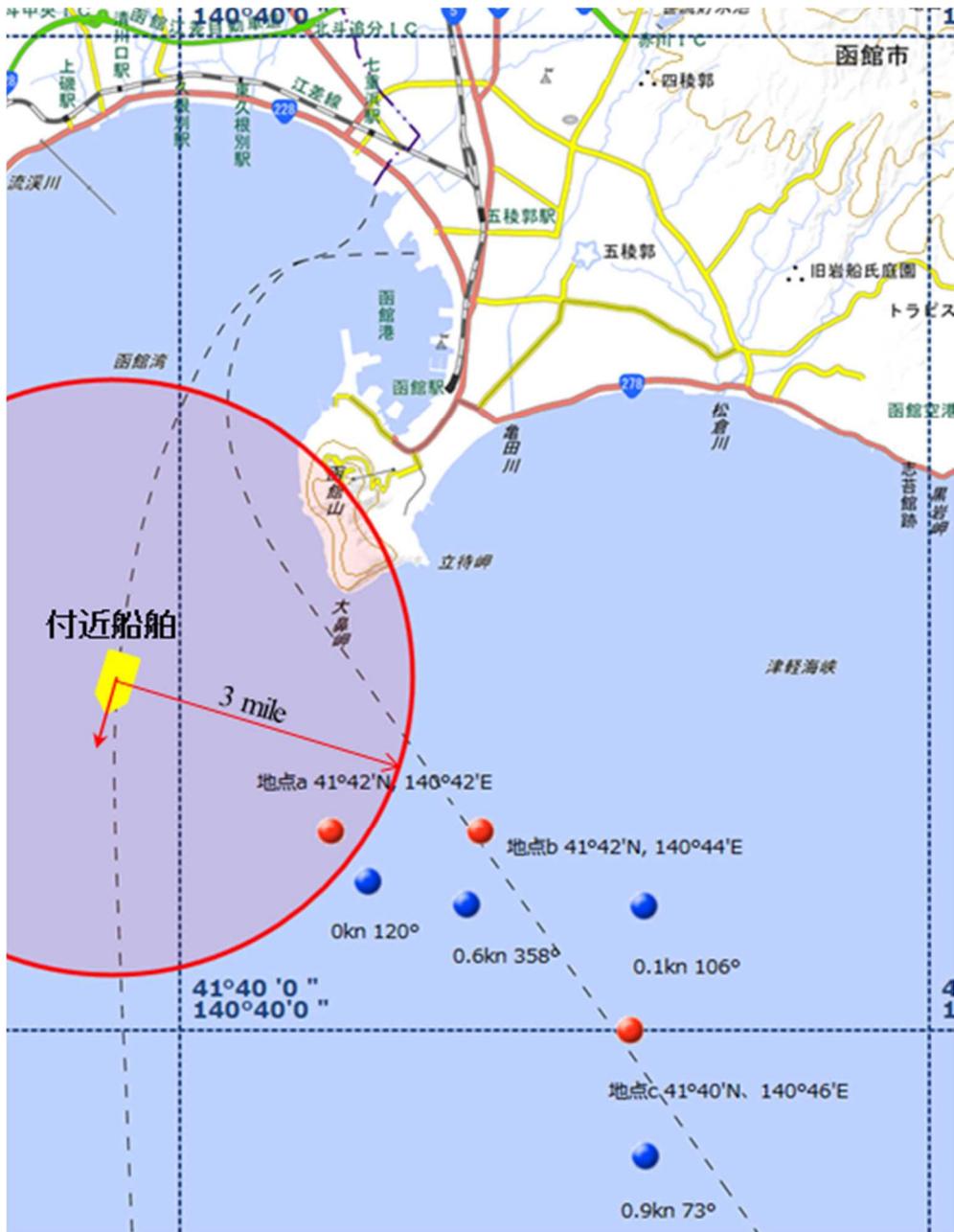


図2-1 波浪推算データベースと潮流予測データの抽出地点

事故当時の波高、波周期、波向、風速及び風向は日本気象協会の局地沿岸波浪推算データベースを用いて平成 27 年 3 月の以下の事故発生地点周辺の 3 地点（表 2-1）の波高、波周期、波向、

風速、風向を解析して推定した。3 地点の位置を図 2-1 の赤丸●に示す。潮流は日本水路協会海洋情報研究センターの津軽海峡の予測データを用いて図 2-1 の青丸●で示す 4 地点での 14 時 30 分での潮流データを抜き出し、方向と合わせて図中に記載した。事故発生海域の潮流の値は小さいため、影響はほとんどないと考えられる。

表2-1 局地沿岸波浪推算データベースの地点

地点 A	41° 42' N, 140° 42' E
地点 B	41° 42' N, 140° 44' E
地点 C	41° 40' N, 140° 46' E

図 2-2 から図 2-7 に地点 A, B, C での平成 27 年 3 月の 1 ヶ月分の波高と風速の変化を示す。3 地点のうち波高、風速が大きいの地点 C であり、27 日は 3 月の 1 ヶ月の中で特段荒れた海象ではなかったことが分かる。

図 2-8 から図 2-11 には地点 A, B, C での平成 27 年 3 月 27 日の 1 日分の波高、波向、風速及び風向の変化を示す。1 日の中での波高、風速及び方向の変化は小さいことが分かる。

表 2-2 に 3 地点での 3 月 27 日の 14、15 時での気象海象推算値と、内挿して求めた 14 時 30 分での値、及び 3 地点の平均値を示す。これより局地沿岸波浪推算値より推定される事故発生海域の気象海象条件は、最も厳しい地点 C の 14 時の値を参考にすると、波高 2.0m、波周期 5.8s、波向 224deg、風速 12m/s、風向 234deg.である。

一方、事故発生前に目撃した付近船舶の気象海象によると波高 3~4m、風速 17.0m/s である。そこで、風速に関して海上保安庁の沿岸域情報提供システム(MICS)の値を調査する。MICS による恵山岬灯台と大間岬灯台の風向風速を表 2-3 に、気象庁による函館空港の風向風速を表 2-4 に示す。また、恵山岬、大間岬及び函館空港の位置を地図上に図 2-12 に示す。大間岬灯台での 14 時 25 分の風速は 23m/s、函館空港での 14 時 30 分の風速は 17m/s である。これより事故現場での最大風速が 17m/s 程度であった可能性も考えられる。

次に波高と波周期について検討する。付近船舶による事故発生海域の波高が 3.0m とすると、波高 3.0m での波周期を推定する必要がある。海上技術安全研究所が所有する日本近海の波と風データベースは日本気象協会の緯度・経度 2 分格子間隔の局地沿岸波浪推算値の平成 6 年以降の 10 年間のデータを用いて当所が波と風を統計解析し、データベース化したものである。このデータベースを用いて津軽海峡距岸 2 海里での有義波高 $H_{1/3}$ =2.0、2.5、3.0m の区分における有義波周期の発生頻度を用いて加重平均で有義波高毎の平均有義波周期 $\overline{T_{1/3}}$ を求めた。津軽海峡距岸 2 海里の有義波高と有義波周期の発生頻度表を表 2-5 に、有義波高毎の加重平均による平均有義波周期を表 2-6 に示す。有義波高 2.0m では平均有義波周期が 5.94s であり、前述の局地沿岸波浪推算値での波周期 5.8s に近い値である。有義波高 3m では平均有義波周期は 6.97s、有義波高 4m では 7.90s であり、波高の増加に伴い波周期が長くなるため波呷度（波高/波長）はほぼ一定である。

これより、事故発生時の気象海象は**風速 17.0m/s、風向 234deg.、波高 3.0m、波周期 6.97s、波向 224deg.**としてバージ曳航時の索張力を推定する。

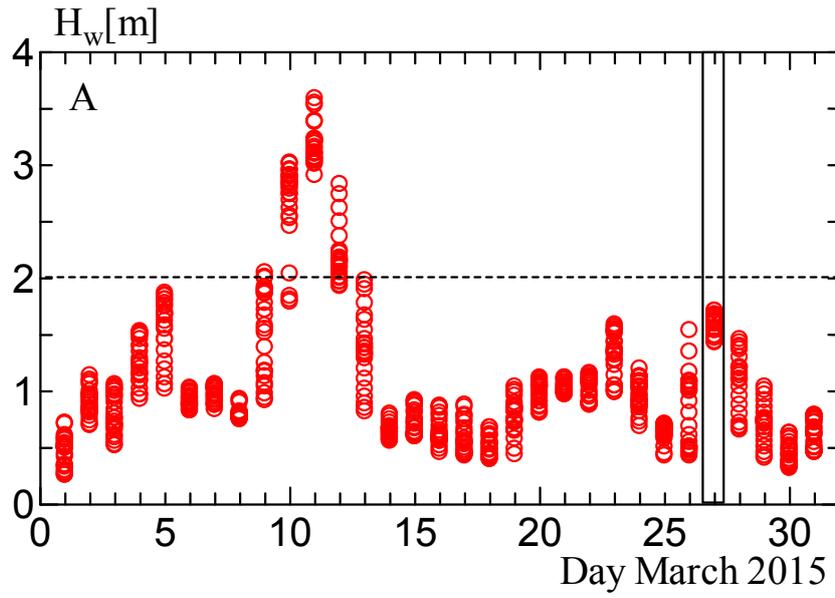


図2-2 地点 A での 3 月の波高の変化

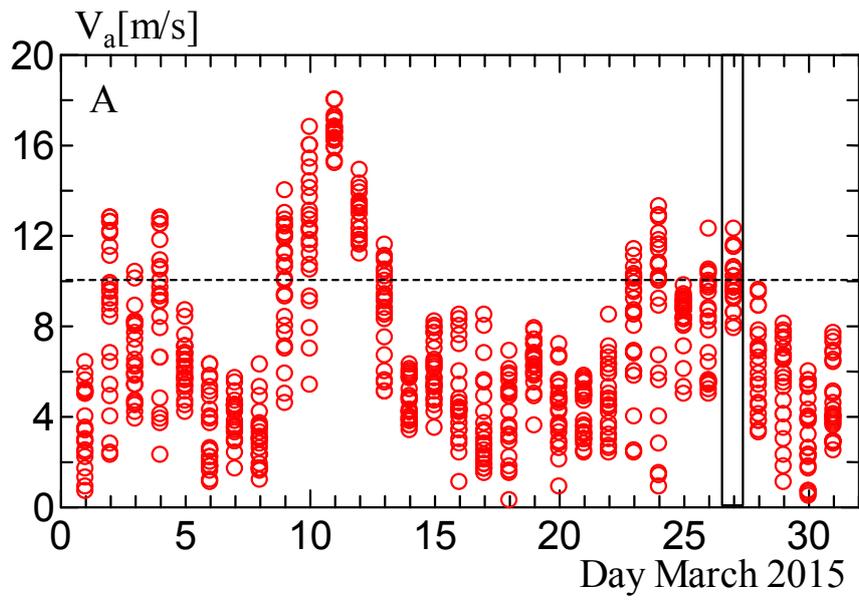


図2-3 地点 A での 3 月の風速の変化

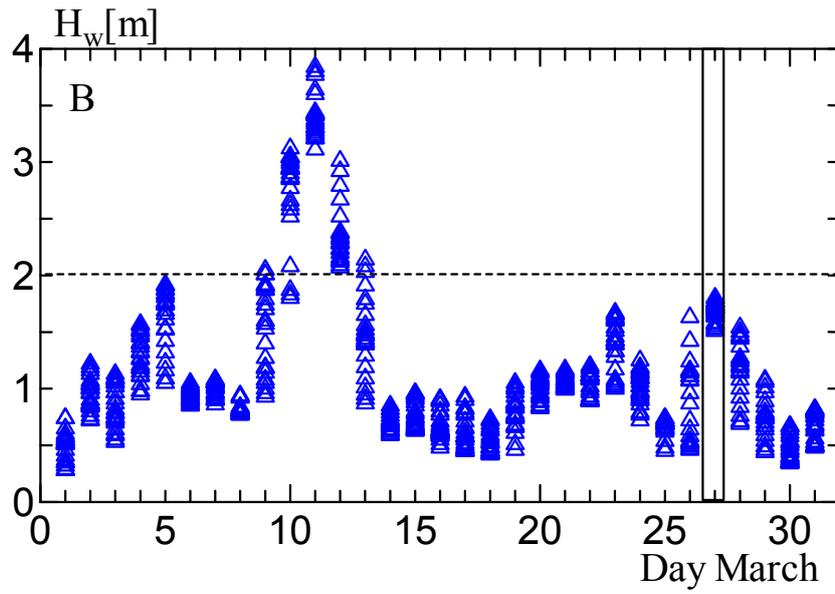


図2-4 地点 B での 3 月の波高の変化

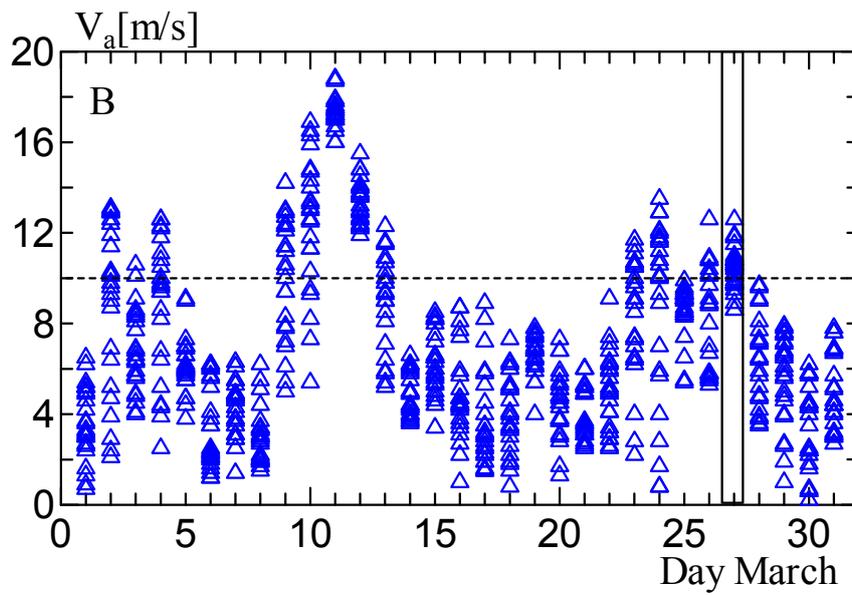


図2-5 地点 B での 3 月の風速の変化

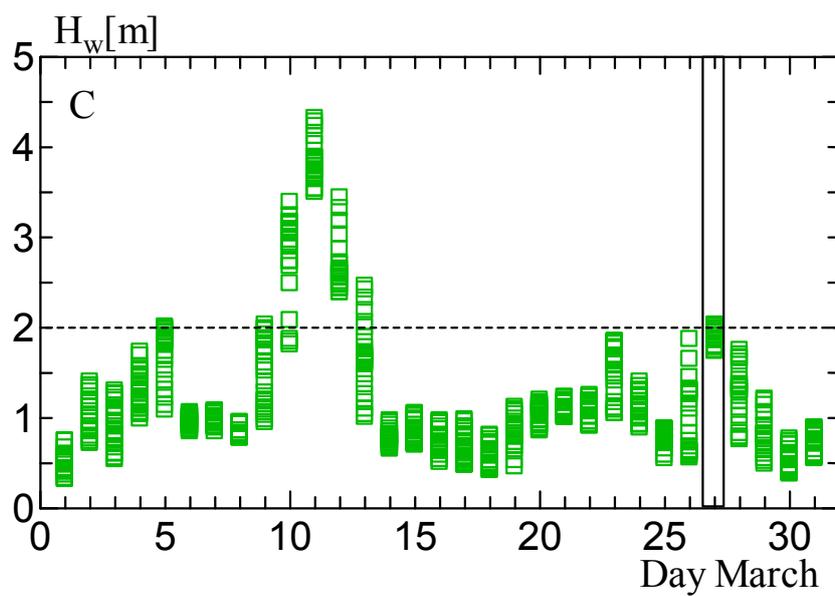


図2-6 地点Cでの3月の波高の変化

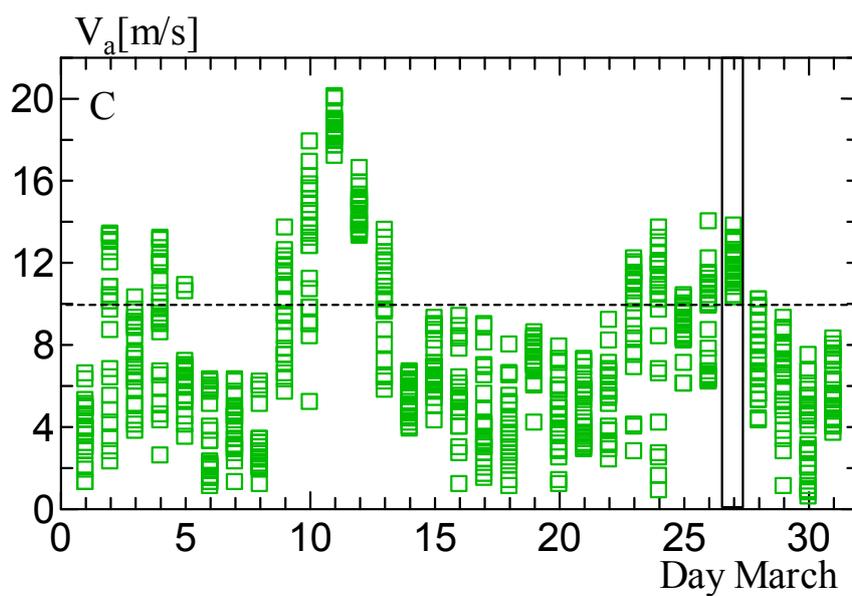


図2-7 地点Cでの3月の風速の変化

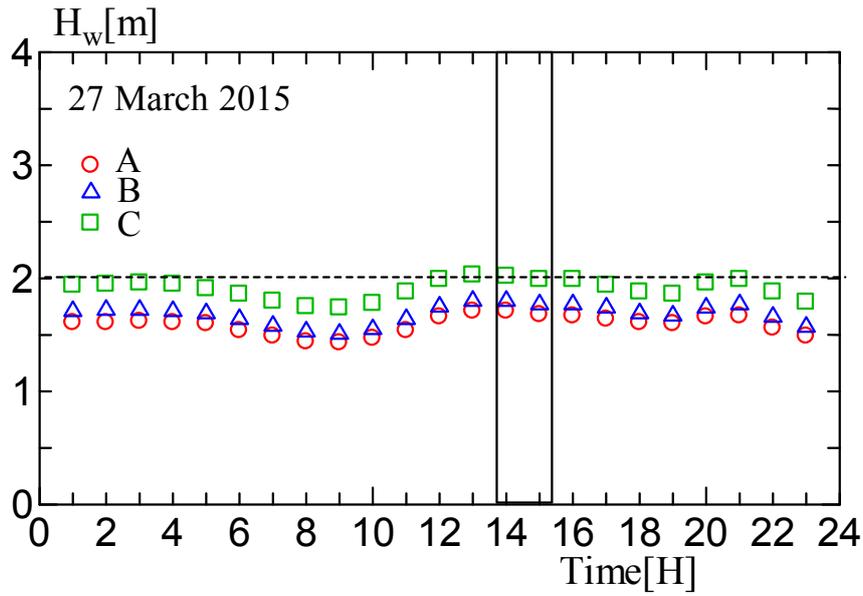


図2-8 地点 A, B, C での 3 月 27 日の波高の変化

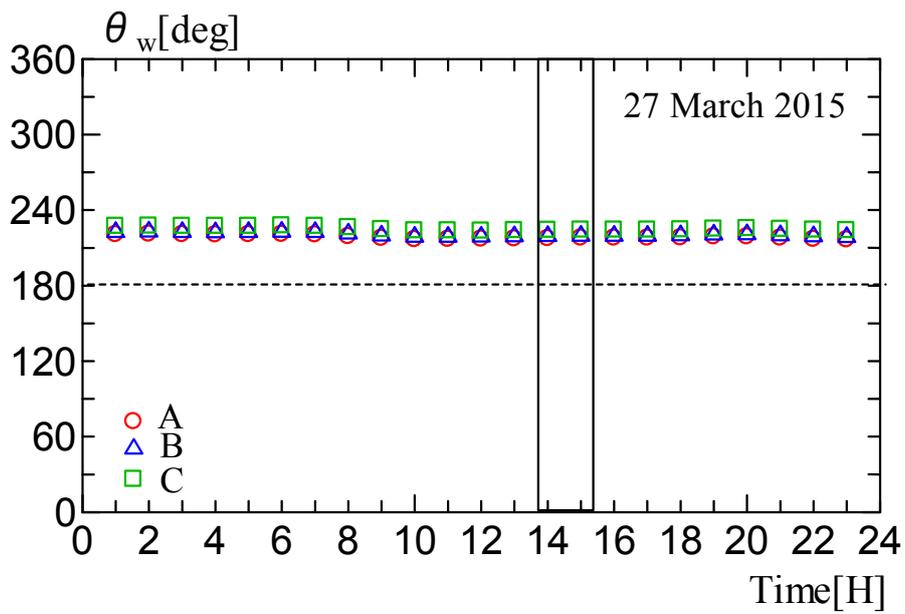


図2-9 地点 A, B, C での 3 月 27 日の波向の変化

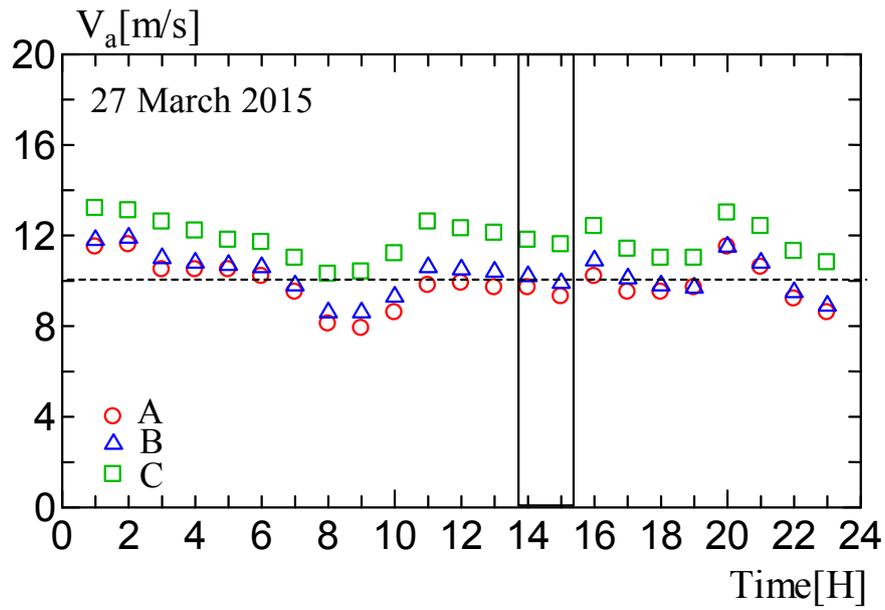


図2-10 地点 A, B, C での 3 月 27 日の風速の変化

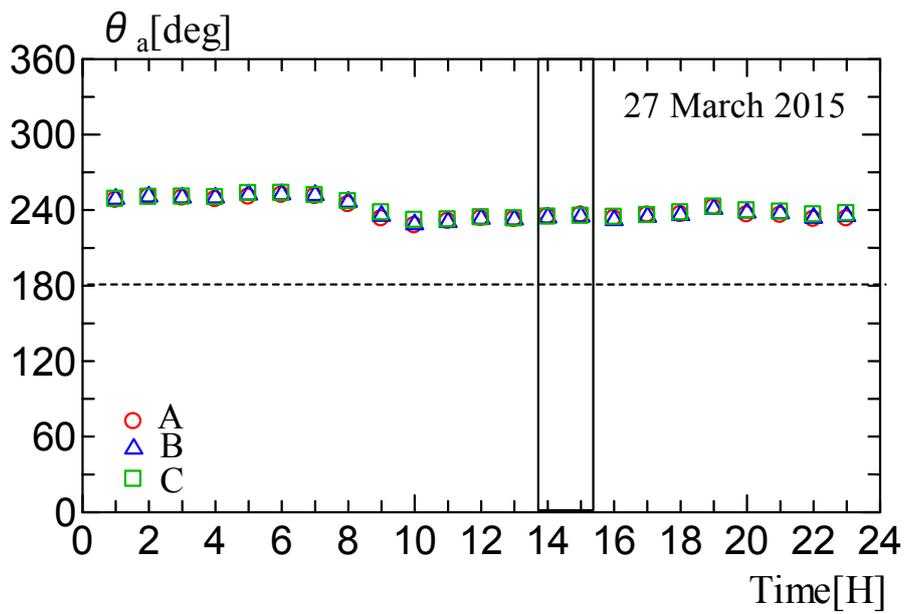


図2-11 地点 A, B, C での 3 月 27 日の風向の変化

表2-2 地点A, B, Cでの事故発生時の気象海象平均値

	年	月	日	時	波高 (m)	周期 (秒)	波向 (360°)	風向 (360°)	風速 (m/s)
A	15	3	27	14	1.71	5.7	217.5	234.7	9.7
	15	3	27	15	1.68	5.7	217.8	236.2	9.3
	15	3	27	14:30	1.70	5.70	217.7	235.5	9.5
B	15	3	27	14	1.8	5.7	219.4	234	10.2
	15	3	27	15	1.77	5.7	219.6	234.9	9.9
	15	3	27	14:30	1.79	5.70	219.5	234.5	10.1
C	15	3	27	14	2.02	5.8	224.1	234.5	11.8
	15	3	27	15	1.99	5.8	224.2	235.2	11.6
	15	3	27	14:30	2.01	5.80	224.2	234.9	11.7
ave(A,B,C)	15	3	27	14:30	1.83	5.7	220.4	234.9	10.4

表2-3 沿岸域情報提供システム(MICS)による風向風速

恵山岬灯台			大間岬灯台	
時刻	風向	風速[m/s]	風向	風速[m/s]
11:55	SSW	11	WSW	21
12:25	SSW	14	WSW	21
12:55	SSW	19	WSW	20
13:25	SW	19	WSW	21
13:55	SSW	17	WSW	20
14:25	SW	13	WSW	23
14:55	SSW	9	W	22
15:25	WSW	3	W	21
15:55	W	7	W	21
16:25	SSE	4	WSW	21
16:55	SW	4	WSW	20

表2-4 気象庁による函館空港の風向風速

時分	風向・風速[m/s]			
	平均	風向	最大瞬間	風向
14:00	11.8	SW	16.5	SW
14:10	12.8	SW	15.9	SW
14:20	12.5	SW	17.0	SW
14:30	13.0	SW	17.0	SW
14:40	12.8	SW	16.5	SW
14:50	11.6	SW	15.9	SSW
15:00	11.3	SW	13.9	SW
15:10	11.1	SW	15.4	SW
15:20	11.2	SW	16.5	SW
15:30	11.2	SW	15.9	SSW

表2-5 津軽海峡距岸2海里の有義波高と有義波周期の発生頻度表

波高[m]		number of occurrences= 586698														TOTAL		
low	high	mean of wave height= 0.54 [m]				wave length= 32.01 m				mean of wave period= 4.53 [s]						wave steepness= 0.017		
14.75	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14.25	14.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.75	14.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13.25	13.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.75	13.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.25	12.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.75	12.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.25	11.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.75	11.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.25	10.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.75	10.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.25	9.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.75	9.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.25	8.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.75	8.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25	7.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.75	7.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.25	6.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.75	6.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.25	5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.75	5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
4.25	4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.75	4.25	0	0	0	0	0	0	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	10
3.25	3.75	0	0	0	0	0	0	10	50	8	2	0	0	0	0	0	0	70
2.75	3.25	0	0	0	0	0	2	146	106	10	0	0	0	0	0	0	0	264
2.25	2.75	0	0	0	2	30	188	382	142	24	12	0	0	0	0	0	0	780
1.75	2.25	0	0	0	44	220	2722	804	350	122	70	14	0	0	0	0	0	4346
1.25	1.75	0	0	2	510	9548	7124	2162	1314	584	194	76	14	2	2	2	2	21534
0.75	1.25	0	0	270	23088	45684	15232	9292	6458	2570	1054	502	124	64	16	16	16	104370
0.25	0.75	0	0	53140	133488	49080	33738	27190	19266	11784	7864	3002	734	288	88	80	80	339742
0	0.25	0	14	68936	9120	7012	6226	6360	5604	4988	4248	2164	620	152	72	64	64	115580
TOTAL		0	14	122348	166252	111574	65232	46346	33296	20096	13444	5758	1492	506	178	162	162	586698
波周期[sec.]		0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-20.0		
波長[m]		0.00	1.56	6.24	14.04	24.96	38.99	56.15	76.43	99.82	126.34	155.97	188.73	224.60	263.59	305.70		
		-1.56	-6.24	-14.04	-24.96	-38.99	-56.15	-76.43	-99.82	-126.34	-155.97	-188.73	-224.60	-263.59	-305.70	-623.89		

表2-6 津軽海峡距岸 2 海里の有義波高ごとの平均有義波周期

Num	Hw[m]				
	2	2.5	3	3.5	4
T[s]					
0.5	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0
3.5	44	2	0	0	0
4.5	220	30	0	0	0
5.5	2722	188	2	0	0
6.5	804	382	146	10	0
7.5	350	142	106	50	6
8.5	122	24	10	8	4
9.5	70	12	0	2	0
10.5	14	0	0	0	0
11.5	0	0	0	0	0
12.5	0	0	0	0	0
13.5	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
weighted T=	5.94	6.46	6.97	7.53	7.90 [s]
$\lambda =$	55.03	65.17	75.77	88.40	97.34 [m]
H/ $\lambda =$	0.036	0.038	0.040	0.040	0.041

3. 事故当時の復原性能の推定

同型船の重量重心計算書に記載された軽荷状態から主機の差異他を修正した上で、調査官が指示する搭載物の重量及び搭載位置と事故発生時の燃料及び清水の搭載量に基づき、事故発生時における引船 A (対象船) の重量重心を推定した。そして、推定した重量重心の状態を対象船のメタセンタ高さ(GM)、横揺固有周期及び復原性能 (復原力曲線、海水流入角) を算定した。

対象船の主要目を表 3-1 に一般配置図を図 3-1 に示す。

表 3-1 主要目

船種	曳船兼押船兼作業船
航行区域	沿海区域
全長	16.00 m
垂線間長	13.98 m
型幅	5.40 m
型深	1.95 m
総トン数	19 GT

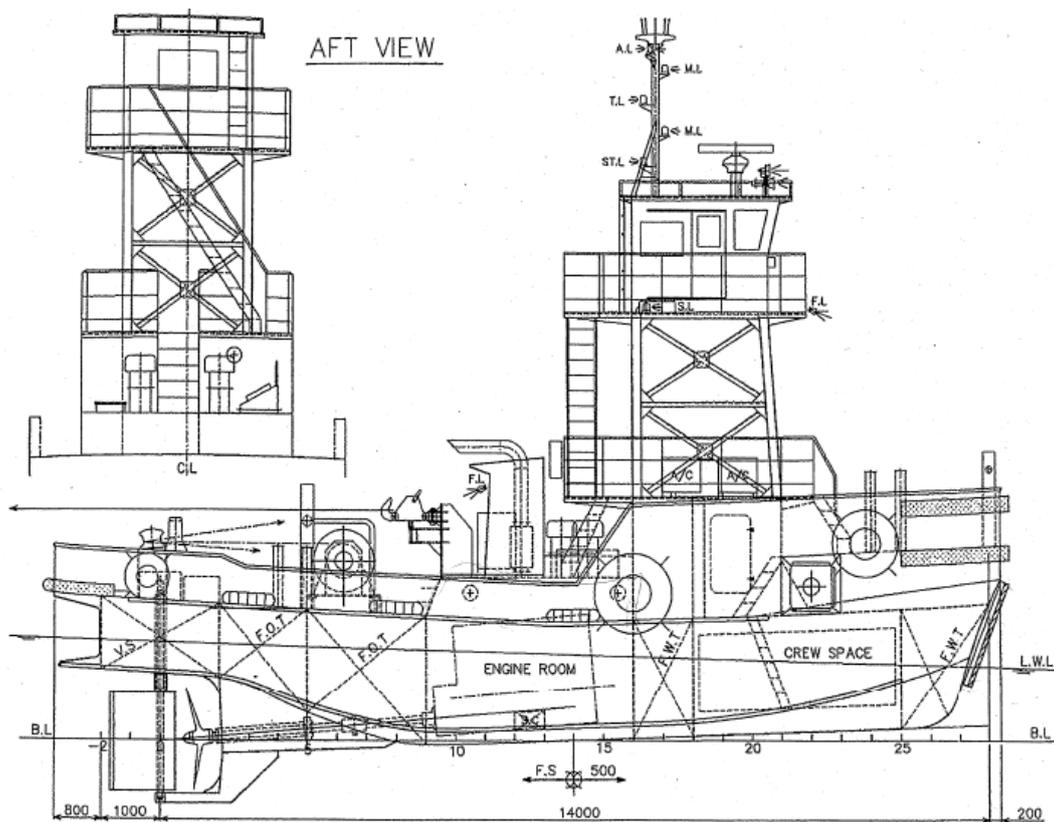


図 3-1 一般配置図

3. 1 重量重心計算

軽荷状態の修正に用いた重量重心計算表を表 3-2 に示す。また、事故発生時の対象船の搭載物の重量及び搭載位置 (重心位置) と燃料及び清水の搭載量 (表 3-3) 等を考慮して作成した重量重心計算表を表 3-4 に示す。表 3-4 は操舵室に船員が三人居たとした場合の対象船の事故発生時での重量重心計算表である。

計算書による事故発生時の状態では排水量 $W=91.999t$ 、重心の前後位置（重心位置） $mid-G=0.965m$ （船尾）、重心高さ $KG=1.756m$ となる。なお、燃料タンク等の自由水による見かけの重心上昇量は約 $0.004m$ である。（復原性報告書に自由表面の慣性二次モーメントが記載されていない部分については推定が困難なため無視している。）

しかしながら、表 3-4 に示した重量重心で算定した喫水は事故発生時の喫水から大きく離れている（付録 1）ため、 KG はこの計算書のままとし、前後重心と船体重量は事故発生時の喫水を基に計算した値（ $W=104.138t$ 、 $mid-G=0.855m$ （船尾））を用いることとした。

表 3-2 軽荷状態の修正のための重量重心計算表（対象船）

軽荷状態 項目	重量(t)	mid-G(m)		Mid-Gモーメント(t-m)		KG(m)	KGモーメント(t-m)
		前部	後部	前部	後部		
降ろすべきもの							
主機*1	1.256	0.000	0.800	0.000	1.005	1.108	1.392
ブリッジ高さ修正*2	3.530	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	3.530
搭載すべきもの							
船首部甲板室増設部 (galley)*3	0.527	5.250	0.000	2.769	0.000	3.200	1.688
曳航フック、曳航フック台*4	0.727	0.000	2.250	0.000	1.636	3.545	2.578
発電機*5	0.642	0.000	1.250	0.000	0.803	3.280	2.105
ブルワーク修正*6	0.458	4.027	0.000	1.845	0.000	3.175	1.455
同型船(軽荷状態)	70.060	0.000	0.738	0.000	51.704	1.802	126.248
				4.614	53.138		
対象船(軽荷状態)	71.159		0.682		48.524	1.815	129.153

- * 1 主機の差異：1,000PS×2 の物から 850PS×2 へ変更（現行同等品で置き換え）
- * 2 ブリッジ高さ修正：同型船に比べ 1m ブリッジが低いため修正（ブリッジ重量は建造造船所の算定値）
- * 3 船首部甲板室増設部（galley）：同型船に無い増設部を追加
- * 4 曳航フック、曳航フック台：同型船に無い曳航フック、フック台を追加
- * 5 発電機：同型船に無い発電機を追加
- * 6 ブルワーク修正：同型船と高さが違うため修正

表 3-3 事故発生時のタンクコンディション（対象船）

タンク		容積 (m^3)	重量 (t)	LCG (m)	Mid-Gモーメント(t-m)	KG (m)	KGモーメント(t-m)
F.O.T(燃料)	P	3.390	2.700	3.470	9.369	1.180	3.186
	S	3.390	2.700	3.470	9.369	1.180	3.186
F.W.T(清水)	P	1.670	1.670	-1.500	-2.505	1.100	1.837
	S	1.670	1.670	-1.500	-2.505	1.100	1.837
VS(FPT)(清水)	C	5.790	3.000	-6.223	-18.669	1.145	3.435
V.S(No.1)(燃料)	P	5.910	2.100	5.901	12.392	1.456	3.058
	S	5.910	2.100	5.901	12.392	1.456	3.058
V.S(No.2)	P	6.800	0.000	6.974	0.000	0.000	0.000
	S	6.800	0.000	6.974	0.000	0.000	0.000

注) V.S (No.2) はローブ等が収納されていたため空としている。

表 3-4 事故発生時での重量重心計算表 (対象船) (船橋：船員三人)

事故発生時 項目	重量(t)	mid-G(m)		Mid-Gモーメント(t-m)		KG (m)	KGモーメント(t-m)
		前部	後部	前部	後部		
降ろすべきもの							
主機	1.256	0.000	0.800	0.000	1.005	1.108	1.392
ブリッジ高さ修正	3.530	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	3.530
搭載すべきもの							
船首部甲板室増設部 (galley)	0.527	5.250	0.000	2.769	0.000	3.200	1.688
曳航フック、曳航フック台	0.727	0.000	2.250	0.000	1.636	3.545	2.578
発電機	0.642	0.000	1.250	0.000	0.803	3.280	2.105
ブルワーク修正	0.458	4.027	0.000	1.845	0.000	3.175	1.455
船橋 (船員三人)	0.210	2.250	0.000	0.473	0.000	7.682	1.613
船室 (船員一人)	0.070	4.100	0.000	0.287	0.000	1.108	0.078
倉庫品・食料品	0.100	2.250	0.000	0.225	0.000	2.450	0.245
作動油	0.130	0.000	3.600	0.000	0.468	1.100	0.143
予備潤滑油	0.100	0.000	4.200	0.000	0.420	1.150	0.115
F.O.T (燃料)	5.400	0.000	3.470	0.000	18.738	1.180	6.372
F.W.T (清水)	3.340	1.500	0.000	5.010	0.000	1.100	3.674
VS(FPT) (清水)	3.000	6.223	0.000	18.669	0.000	1.145	3.435
V.S (No.1) (燃料)	4.200	0.000	5.901	0.000	24.784	1.456	6.115
後部甲板のロープ用リール (大) (二台)	2.400	0.000	3.894	0.000	9.346	2.931	7.034
後部甲板のロープ用リール (小)	0.400	0.000	3.894	0.000	1.558	2.931	1.172
硬心入りワイヤー (二本)	0.280	0.000	3.894	0.000	1.090	2.931	0.821
ペルライНКロス (二本)	1.210	0.000	7.000	0.000	8.470	1.324	1.602
同型船 (軽荷状態)	70.060	0.000	0.738	0.000	51.704	1.802	126.248
				29.278	118.012		
対象船 (事故発生時)	91.999		0.965		88.734	1.756	161.573

3. 2 復原力計算結果

提供された船型データ (付録 2、付録 3) を使用して事故発生時の復原力計算を行った結果を表 3-5 及び表 3-6 並びに図 3-2 及び図 3-3 に示す。表 3-5 には船首喫水と船尾喫水 (付録 1) から計算した排水量と重心の前後位置を記載している。また、表 3-6 に示した横揺れ固有周期の導出には(3-1)式を用いている。

$$\frac{K}{B} = \frac{T_s \sqrt{G_0 M}}{2.01 B} = 0.478 \quad (3-1)$$

$$T_s = \frac{2.01 \times 0.478 \times B}{\sqrt{G_0 M}}$$

ここで、 T_s : 横揺れ固有周期、 K :横揺れ慣動半径、 B : 船幅、 $G_0 M$:燃料タンク等の自由水による見かけの重心上昇を考慮したメタセンタ高さである。

図 3-2 には海水の流入点として甲板室出入り口、機関室非常脱出口、機関室天窓、機関室ファン (左舷側及び右舷側) の 5 つを設定した場合の海水流入角も示す。図 3-3 にはブルワーク上端の没水角を示す。表 3-7、表 3-8 に海水流入角点座標及び海水流入角とブルワーク上端座標及びブルワーク没水角をまとめて示した。

表 3-5 事故発生時の状態

排水量	104.138	ton
重心の前後位置	-0.855	m
重心の上下位置	1.756	m
船尾喫水	1.875	m
船首喫水	1.500	m
平均喫水	1.688	m

表 3-6 事故発生時の復原性及び横揺れ固有周期

メタセンター高さ	0.877	m
復原力の最大値	0.164	m
復原力の最大値が生じる傾斜角	17.0	deg.
復原力消失角	43.9	deg.
横揺れ固有周期	5.540	s

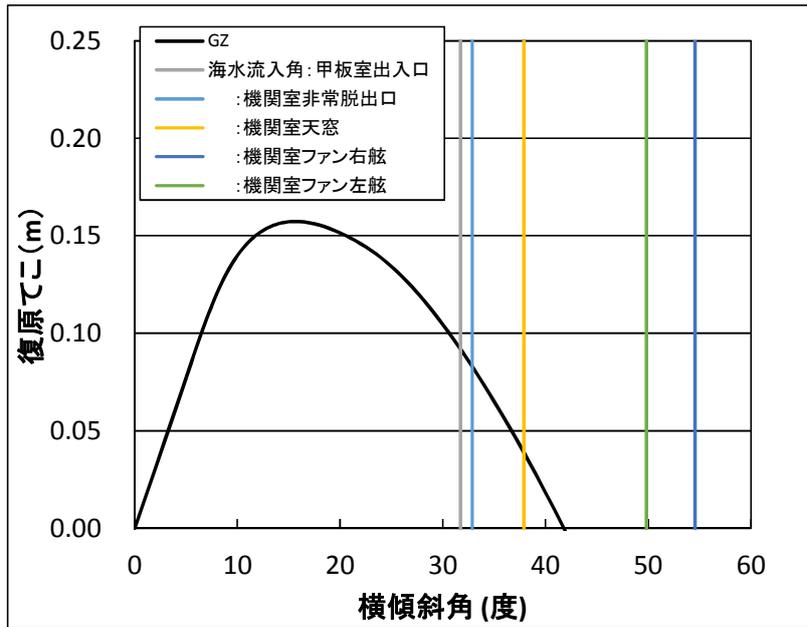


図 3-2 事故発生時での GZ 曲線と海水流入角（対象船）

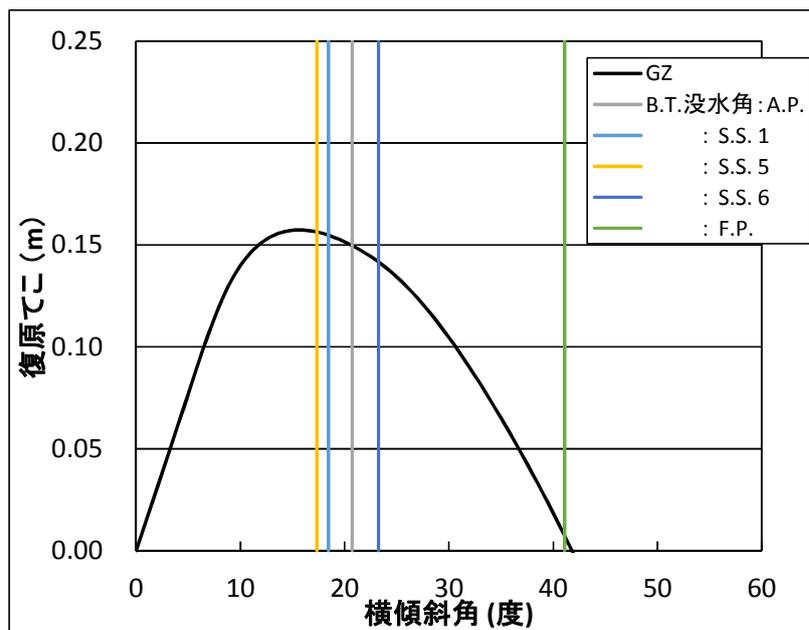


図 3-3 事故発生時での GZ 曲線とブルワーク没水角（対象船）

表 3-7 海水流入点座標及び海水流入角

	X(m) (fromAP)	Y(m) (fromCL)	Z(m) (fromBL)	ϕ_w (deg.)
甲板室出入り口	9.65	1.11	2.56	31.73
機関室非常脱出口	7.50	1.55	3.02	32.88
機関室天窓	7.25	1.20	3.11	37.88
機関室ファン右舷	7.25	0.53	3.62	54.57
機関室ファン左舷	6.75	0.80	3.62	49.83

表 3-8 ブルワーク上端座標及びブルワーク没水角

	X(m) (fromAP)	Y(m) (fromCL)	Z(m) (fromBL)	ϕ_b (deg.)
A.P	0.000	2.700	3.096	20.73
S.S. 1	1.400	2.700	2.872	18.44
S.S. 5	7.000	2.700	2.600	17.32
S.S. 6	8.400	2.700	2.944	23.25
F.P	14.000	2.700	4.140	41.09

表 3-9 横揺れ減衰力係数

N_{10}	0.0381
N_{20}	0.0368
a	0.026
b	0.0355
κ	0.01655
β	1.5255

事故発生時での対象船のメタセンタ高さ GM は 0.877m であり、海水流入角は甲板室出入り口を海水流入点とした場合が最も小さく約 31.7 度である。ブルワーク上端角没水角は約 17.3 度である。但し、復原力の計算にブルワークは含まれていない。

なお、表 3-9 に 6 章で波浪による横揺れの推定に使用する横揺れ減衰力係数について示す。

4. 事故当時の曳航状態の推定

4. 1 計算条件

(1) バージの概要

対象バージの主要目を表 4-1 に、一般配置図を図 4-1 に示す。 $L/B=2.8$ とやや幅広のバージで船首部カットアップ角度は 18deg、船尾には 2 枚のスケグを有している。なお、事故当時の喫水は 0.5m で浅喫水状態である。

表4-1 バージの主要目

LENGTH (O.A) L _{OA}	65.00m
BREADTH B	23.00m
DEPTH D	3.50m

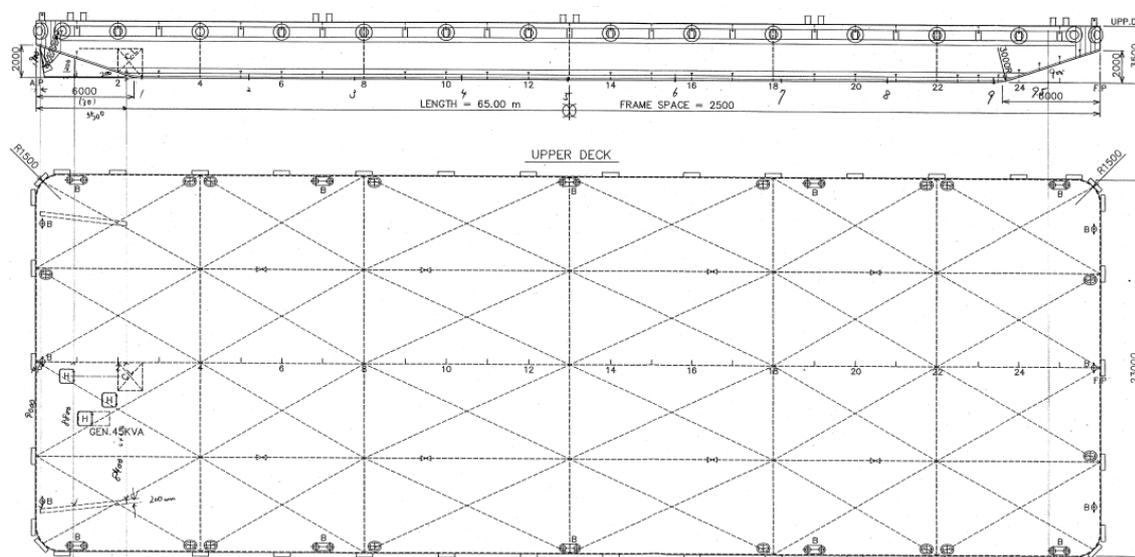


図4-1 バージの一般配置図

(2) バージの重量重心計算

事故発生当時のバージの積載物である船体ブロック 11 個を含む重量重心計算を行った。積載物の配置を図 4-2 に、重量重心計算結果を表 4-2 に示す。事故発生時の重心位置は船首尾方向 $L_{CG}=2.30m$ (船体中心から船尾側へ 2.3m) , 重心高さ $KG=1.38m$ とする。曳航点から重心までの距離は 34.8m である。

表4-2 バージの重量重心計算表

CONDITION	(+)AP側				
	LIGHT CONDITION				
ITEM	WEIGHT(t)	Mid.G.(m)	Mid.G Moment (t-m)	KG(m)	KG Moment (t-m)
HULL WEIGHT					
LIGHT WEIGHT	571.43	3.14	1794.278	0.5	285.71
SUB TOTAL	571.43	3.14	1794.278	0.5	285.71
CARGO					
CD-21	20.00	26.675	533.50	4.64	92.80
BR-3F	10.20	13.825	141.02	4.64	47.33
CD-3	8.70	13.825	32.29	4.64	40.37
BD-3F	12.10	3.712	0.00	4.64	56.14
BR-2	13.30	3.712	49.37	4.64	61.71
CD-2	11.00	3.712	40.83	6.92	76.12
BD-3A	16.70	-10.600	-177.02	4.64	77.49
BD-21	18.80	-10.600	-199.28	4.64	87.23
BR-21	9.00	-10.600	-95.40	6.92	62.28
BR-3A	11.80	-24.625	-290.58	4.64	54.75
BD-2	8.00	-24.625	-197.00	4.64	37.12
SUB TOTAL	139.60	-1.16	-162.264	4.97	693.34
LIGHT WEIGHT	571.43	3.14	1794.28	0.50	285.71
DEAD WEIGHT	139.60	-1.16	-162.26	4.97	693.34
DISPLACEMENT	711.03	2.30	1632.01	1.38	979.06

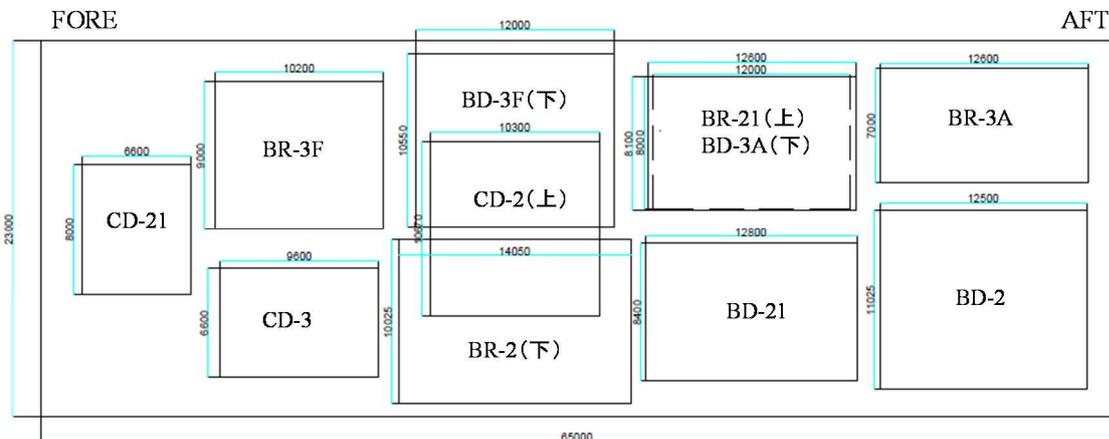


図4-2 積載物の配置図

(3) バージの横揺れ減衰力

バージの横揺れ減衰力は池田の成分分離法¹⁾を用いて推定し、N係数で0.0247とした。

(4) バージの横揺れ固有周期と環動半径

バージの横揺れ固有周期 T_ϕ は(4-1)式で推定した。

$$T_\phi = \frac{2\pi\kappa_{xx}}{\sqrt{gGM}} \quad (4-1)$$

ここで、 κ_{xx} は環動半径、GMはメタセンタ高さで96.807mである。バージの環動半径 κ_{xx} を幅 B で割った環動半径係数 $c = \kappa_{xx}/B = 0.40 \sim 0.45$ とすると、バージの横揺れ固有周期は1.9~2.1sと推定される。ここでは $T_\phi = 2.0$ sとし、環動半径係数は $c=0.426$ とした。

(5) バージの船体抵抗係数

バージの船体抵抗 X_H を求める。図 4-3 に船首部のカットアップ長さ L_E と喫水 d の比率 L_E/d で整理されたバージの船体抵抗係数 C_r を示す²⁾。なお、船体抵抗係数 C_r と船体抵抗 $X_H (= R_T)$ の関係は(4-2)式に示す。対象船の船首部カットアップ長さ $L_E=6.0\text{m}$ 、喫水 $d=0.5\text{m}$ であり、 $L_E/d=12$ となるため範囲外であるが、船速 4kn のフルード数 $F_n=0.082$ での C_r を 0.1 とした。

$$X_H = R_T = C_r \frac{1}{2} \rho B d U^2 \quad (4-2)$$

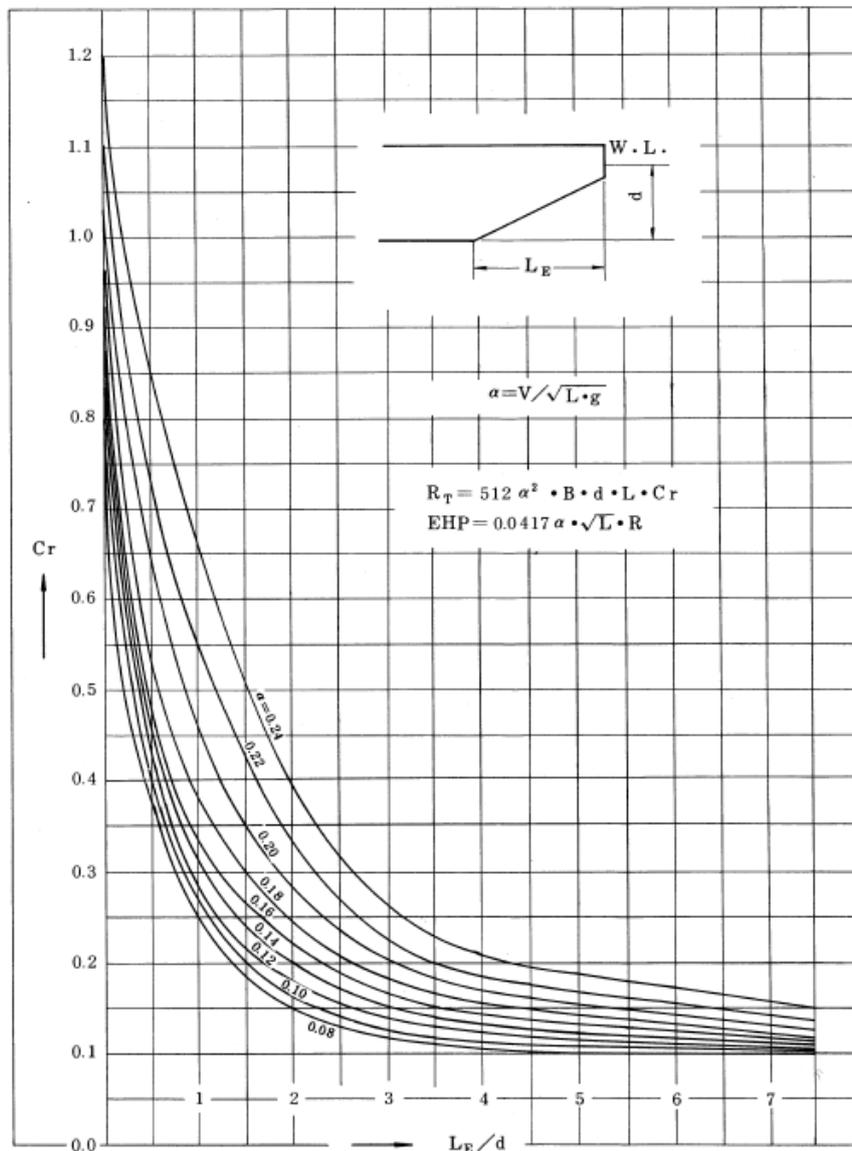


図4-3 バージの船体抵抗係数

(6) 曳航索

曳航索は材質がポリプロピレンのベルラインサザンクロスロープ（索径 $\phi=55\text{mm}$ ）である。事故発生当時、曳航索は曳船から 200m 繰出していた。単位重量 $DW=1.48\text{kg/m}$ 、破断荷重は 34,490kgf

(NK 規格) である。求めた曳航索のヤング率とばね定数を表 4-3 に示す。索の伸度は図 4-4 に示す強伸度曲線より 17.5%とした。

表4-3 曳航索のばね定数

索長	RL	200	m
単位重量	DW	1.48	kg/m
破断荷重	TF	34490	kgf (NK)
径	ϕ	55	mm
断面積	S	0.00237583	m ²
伸度	$\Delta RL/RL$	17.5	%
ヤング率	E	82,953,997	kgf/m ²
KK=E・S/L			
ばね定数	KK	985.423	kgf/m
KK=TF/ ΔL			
ばね定数	KK	985.423	kgf/m

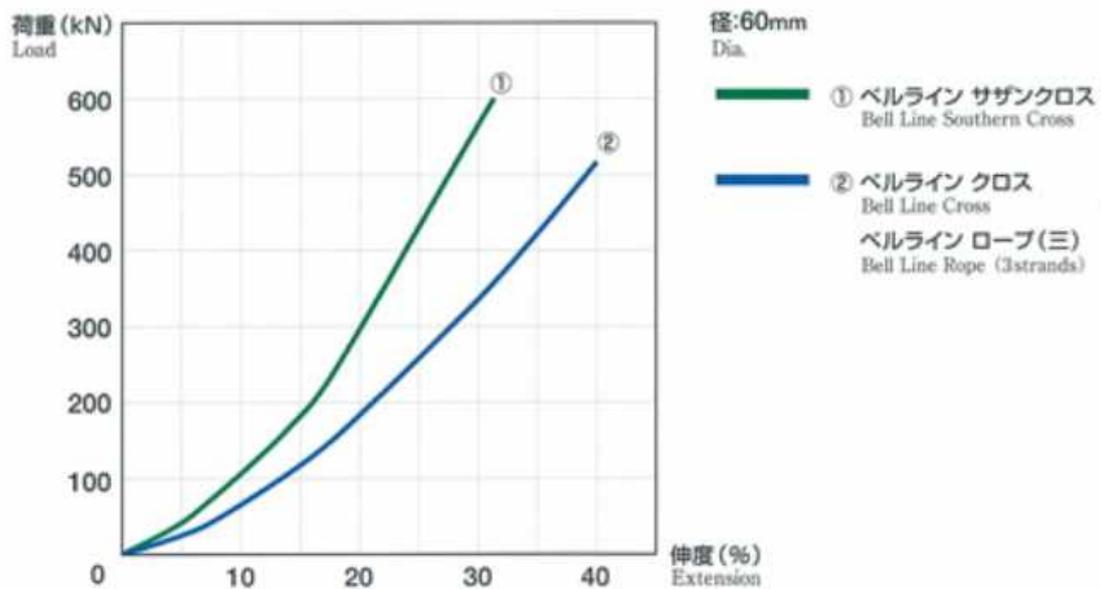


図4-4 ベルラインロープの強伸度曲線

(7) 風圧面積

風圧力の計算は藤原ら³⁾の回帰分析による風圧力推定式を用いて行った。積載物は図 4-5（側面図）、図 4-6（正面図）に示すように、1つの構造物として計算した。計算に必要なバージの風圧面積等のパラメータを表 4-4 に示す。バージには船体ブロック 11 個を搭載しており、風圧面積等には積載物も含まれている。

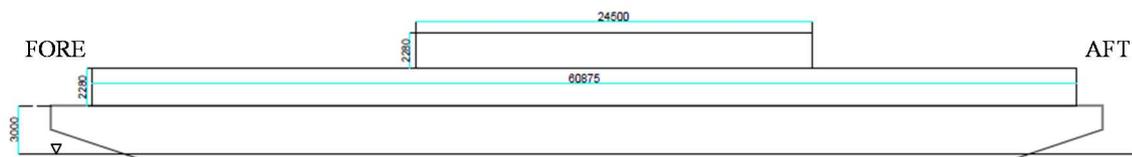


図4-5 バージの側面図

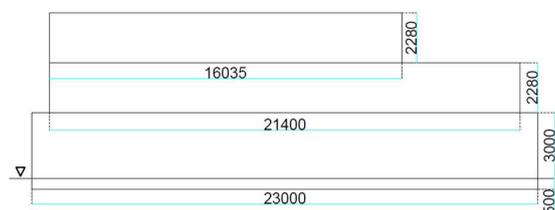


図4-6 バージの正面図

表4-4 バージの風圧面積

A_T [m ²]	正面投影面積	154.35
A_L [m ²]	側面投影面積	195.0
A_{OD} [m ²]	上部構造物投影面積	194.7
C [m]	船体中央から側面投影面積中心までの距離	-0.46 (aft)
C_{BR} [m]	船体中央から上部構造物の側面投影面積中心までの距離	-0.97 (aft)
H_{BR} [m]	上部構造物高さ	7.56
H_C [m]	側面投影面積中心の高さ	3.15

(8) 曳航速度

事故当時の曳航速度は 4kn 及び 5kn とした。

4. 2 バージに働く力の推定

曳航速度 $U=4\text{kn}$ 、波高 $H_W=3.0\text{m}$ 、波周期 $T_W=6.97\text{s}$ 、風速 $V=17.0\text{m/s}$ でのバージに働く力を推定する。バージに働く抵抗、波漂流力及び風圧力を計算し、バージに働くおおよその力を求める。

(曳航速度 $U=5\text{kn}$ の場合の計算結果は、煩雑なため省略する。)

(1) 平水中でのバージの抵抗

表 4-5 に対象バージの船体抵抗 X_H を $C_r=0.1$ (4.1 (5) 参照) として計算した結果を示す。曳航速度 4kn の時のバージの X_H は 254.4kgf である。

表4-5 バージの船体抵抗

U[kn]	U[m/s]	Fn	Cr	X_H [kgf]
4.0	2.058	0.082	0.100	254.4

(2) 波漂流力の推定

バージに働く規則波中の流体力を 3 次元特異点分布法で求め、波漂流力を丸尾の推定式⁴⁾で求めた。自動メッシュ作成プログラムを用いてバージの船体表面上に流体力計算のためのメッシュを作成した。作成したバージのメッシュを図 4-7 に示す。波漂流力の座標の定義を図 4-8 に示す。求めた波漂流力 X_w 、 Y_w は(4-3)式で無次元化した値を波漂流力係数 X_w' 、 Y_w' とする。波向き 0deg から 180deg までの X、Y 方向の波漂流力係数 X_w' 、 Y_w' を図 4-9、4-10 に、波高 3.0m での有次元値 X_w 、 Y_w を図 4-11、4-12 に示す。

$$X_w' = \frac{X_w}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a^2}$$

(4-3)

$$Y_w' = \frac{Y_w}{\frac{1}{2}\rho g \zeta_a^2}$$

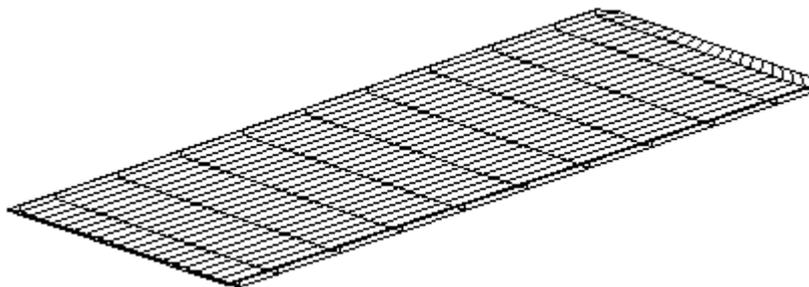


図4-7 バージの計算メッシュ (d=0.5m)

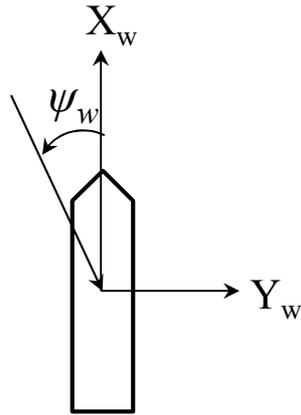


図4-8 波漂流力の座標系

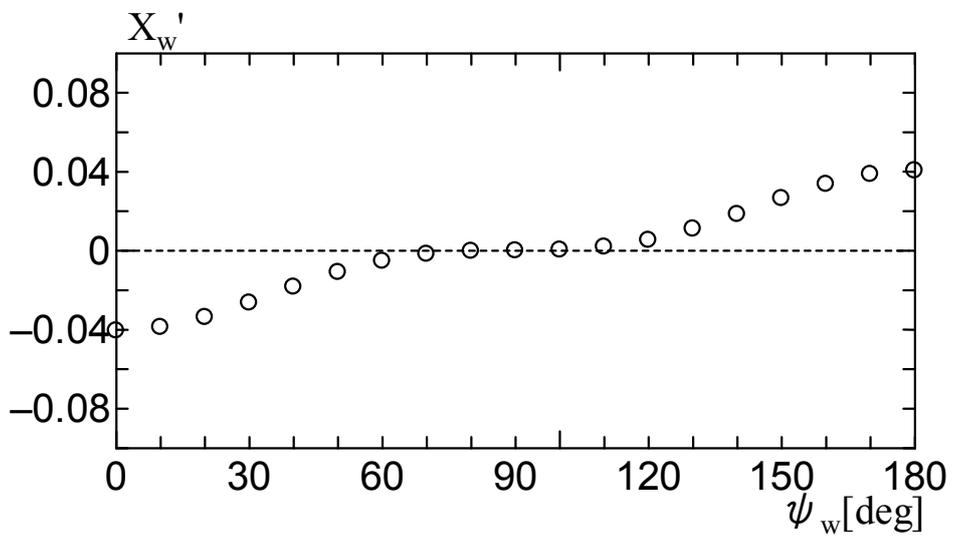


図4-9 X方向の波漂流力係数

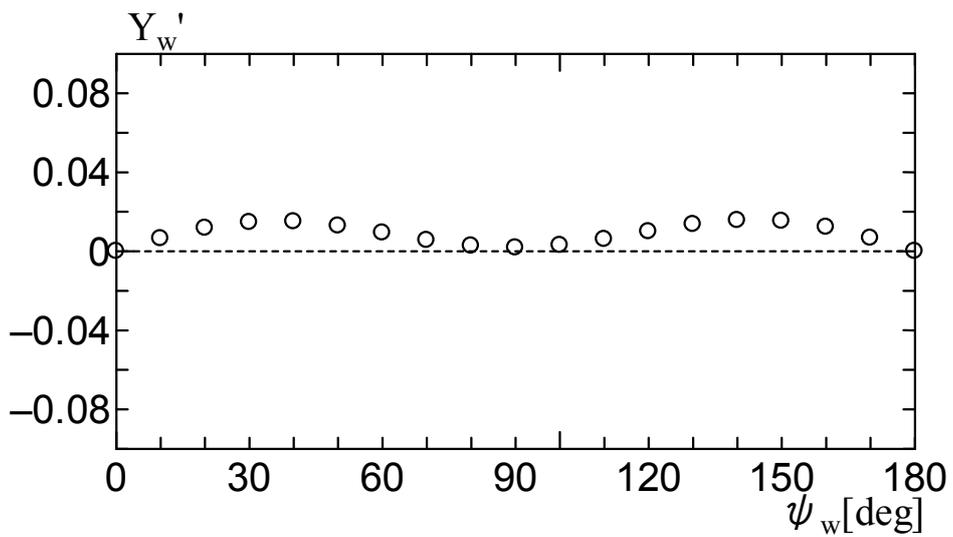


図4-10 Y方向の波漂流力係数

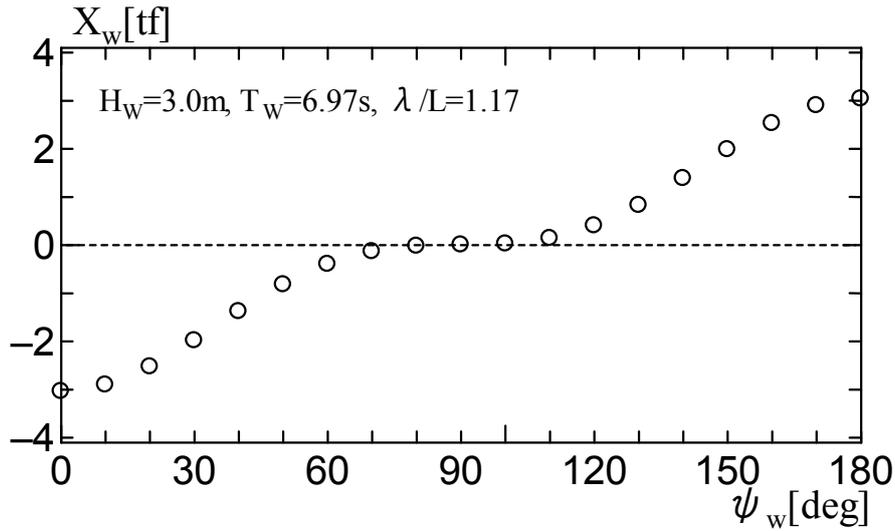


図4-11 X方向の波漂流力($H_w=3m$)

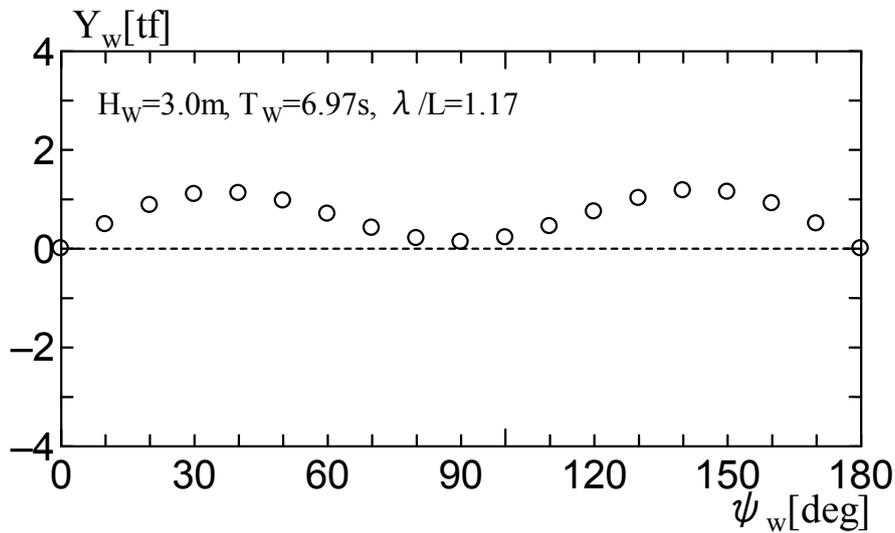


図4-12 Y方向の波漂流力($H_w=3m$)

(3) 風圧力の推定

バージに働く風圧力を藤原ら³⁾の回帰分析による風圧力推定式を用いて計算した。風圧力の座標系を図4-13に示す。求めた風圧力 X_a 、 Y_a を(4-4)式で無次元化した値を風圧力係数 X_a' 、 Y_a' とする。なお、推定時に用いた風圧面積等推定に必要なパラメータは4.1(7)に示す。

風向0degから180degまでのX、Y方向の風圧力係数 X_a' 、 Y_a' を図4-14、4-15に、風速17m/sでの有次元値を図4-16、4-17に示す。

$$X_a' = \frac{X_a}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_T} \quad (4-4)$$

$$Y_{a'} = \frac{Y_a}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_L}$$

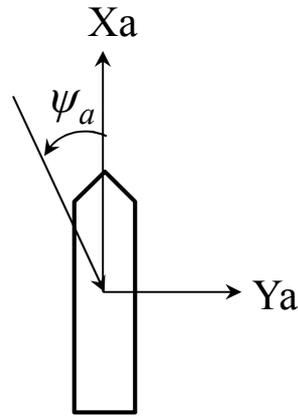


図4-13 風圧力の座標系

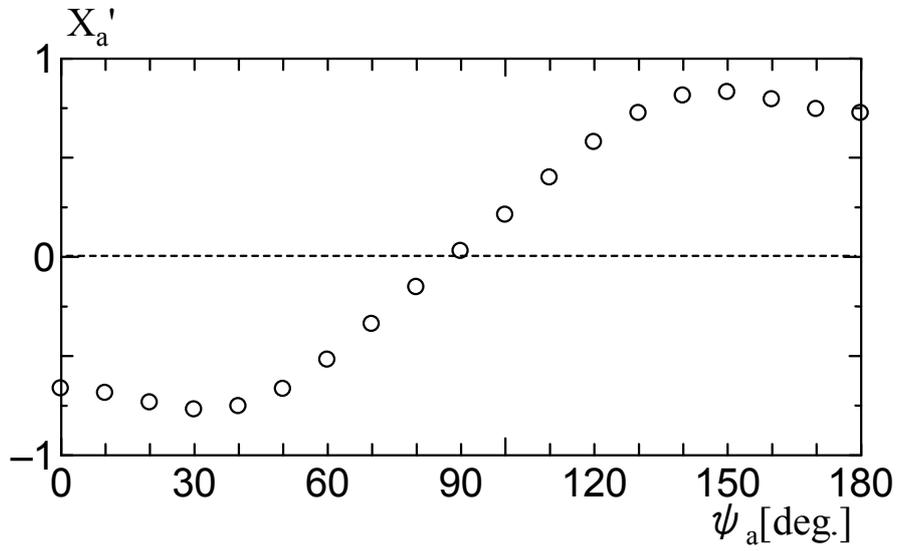


図4-14 X方向の風圧力係数

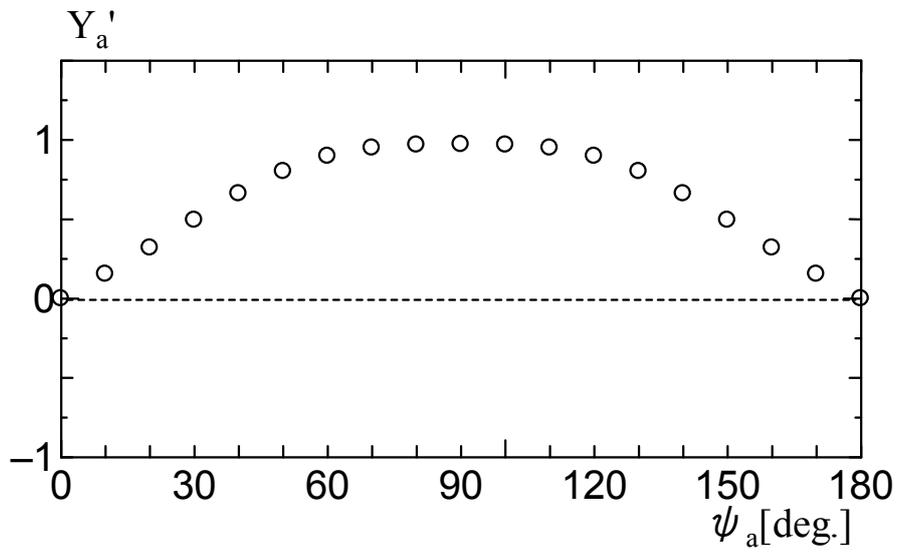


図4-15 Y方向の風圧力係数

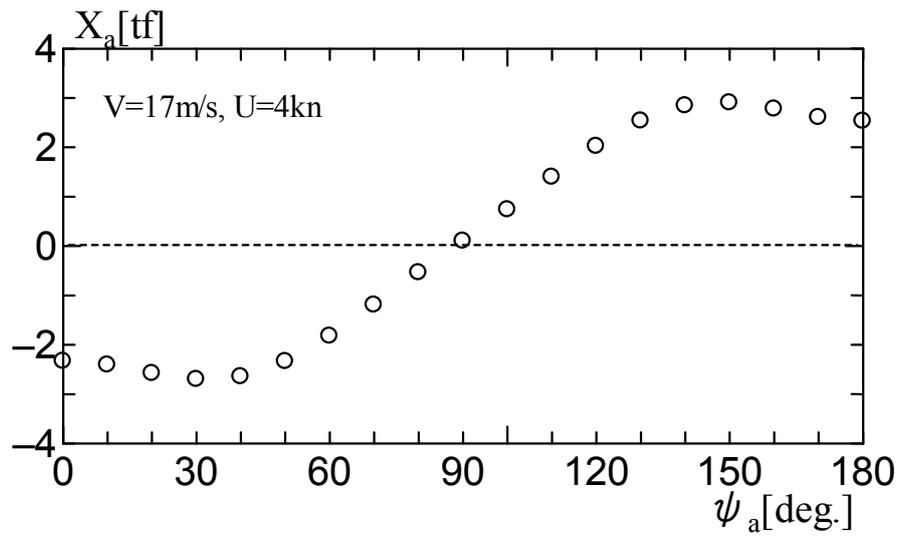


図4-16 風速 17m/s での X 方向の風圧力

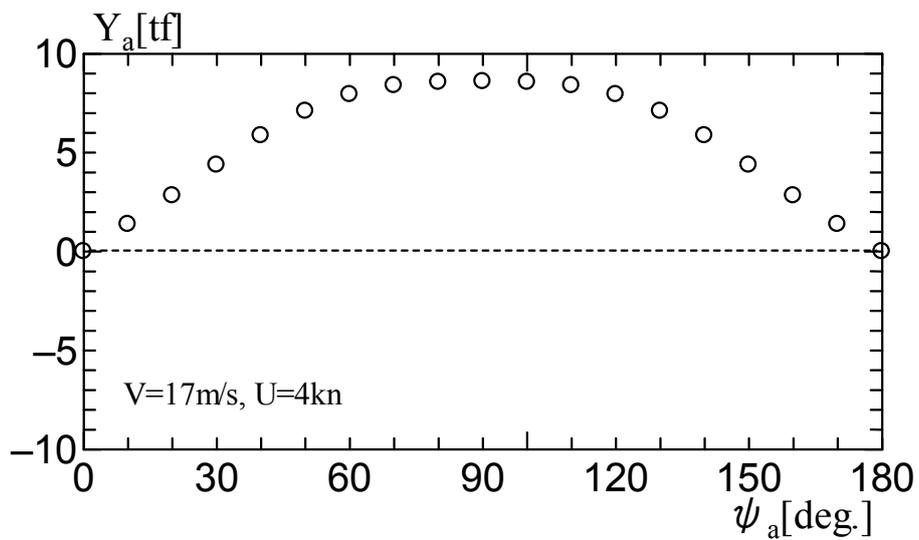


図4-17 風速 17m/s での Y 方向の風圧力

4. 3 曳航時の曳航索張力の挙動推定

4. 3. 1 曳船・被曳船の挙動と索張力計算法

曳船・被曳船の曳航時の挙動と索張力を、当所で開発した最適曳航支援システム⁵⁾を用いて計算した。本システムは曳船・被曳船の操縦運動計算プログラムで、MMGモデルをベースにした曳船-被曳船系の連成運動方程式で計算している。曳船・被曳船の外力項は船体に働く流体力、波、風、索張力による成分が加わる。バージに働く流体力は4.2(2)で述べたとおり3次元特異点分布法で、波による成分は規則波中の定常流体力(波漂流力)を丸尾の推定式⁴⁾で、波漂流モーメントをNewmanの推定式⁶⁾で与えている。風による成分は4.2(3)に述べた藤原ら³⁾の回帰分析による風圧力推定式を用いて与えている。また、操縦微係数は貴島の近似式⁷⁾を用いて推定しており、このうち直進中の船体抵抗係数 X'_{uu} は4.2(1)で求めた値である。曳航索張力は空中でカタナリー曲線を形成すると仮定して、曳航索の伸びを考慮した曳航索長さと曳船・被曳船の曳航点間距離の関係式⁸⁾で推定する。

4. 3. 2 曳航方向の設定

曳航計算時の曳航方向と風と波との出会角を設定する。風と波の向きは2章で示したとおり波向224deg.、風向234deg.で10deg.の差がある。事故発生時にタグボート(曳船)が南から南南西に針路をとっていた場合、波との出会角は図4-18に示すように左舷20deg.から40deg.になる。そこで、波との出会角を0から40deg.の範囲とし、10deg.毎に曳航方向を変化させて計算する。なお、風との出会角は波との出会角に10deg.足した値となる。

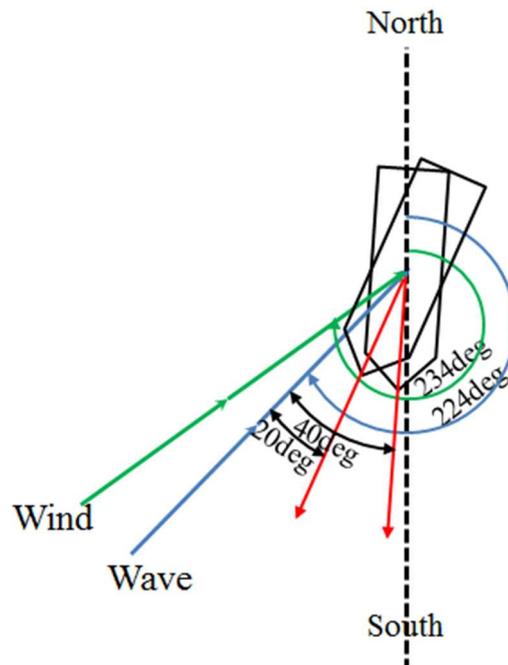


図4-18 波・風との出会角(タグボートの針路が南から南南西の場合)

4. 3. 3 計算結果

波高3.0m、波周期6.97s、風速17m/s、相対角0~40deg.の10deg.刻み、曳航速度4kn、5knで曳航した場合の計算結果を表4-6、4-7に示す。表中には曳航状態と索張力T及び曳船被曳船の位置から算出した索方向 θ (横引き角:図4-19参照)を示している。曳航状態は安定、振れまわり、不安定の3状態で表わしており、図4-20に曳航状態が安定している場合の曳船・被曳船の軌跡を

上段に、曳航索張力を下段に示す。なお、上段の軌跡の図は x 方向と y 方向の縮尺が異なることに留意が必要である。同様に図 4-21 に振れまわりを起こしている場合を、図 4-22 に曳航状態が不安定な場合を示す。振れまわりを起こしている場合は軌跡と索張力の変動は規則的であるが、不安定な場合は被曳船の軌跡と索張力の変動が不安定であり、船体抵抗、波漂流力、風圧力の力の釣り合い点が定まらない状態であると推測される。表 4-6、4-7 の曳航方向毎の結果で曳航状態が安定の場合は索張力及び索方向の定常値と最大値を、振れまわりの場合は索張力と索方向の平均値と最大値及び振れまわりの振れ幅を示している。

表4-6 波高 3.0m、風速 17m/s、船速 4kn での索張力と索方向（横引き角）

	曳航状態	索張力T[tf]			索方向 θ [deg]			振れまわり振れ幅
		定常	平均	最大	定常	平均	最大	
4kn-0deg	安定	5.511	-	5.604	3.74	-	0.36	-
4kn-10deg	安定	5.495	-	5.985	10.01	-	10.62	-
4kn-20deg	振れまわり	-	5.423	13.248	-	17.40	17.94	20.8
4kn-30deg	不安定	-	5.649	26.451	-	18.12	22.34	-
4kn-40deg	不安定	-	5.655	32.062	-	24.65	14.91	-

表4-7 波高 3.0m、風速 17m/s、船速 5kn での索張力と索方向（横引き角）

	曳航状態	索張力T[tf]			索方向 θ [deg]			振れまわり振れ幅
		定常	平均	最大	定常	平均	最大	
5kn-0deg	振れまわり	-	6.883	9.881	-	3.08	3.79	3.8
5kn-10deg	安定	5.608	-	6.177	8.55	-	9.67	-
5kn-20deg	安定	5.608	-	6.602	14.36	-	16.00	-
5kn-30deg	振れまわり	-	5.388	7.319	-	21.27	24.18	21.8
5kn-40deg	安定	5.293	-	5.834	25.85	-	25.85	-

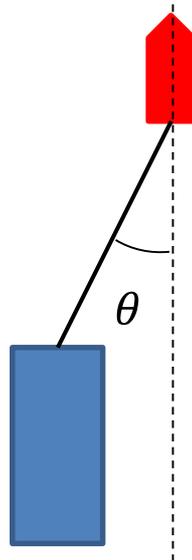


図4-19 索方向 θ の定義

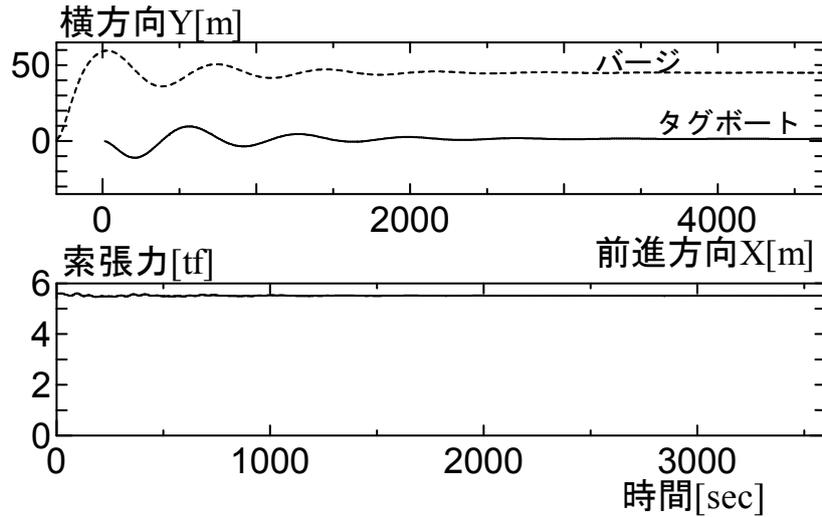


図4-20 曳航状態が安定の場合 (5kn-10deg)

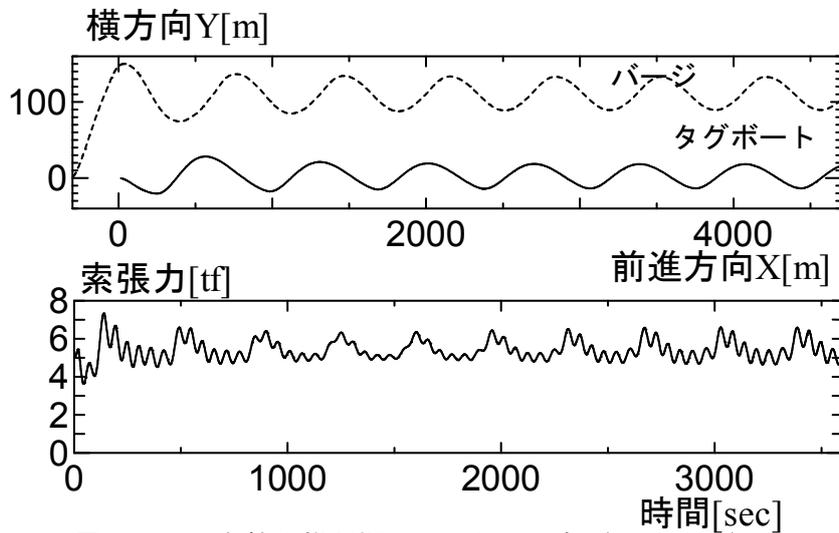


図4-21 曳航状態が振れまわりの場合 (5kn-30deg)

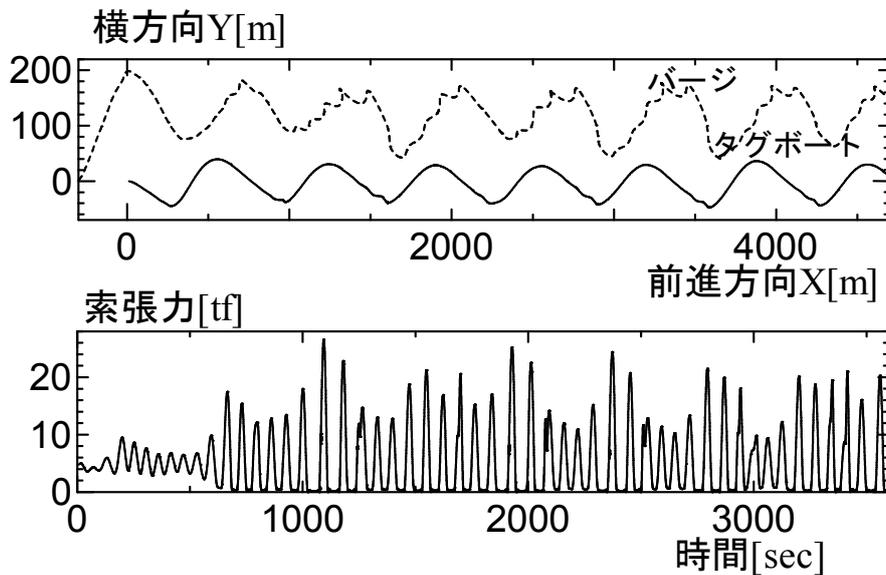


図4-22 曳航状態が不安定の場合 (4kn-30deg)

船速 4kn (表 4-6) で波に向かって曳航した場合 (波との出会角 0deg、風との出会角-10deg)、安定した曳航ができており、索張力は 5.5tf 程度である。波との出会角が 10deg. で曳航した場合も安定しており、索張力は 5.5-6.0tf 程度である。しかし、波との出会角が 20deg. になると被曳船が振れまわりを起し、索張力の最大値が 13tf になる。これ以上波との出会角が大きくなると、曳航状態が不安定となり、正確な解が得られていない (索張力が過大となっている)。船速 5kn の場合 (表 4-7)、安定した曳航状態では索張力は約 6tf、振れまわりを起こす場合は最大約 10tf 程度になる。

求めた索張力の大きさの妥当性を確認するために、船速 4kn 及び 5kn でのバージに働く船体抵抗 X_H 、波漂流力 X_W 、 Y_W 、風圧力 X_A 、 Y_A の合力 F_T を計算した結果を表 4-8、4-9 に示す。ただし、ここでは風と波の向きは同じとして、曳航方向 β を変化させている。船速 4kn で波と風との出会角が 0deg. の場合 ($\beta = 0$) でのバージに働く合力 F_T は 5.6tf、 $\beta = 10deg.$ での合力 F_T は 5.9tf となり、曳航計算で求めた索張力とほぼ同じであることが確認できる。

曳航計算では波との出会角 20deg. で振れまわりを起しているため、振れまわり中に船が横引きになった場合の合力を表の最下段 ($\beta=90deg$) に示す。なお、横引き中での船体抵抗は (4-5) 式で求めることとし、式中の抗力係数 C_D は 1.0 とする。合力は 4kn で 11.2tf、5kn で 14.6tf となり安定した曳航時の索張力の約 2 倍になっている。曳航計算では振れまわりを起した時の最大索張力が約 13tf であり、バージに働く合力より若干大きい、振れまわり現象時の索張力変動をとらえていると確認できる。

これより波高 3.0m、風速 17m/s、波との相対角 0~40deg. (風は 10~50deg.) での風波浪下で曳航速度 4, 5kn で曳航時に振れまわりを起さなければ、索張力 6tf 程度で曳航が可能であるが、振れまわりが発生した場合、索張力が 11~13tf 程度になる可能性がある。

表4-8 船速 4kn でのバージに働く力の合力の計算

曳航方向	船体抵抗	波漂流力		風		X,Yの力の和		合力	力の方向
β	X_H [tf]	X_w [tf]	Y_w [tf]	X_A [tf]	Y_A [tf]	F_x [tf]	F_y [tf]	F_T [tf]	θ
0	-0.254	-3.036	0.000	-2.330	0.000	-5.621	0.000	5.62	0
10	-0.254	-2.901	0.488	-2.407	1.371	-5.563	1.860	5.87	18.5
20	-0.254	-2.524	0.879	-2.579	2.831	-5.357	3.710	6.52	34.7
30	-0.254	-1.982	1.100	-2.701	4.370	-4.937	5.470	7.37	47.9
40	-0.254	-1.379	1.122	-2.642	5.856	-4.275	6.978	8.18	58.5
50	-0.254	-0.822	0.968	-2.337	7.095	-3.414	8.062	8.76	67.1
60	-0.254	-0.394	0.702	-1.822	7.944	-2.471	8.646	8.99	74.1
70	-0.254	-0.132	0.418	-1.191	8.395	-1.578	8.813	8.95	79.9
80	-0.254	-0.019	0.206	-0.540	8.563	-0.813	8.769	8.81	84.7
90	-7.191	0.005	0.133	0.101	8.599	-7.085	8.732	11.24	50.9

表4-9 船速 5kn でのバージに働く力の合力の計算

曳航方向	船体抵抗	波漂流力		風		X,Yの力の和		合力	力の方向
β	X_H [tf]	X_w [tf]	Y_w [tf]	X_A [tf]	Y_A [tf]	F_x [tf]	F_y [tf]	F_T [tf]	θ
0	-0.398	-3.036	0.000	-2.533	0.000	-5.967	0.000	5.97	0
10	-0.398	-2.901	0.488	-2.617	1.491	-5.916	1.979	6.24	18.5
20	-0.398	-2.524	0.879	-2.804	3.078	-5.726	3.957	6.96	34.6
30	-0.398	-1.982	1.100	-2.937	4.751	-5.316	5.851	7.91	47.7
40	-0.398	-1.379	1.122	-2.872	6.367	-4.648	7.489	8.81	58.2
50	-0.398	-0.822	0.968	-2.541	7.714	-3.761	8.681	9.46	66.6
60	-0.398	-0.394	0.702	-1.981	8.637	-2.773	9.339	9.74	73.5
70	-0.398	-0.132	0.418	-1.295	9.128	-1.825	9.545	9.72	79.2
80	-0.398	-0.019	0.206	-0.587	9.310	-1.003	9.516	9.57	84.0
90	-11.235	0.005	0.133	0.109	9.349	-11.121	9.482	14.61	40.5

$$X_{H(\beta=90\text{deg})} = C_D \frac{1}{2} \rho L d U^2 \quad (4-5)$$

4. 4 曳船の曳航能力

バージを曳航していたタグボートはヤンマー6RY17P-EV を 2 基搭載していた。最大回転数は 1,500rpm、出力は 625.0kw (850PS) である。曳引力を 1tf/100PS とすると、対象船の曳引力は約 16tf 程度と推測される。対象船の通常曳航時は出力 3/4、回転数 1,200rpm で航行しており、事故当時も同様とすると曳引力は約 12tf 程度で、これより自船の抵抗を引いた値が曳航力となるためさらに小さくなる。

曳航計算の結果、波高 3.0m、風速 17.0m/s 下で波との出会角が 20deg.以上になるとバージが振れまわり、索張力は 11~13tf 程度になる。この場合、通常の出力量では曳航は困難である。

5. 台船の曳航に伴う横傾斜角の推定

4章で報告した引船Aと台船との位置関係から推定される索張力及び横引き角と3章で示した事故発生時の対象船の復原力から台船の曳航に伴う横傾斜角を推定した。

曳航に伴う横傾斜は、波高・風速を1パターン（波高3.0m+風速17m/s）、波向を320度から360度まで5パターン、船速を2パターン（4kn、5kn）設定して計算した。曳航索張力の着点である曳航フックの回転軸の位置座標、モーメントレバーについては表5-1のとおりである。

表5-2、表5-3に索張力T、索方向（横引き角） θ 、索張力による傾斜偶力てこ及び索張力の定常値又は平均値に対応する横傾斜角（左舷側）を示す。

表5-1 曳航フックの位置座標及びモーメントレバー（上段：前後方向、下段：上下方向）

曳航フック回転軸座標		
X	-2500	mm
Z	3664	mm
重心座標		
X	-855	mm
Z	1756	mm
曳航索張力のモーメントレバー		
X	-1645	mm
Z	1908	mm

表5-2 船速4kn、波高3m、風速17m/s時の各波向での曳航による傾斜偶力及び横傾斜角（上段：定常値又は平均値、下段：最大値）

波高		3.00	m		
風速		17.00	m/s		
船速		4.00	kn		
	索張力 T(tf)	索方向 θ (deg)	傾斜偶力 てこ(mm)	傾斜偶力 てこ(m)	横傾斜角 (deg.)
4kn-360deg	5.511	3.74	6.586	0.007	0.43
安定	5.604	0.36	0.645	0.001	
4kn-350deg	5.495	10.01	17.500	0.017	1.14
安定	5.985	10.62	20.209	0.020	
4kn-340deg	5.423	18.40	31.363	0.031	2.05
振れまわり	13.248	17.94	74.765	0.075	
4kn-330deg	5.649	18.12	32.189	0.032	2.10
不安定	26.451	22.34	184.209	0.184	
4kn-320deg	5.655	24.65	43.213	0.043	2.82
不安定	32.062	14.91	151.148	0.151	

表 5-3 船速 5kn、波高 3m、風速 17m/s 時の各波向での曳航による傾斜偶力及び横傾斜角
 (上段：定常値又は平均値、下段：最大値)

船速	3.00	m
風速	17.00	m/s
船速	5.00	kn

	索張力 T(tf)	索方向 θ (deg)	傾斜偶力 てこ (mm)	傾斜偶力 てこ (m)	横傾斜角 (deg.)
5kn-360deg	6.883	3.08	6.764	0.007	0.44
振れまわり	9.881	3.79	11.953	0.012	
5kn-350deg	5.760	8.55	15.663	0.016	1.02
安定	6.177	9.67	18.975	0.019	
5kn-340deg	5.608	14.36	25.442	0.025	1.66
安定	6.602	16.00	33.291	0.033	
5kn-330deg	5.388	21.27	35.750	0.036	2.33
振れまわり	7.319	24.18	54.829	0.055	
5kn-320deg	5.293	25.85	42.208	0.042	2.75
安定	5.834	25.85	46.526	0.047	

図 5-1、図 5-2 に曳航索張力による傾斜外力と復原力を比較して示す。事故発生時の状態では、船速 5kn、波高 3m、風速 17m/s の状況で曳航した場合、横傾斜角は波向が 320 度（船首から右舷 40 度方向から波を受ける状態）で約 3 度程度に達すると推定される（表 5-3）。なお、船速 4kn、5kn で曳航索張力による横傾斜角は大きく変わることは無い（表 5-2、表 5-3）。

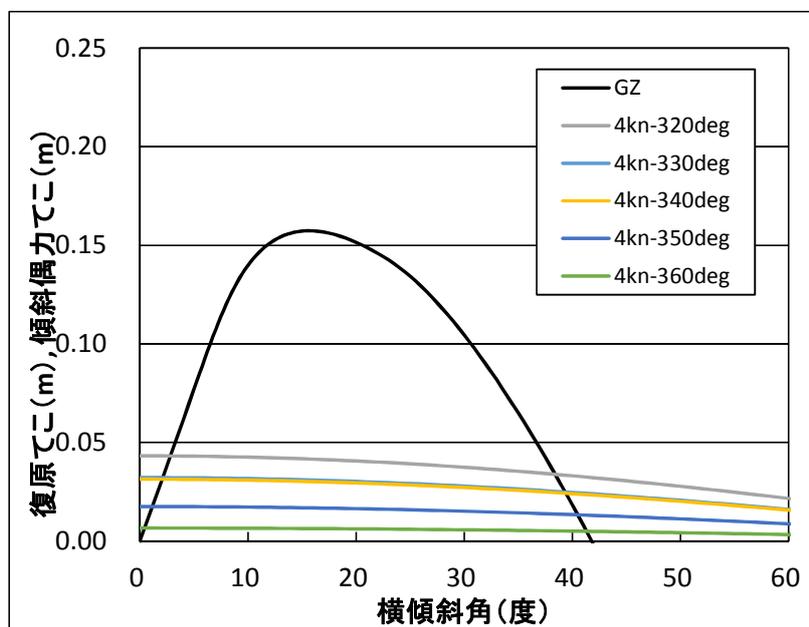


図 5-1 曳航による傾斜偶力てこ（船速 4kn）

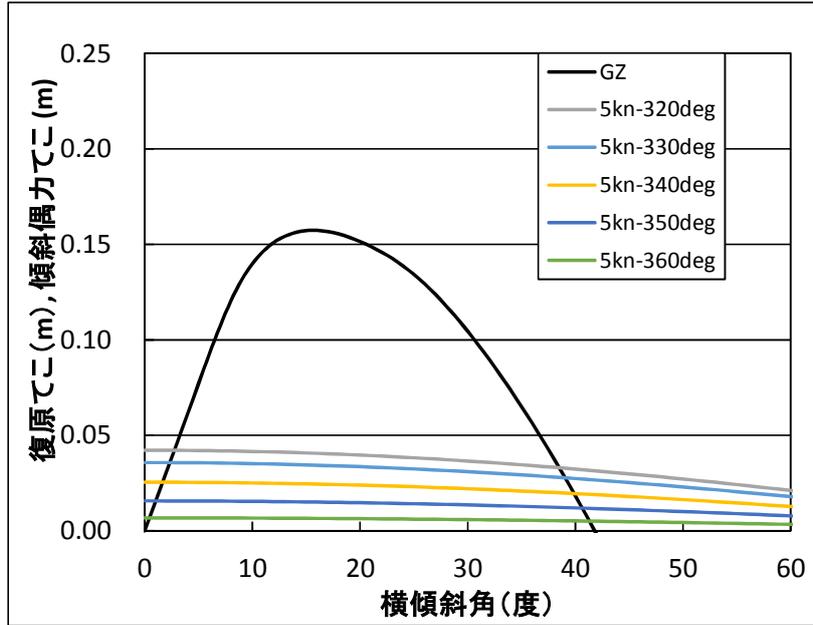


図 5-2 曳航による傾斜偶力てこ(船速 5kn)

6. 事故当時の風及び波浪による横傾斜角（横揺れ角）の推定

6. 1 風による横傾斜

風による横傾斜角の推定に必要な喫水線上投影面積については、同型船の喫水線上投影面積計算書から差異を差し引きして求めた（表 6-1）。

表 6-1 事故発生時の喫水線上投影面積

	No.	面積 (m ²)	1.5WL上高さ(m) (同型船)	1.5WL上高さ(m) (対象船)	面積モーメント (m ³)
上甲板下	No.1	4.970	0.320	0.320	1.590
	No.2	4.240	0.280	0.280	1.187
	小計	9.210	0.300	0.300	2.763
船尾ブルワーク	No.4	1.450	1.240	1.240	1.798
	No.5	4.260	0.960	0.960	4.090
	小計	5.710	1.030	1.030	5.881
船首ブルワーク	No.8	4.970	1.320	1.320	6.560
エンジンケーシング	No.6	1.560	0.980	0.980	1.529
甲板室	No.7	4.730	1.480	1.480	7.000
E/R降り口	No.11	0.910	1.960	1.960	1.784
ファンネル	No.9	1.880	2.100	2.100	3.948
排気管	No.10	0.190	3.370	3.370	0.640
船首タイヤ架台	No.3	0.550	0.500	0.500	0.275
タイヤバンドル	No.17	0.560	1.370	1.370	0.767
甲板室張出・階段	No.12	0.060	2.360	2.360	0.142
	No.13	0.100	2.150	2.150	0.215
	小計	0.160	2.230	2.230	0.357
手摺(甲板室上)	No.27	0.330	2.920	2.920	0.964
手摺(階段・手摺)	No.28	0.510	4.400	3.900	1.989
手摺(操舵室手摺)	No.29	0.110	6.910	5.910	0.650
操舵室DK張り出し	No.20	0.090	6.350	5.350	0.482
	No.21	0.160	6.350	5.350	0.856
	小計	0.250	6.350	6.350	1.588
やぐら	No.19	2.440	4.380	3.380	8.247
操舵室	No.22	1.840	6.850	5.850	10.764
	No.23	1.680	7.810	6.800	11.424
	小計	3.520	7.300	7.300	25.696
操舵室ヒサシ	No.24	0.380	8.320	7.320	2.782
汽笛・投光器	No.25	0.070	8.640	7.640	0.535
マスト	No.26	0.370	9.340	8.340	3.086
船首ポラード・ビット	No.14	0.110	2.130	2.130	0.234
	No.15	0.100	2.290	2.290	0.229
	No.16	0.060	2.270	2.270	0.136
	小計	0.270	2.220	2.220	0.599
船尾ポラード	No.17	0.110	1.510	1.510	0.166
ファン	No.30	0.260	2.010	2.010	0.523
曳航フック・台		0.752		2.045	1.538
喫水変化分		-0.562		0.094	-0.053
合計		58.360		1.936	112.960

事故発生時の風速は 17m/s の 1 パターンを想定して風による横傾斜角を求めた。風による傾斜偶力てこ及び推定に用いた諸量をまとめて表 6-2 に示す。なお、風による傾斜偶力てこの算定に

は、船舶復原性規則で用いられている算式を使用し、風向は 310 度から 350 度とした。

図 6-1 に風による傾斜外力と復原力を比較して示す。事故発生時の状態では、風速 17m/s の風による横傾斜角（左舷側）は 1 度程度である（表 6-3）。

表 6-2 風による傾斜偶力てこ及び推定に用いた諸量

dm/2 (m)	0.844
風圧中心高さ (m)	3.436
風速 (m/s)	17.0
k	0.022
A (m ²)	58.360
H (m)	2.592
W (t)	104.316
傾斜偶力てこ(310度) (m)	0.024
傾斜偶力てこ(320度) (m)	0.020
傾斜偶力てこ(330度) (m)	0.016
傾斜偶力てこ(340度) (m)	0.011
傾斜偶力てこ(350度) (m)	0.006

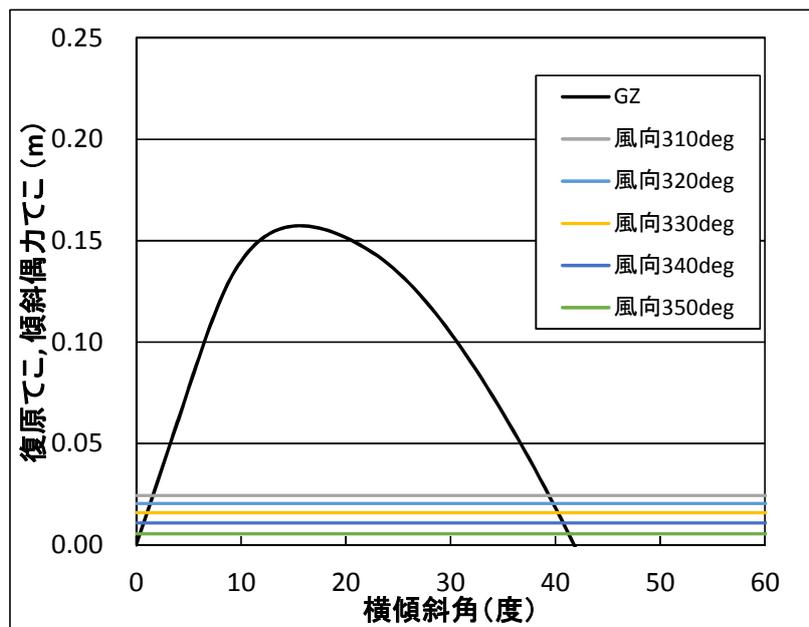


図 6-1 風による傾斜偶力てこ

表 6-3 風による横傾斜角

風向 (deg.)	定傾斜角 (deg.)
310	1.59
320	1.34
330	1.04
340	0.71
350	0.36

また図 6-2、図 6-3 に風による傾斜外力と曳航索張力による傾斜外力の合力と復原力を比較して示す。風による傾斜外力と曳航索張力による傾斜外力を同時に考慮した場合、波高 3m、風速 17m/s の状態で曳航した状態で、横傾斜角（左舷側）は 4 度程度に達すると推定される（表 6-4、表 6-5）。

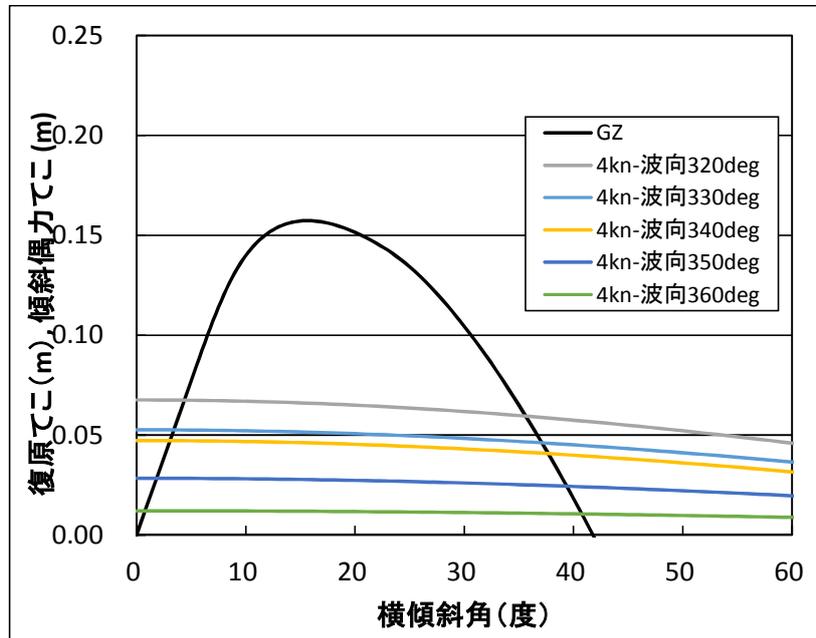


図 6-2 曳航と風による傾斜偶力てこ(船速 4kn)

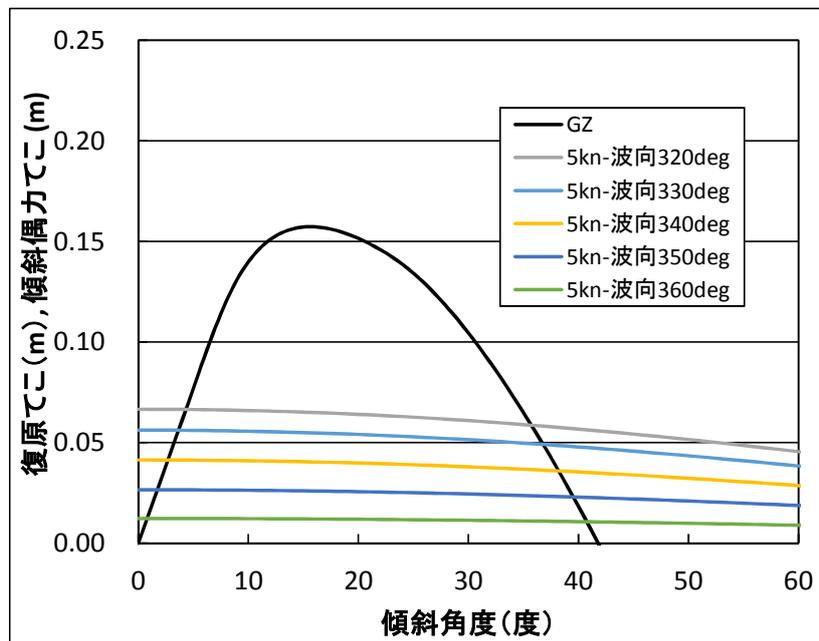


図 6-3 曳航と風による傾斜偶力てこ(船速 5kn)

表 6-4 曳航と風による横傾斜角 (船速 4kn)

波向(deg.)/ 風向(deg.)	定傾斜角 (deg.)
360/350	0.79
350/340	1.86
340/330	3.08
330/320	3.43
320/310	4.40

表 6-5 曳航と風による横傾斜角 (船速 5kn)

波向(deg.)/ 風向(deg.)	定傾斜角 (deg.)
360/350	0.80
350/340	1.74
340/330	2.70
330/320	3.66
320/310	4.33

6. 2 波浪による横揺れ

表 3-5 の状態で事故発生時の対象船の横揺れ角を strip 法 (STF 法) で推定した (付録 4)。その際、事故発生時の海象条件として波周期 6.97s、波高 3m と設定し、船速は 4kn、5kn とした。参考のため 0kn についても計算を行っている。

表 6-6 波浪による横揺れ角

波向 (度)	0kn			4kn			5kn		
	AMP./WS	位相遅れ (度)	横揺れ角 (度)	AMP./WS	位相遅れ (度)	横揺れ角 (度)	AMP./WS	位相遅れ (度)	横揺れ角 (度)
270	1.5142	66.1	10.79	1.530	69.3	10.90	1.5375	70.0	10.96
280	1.4911	64.4	10.63	1.619	61.6	11.54	1.6542	60.6	11.79
290	1.4232	63.4	10.14	1.660	53.9	11.83	1.7117	50.6	12.20
300	1.3107	63.1	9.34	1.638	46.4	11.67	1.7044	40.6	12.15
310	1.1589	63.5	8.26	1.566	39.9	11.16	1.6317	31.2	11.63
320	0.9726	64.6	6.93	1.433	34.6	10.21	1.5002	22.8	10.69
330	0.7570	66.6	5.39	1.249	31.3	8.90	1.3184	16.0	9.40
340	0.5186	69.3	3.70	1.003	31.4	7.15	1.0759	11.3	7.67
350	0.2638	72.7	1.88	0.650	38.6	4.63	0.7457	10.7	5.31
360	0.0000	-95.3	0.00	0.000	-45.0	0.00	0.0000	74.5	0.00

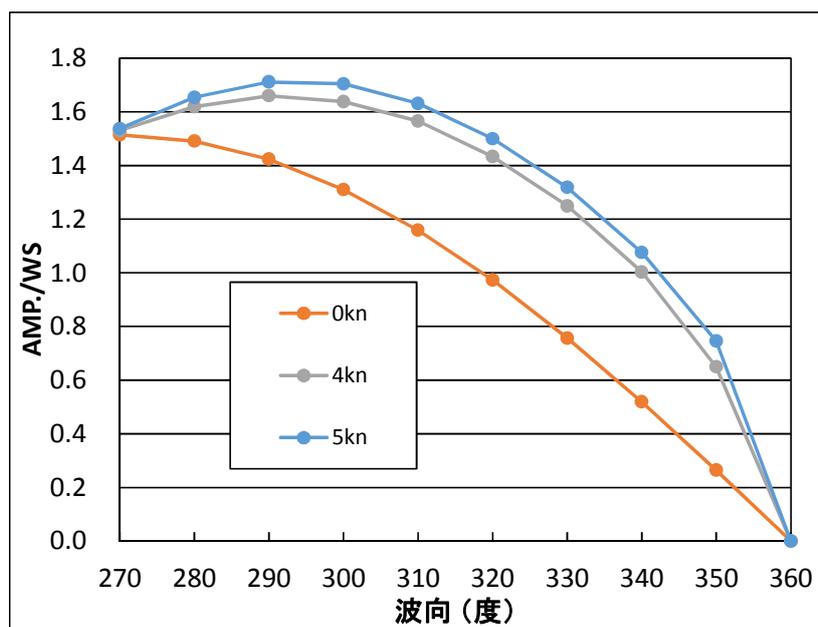


図 6-4 波浪による横揺れ角 (無次元値)

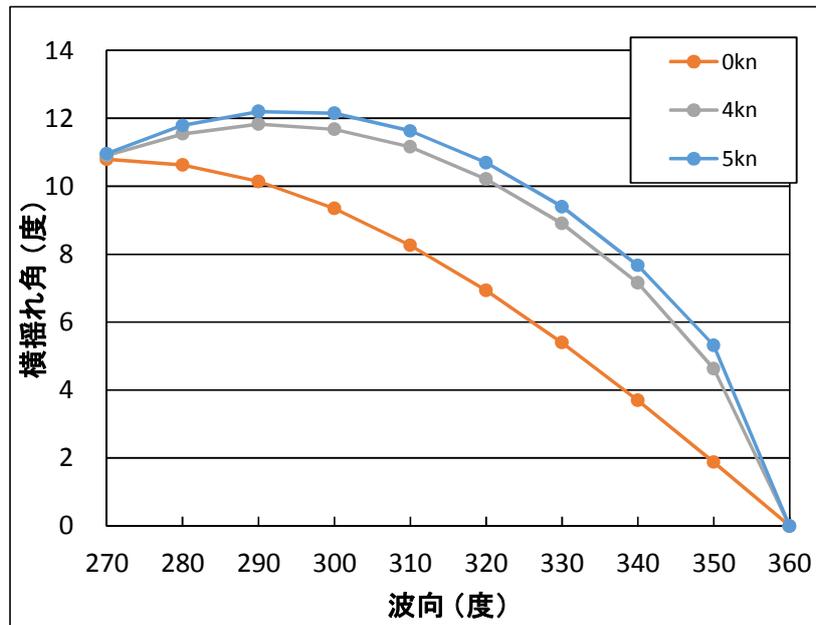


図 6-5 波浪による横揺れ角 (有次元値)

計算結果を表 6-6 と図 6-4 (無次元値) 及び図 6-5 (有次元値) に示す。波向が約 300 度 (斜め向波) で横揺れが peak となっており、波高 3m の場合には横揺角度は約 12 度に達すると推測される。

7. 転覆に至るメカニズムの検討

7. 1 事故発生時の状況の想定

調査官から説明された事項、並びに、6章までに記載した、①引船Aの復原性の算定結果、②事故時の引船Aと台船との位置関係（引船船首方位と曳航索の角度：横引き角度）の推定結果及び③上記位置関係における引船Aの横傾斜角度の算出結果を踏まえて、引船Aが転覆に至る状況を以下のとおり想定した。

- (i) 風及び台船の曳航に伴う索張力による傾斜モーメントの作用で左舷側に定傾斜した状態で、右舷船首方からの波浪により横揺れをしながら航行中に、
- (ii) 波浪あるいは風の変動により台船が振れまわり運動を起こすなどして、索張力や横引き角が変化し、それに伴い傾斜モーメントが増大した結果、横傾斜角が復原力の最大値が生じる横傾斜角より大きなブルワーク上端没水角を超過し、
- (iii) (横傾斜角が復原力の最大値が生じる横傾斜角より大きな角度で) 復原性的に不安定な状態で、ブルワークが抵抗となりなかなか復原しない間に、引き続いて入射した波の作用で転覆した。

7. 2 転覆メカニズムの検討

7.1節で想定した事故発生時の状況について、事故発生時の復原性等について具体的な数値をあてはめて転覆メカニズムの検討を行った。その際、最悪の状況として、船舶復原性規則の所謂C係数基準と同様に、風上側（右舷側）に最大限横揺れした時点で、索張力による傾斜モーメントが急激に増大したとして、風下側（左舷側）への最大傾斜角等をエネルギーバランスの考え方で推定した。

7. 2. 1 事故発生時の復原力及び傾斜外力

事故発生時の排水量等を表7-1に、復原力曲線を図7-1（図3-3再掲）に示す。事故発生時の状態で、復原力の最大値（GZmax）は約0.16m、復原力の最大値が生じる傾斜角（ ϕ_{max} ）は17度である（表3-6、図7-1）。また、3.2節に記載したように、事故発生時の状態で、海水流入角は約31.7度（海水流入位置：甲板室出入口）であり、ブルワーク上端が没水する横傾斜角は、S.S.5位置が最も小さく約17.3度と推定される。

表 7-1 事故発生時の排水量等

排水量	104.138	ton
重心の前後位置	-0.855	m
重心の上下位置	1.756	m
船尾喫水	1.875	m
船首喫水	1.500	m
平均喫水	1.688	m
メタセンター高さ	0.877	m
横揺れ固有周期	5.540	s

次に、事故発生時の状況で転覆関連要因と考えられる、索張力や風による傾斜偶力及び定常傾斜角並びに波浪による横揺れ角を出会角毎にまとめて表7-2（船速Vs=4kn）及び表7-3（船速Vs=5kn）に示す。出会角は、正面向波状態を0度（360度）として、反時計回りに定義しており、

出会角 350 度は船首から右舷側 10 度斜め方向から波が入射している状態を表す。また、風向と波向の差は 10 度であり、波と出会角が 350 度の場合は、風は 340 度方向（船首から右舷側 20 度斜め方向）から吹いているとしている。

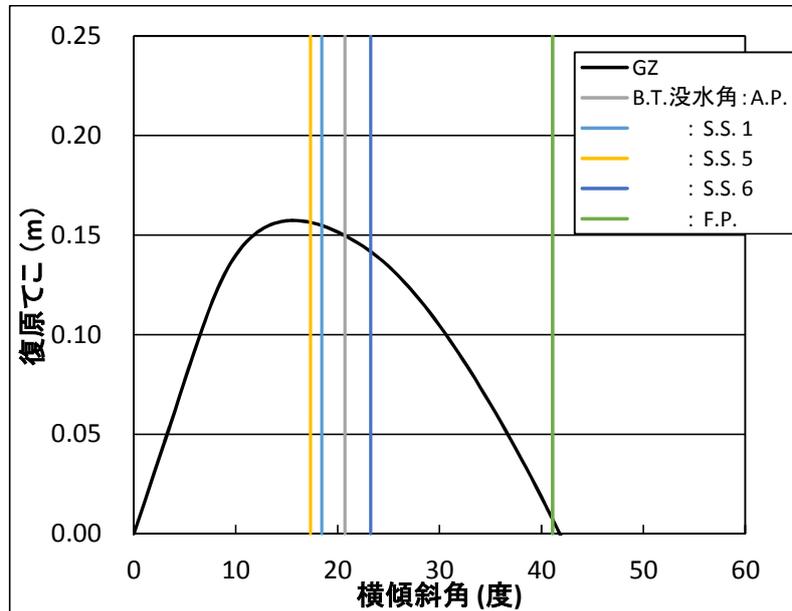


図 7-1 事故発生時の復原力曲線

表 7-2、表 7-3 に示した索張力や風による定常傾斜角及び波浪による横揺れ角と図 7-1 に示した復原力曲線から、

- i) 船速が 4kn の場合（表 7-2）、5kn の場合（表 7-3）とも、波との出会角が大きくなるほど、索張力、風による定常傾斜角及び波浪による横揺れ角とも大きくなること
- ii) しかしながら、復原力と索張力、風による定常傾斜角及び波浪による横揺れ角を比較すると、転覆関連要因と考えられる、索張力、風及び波浪が単独に作用しても転覆には至らないと推測されること

が分かる。

表 7-2 索張力・風による定常傾斜角及び波浪による横揺れ角 (Vs=4kn)

船速 -出会角	T (tf)	索方向 (deg)	傾斜偶力てこ (m)		定常傾斜角 (deg.)		横揺れ角 (deg.)
			索張力	風	索張力	風	
4kn-360deg	5.511	3.74	0.007	0.006	0.43	0.36	0.00
(安定)	5.604	0.36	0.001				
4kn-350deg	5.495	10.01	0.017	0.011	1.14	0.71	4.63
(安定)	5.985	10.62	0.020				
4kn-340deg	5.423	18.40	0.031	0.016	2.05	1.04	7.15
(振れまわり)	13.248	17.94	0.075				
4kn-330deg	5.649	18.12	0.032	0.020	2.10	1.34	8.90
(不安定)	26.451	22.34	0.184				
4kn-320deg	5.655	24.65	0.043	0.024	2.82	1.59	10.21
(不安定)	32.062	14.91	0.151				

表 7-3 索張力・風による定常傾斜角及び波浪による横揺れ角 (Vs=5kn)

船速 -出会角	T (tf)	索方向 (deg)	傾斜偶力てこ (m)		定常傾斜角 (deg.)		横揺れ角 (deg.)
			索張力	風	索張力	風	
5kn-360deg	6.883	3.08	0.007	0.006	0.44	0.36	0.00
(振れまわり)	9.881	3.79	0.012				
5kn-350deg	5.760	8.55	0.016	0.011	1.02	0.71	5.31
(安定)	6.177	9.67	0.019				
5kn-340deg	5.608	14.36	0.025	0.016	1.66	1.04	7.67
(安定)	6.602	16.00	0.033				
5kn-330deg	5.388	21.27	0.036	0.020	2.33	1.34	9.40
(振れまわり)	7.319	24.18	0.055				
5kn-320deg	5.293	25.85	0.042	0.024	2.75	1.59	10.69
(安定)	5.834	25.85	0.047				

7. 2. 2 エネルギーバランスの計算

エネルギーバランスの計算は、振れまわりが発生した船速 (Vs) が 4kn で出会角 (χ) が 340 度の状態と船速 5kn で出会角が 330 度の状態について行った。船速 5kn で出会角が 360 度の場合も振れまわりが発生しているが、横揺れ角が 0 なので計算は行わなかった。また、表 7-2 及び表 7-3 に示したように、風による横傾斜角が比較的小さいことから、エネルギーバランスの計算は、風による横傾斜を考慮しない①索張力による横傾斜と波浪による横揺れのみを考慮した場合 (case1) と、②索張力と風による横傾斜と波浪による横揺れの全てを考慮した場合 (case2) について行った。

エネルギーバランスの計算に使用した図表を図 7-2、表 7-4 及び表 7-5 に示す。これらの図表に示した、 ϕ_0 は索張力あるいは索張力及び風による定常傾斜角、 ϕ_a は右舷側への最大傾斜角、 ϕ_1 は索張力が最大値をとった場合の定常傾斜角、 ϕ_2 は海水流入角、 a は傾斜方向のエネルギー ((7-1) 式)、 b は動復原力 ((7-2) 式)、 c は船舶復原性規則の C 係数に対応する動復原力と傾斜エネルギーの比 ($c=b/a$)、 ϕ_0 は(7-3)式を満たす左舷側への最大傾斜角を示す。

$$a = \int_{\phi_a}^{\phi_1} \{(D_{t_max} + D_{wind}) - \overline{GZ}\} d\phi \quad (7-1)$$

$$b = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \{\overline{GZ} - (D_{t_max} + D_{wind})\} d\phi \quad (7-2)$$

$$\int_{\phi_1}^{\phi_0} \{\overline{GZ} - (D_{t_max} + D_{wind})\} d\phi = a \quad (7-3)$$

ここで、 D_{t_max} は振れまわりによる索張力の最大値に対応する傾斜偶力てこ、 D_{wind} は風による傾斜偶力てこを示す。また、Case1 の計算では $D_{wind}=0$ としている。

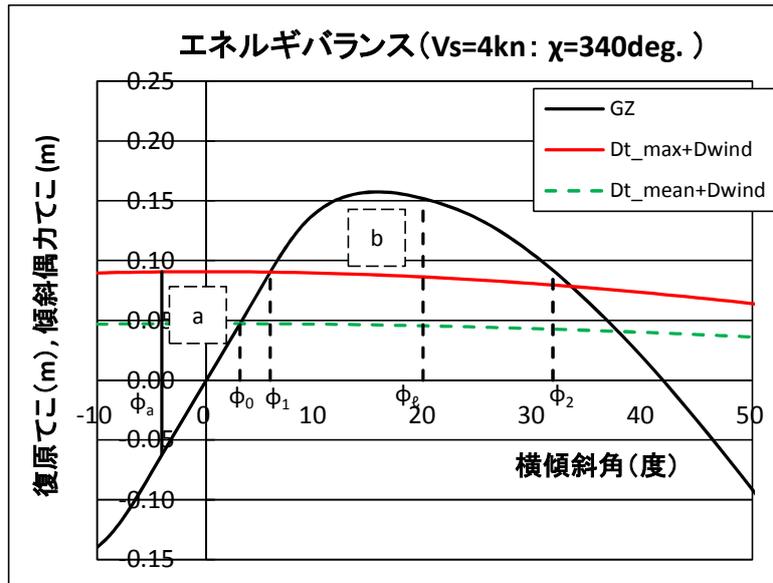


図 7-2 エネルギーバランス計算 (Case2 : Vs=4kn, $\chi=340\text{deg.}$)

表 7-4 エネルギーバランス計算 (Vs=4kn, $\chi=340\text{deg.}$)

	ϕ_0 (deg.)	ϕ_a (deg.)	ϕ_1 (deg.)	ϕ_2 (deg.)	a (m-deg.)	b (m-deg.)	c (=b/a)	ϕ_e (deg.)
Case1 (索張力)	2.05	-5.10	4.84	31.73	0.763	1.704	2.23	17.14
Case 2 (索張力+風)	3.08	-4.07	5.86		0.758	1.284	1.69	19.85

表 7-5 エネルギーバランス計算 (Vs=5kn, $\chi=330\text{deg.}$)

	ϕ_0 (deg.)	ϕ_a (deg.)	ϕ_1 (deg.)	ϕ_2 (deg.)	a (m-deg.)	b (m-deg.)	c (=b/a)	ϕ_e (deg.)
Case1 (索張力)	2.33	-7.06	3.57	31.73	0.870	2.221	2.55	15.74
Case 2 (索張力+風)	3.66	-5.74	4.88		0.876	1.658	1.89	18.64

表 7-4 に示したように船速 4kn で出会角が 340 度の状態では、索張力による横傾斜と波浪による横揺れのみを考慮した場合 (case1)、動復原力と傾斜エネルギーの比 c は 2.23 で船は転覆しないが、左舷側への最大傾斜角 ϕ_e は 17.14 度となり、海面がほとんどブルワーク上端に達するまで傾斜すると判定される。一方、索張力と風による横傾斜と波浪による横揺れの全てを考慮した場合 (case2) は、船は転覆しない ($c=1.69$) が、左舷側への最大傾斜角 ϕ_e は 19.85 度とブルワーク上端没水角 (17.3 度) を超えると判定される。

また、船速 5kn で出会角が 330 度の状態 (表 7-5) でも、索張力と風による横傾斜と波浪による横揺れの全てを考慮した場合 (case2) は、動復原力と傾斜エネルギーの比 c は 1.89 で船は転覆しないが、左舷側への最大傾斜角はブルワーク上端没水角を超える ($\phi_e=18.64\text{deg.}$) と判定される。

事故発生時の状態でブルワーク上端没水角（約 17.3 度）は、復原力最大値が生じる横傾斜角 17 度より大きい。そのため横傾斜角がブルワーク上端没水角を超過すると、復原的に不安定な状態となる。また、横傾斜角がブルワーク上端没水角を超過すると、ブルワークが抵抗となりなかなか復原しないため、引き続いて入射する波の作用で転覆に至ることが想定される。

7. 3 まとめ

調査官から説明された事項等を基に引船 A が転覆に至る状況を想定するとともに、想定した事故発生時の状況について、事故発生時の復原性等について具体的な数値をあてはめて転覆メカニズムの検討を行った。その際、最悪の状況として、右舷側に最大限横揺れした時点で、索張力による傾斜モーメントが急激に増大したとして、左舷側への最大傾斜角等をエネルギーバランスの考え方で推定した。

その結果、船速が 4kn で出会角が 340 度の状態や船速 5kn で出会角が 330 度の状態で曳航した場合に台船が振れまわりを起こす状況で索張力と風による横傾斜と波浪による横揺れの全てを考慮した場合でも、引船 A は直ちに転覆に至ることはないが、左舷側への最大傾斜角は復原力の最大値が生じる横傾斜角より大きなブルワーク上端没水角を超えると判定された。

横傾斜角が復原力の最大値が生じる横傾斜角より大きな角度まで達すると復原的に不安定な状態となり、ブルワークが抵抗となりなかなか復原しない間に、引き続いて入射する波の作用で転覆に至ることが想定される。

参考文献

- 1) 池田良穂：横揺れ減衰力，運動性能研究委員会第1回シンポジウム，p241-249，1984.
- 2) 引船の基本設計指針，社団法人日本作業船協会，1985.
- 3) 藤原敏文，上野道雄，二村正：船体に働く風圧力の推定，日本造船学会論文集，第183号，p77-90，1998.
- 4) H. Maruo：The drift of a body floating on waves，Journal of Ship Research，Vol.14，No.3，p1-10，1960.
- 5) 原正一他11名：荒天下における航行不能船舶の漂流防止等に関する研究，海上技術安全研究所報告，第4巻，第2号，2004.
- 6) J. N. Newman：The drift force and moment on ships in waves，Journal of Ship Research，Vol.11，No.1，p51-60，1967.
- 7) 貴島勝郎，名切恭昭：船尾形状を考慮した操縦流体力の近似的表見，西武造船会会報，第98号，p67-77，1999.
- 8) 原正一，山川賢次，星野邦弘，湯川和浩，長谷川純：曳航時における巡視船の曳航索張力，関西造船協会論文集，第237号，p165-171，2002.

付録1 事故発生時の喫水

調査官から示された事故発生時（出港時）の喫水は船尾が 2.90m、船首が 1.25m である。喫水原点を船尾喫水はシューピースの下面、船首喫水はキール船首部の下面とすると、船尾喫水 2.90m はベースラインからシューピースの下面が 1.025m であることからベースライン上 1.875m となる。一方、船首喫水 1.25m はベースラインからキール船首部の下面まで 0.25m であることからベースライン上 1.50m となる。よって平均喫水 1.688m、船尾トリム 0.375m となり、同型船の hydrostatic table からおおよそ排水量は 105.89ton となる。また、対象船の船型データからプログラムを用いて計算すると排水量は 104.138ton となった。

重量重心計算では、事故発生時の船体重量（排水量）は 91.999ton と見積もっており（表 3-4）、報告された喫水から算定した値と約 12ton の差異がある。また、重量重心計算結果に基づいて算定した喫水は船尾 1.756m、船首 1.258m であり、船尾トリムは 0.498m となり、調査官から示された事故発生時の喫水の場合より約 0.17m 船尾トリムが小さくなっている。そのため、不明重量の重心は船体中央より船首側にあったと推測される。

付録2 船型データ

提供された船型データから作成した復原力計算の入力データを線図として示す（図 A2-1、図 A2-2）。対象船と同型船で船首部の形状等が異なる。

(1) 船型データ (同型船)

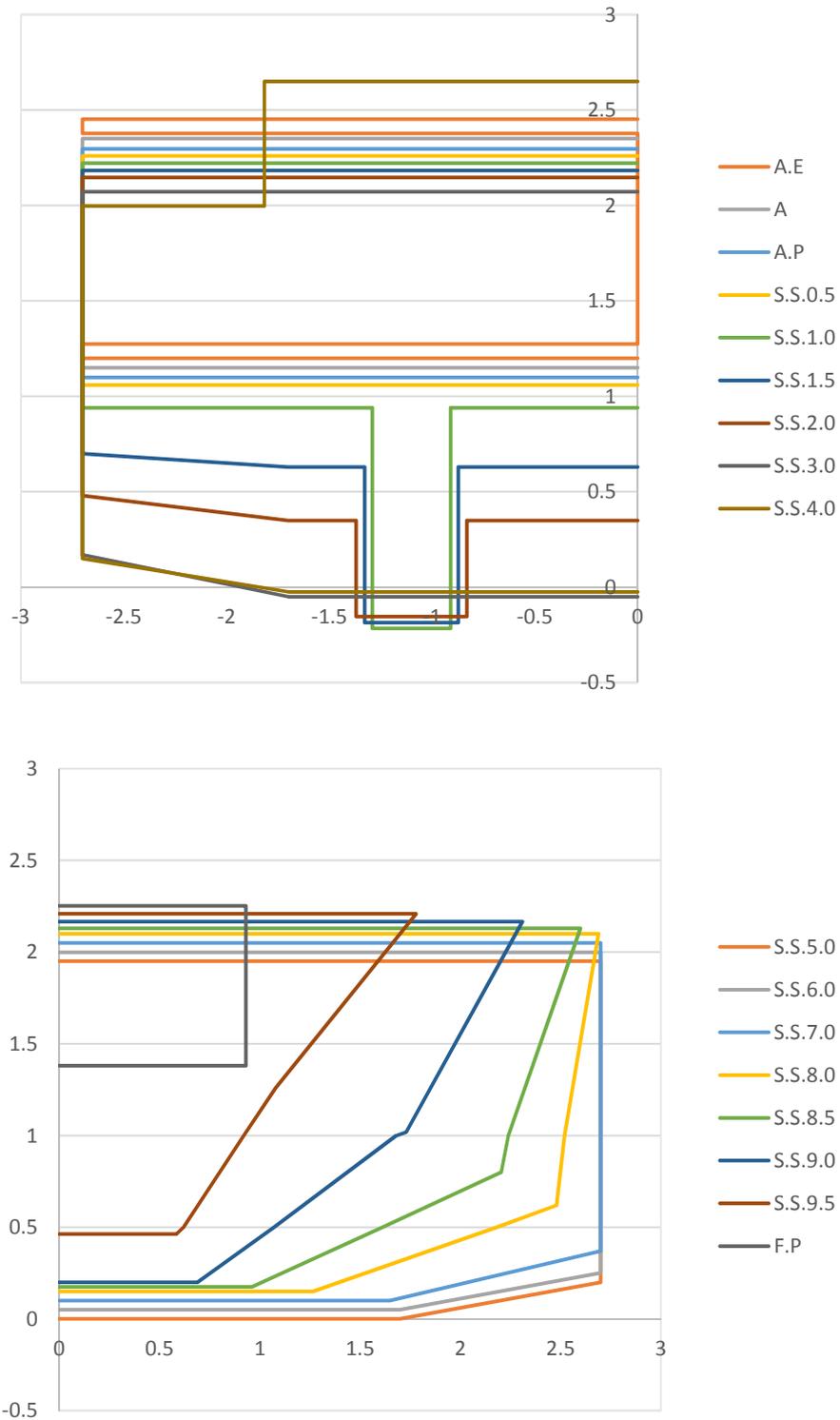


図 A2-1 復原力計算入力データ (同型船)

(2) 船型データ (対象船)

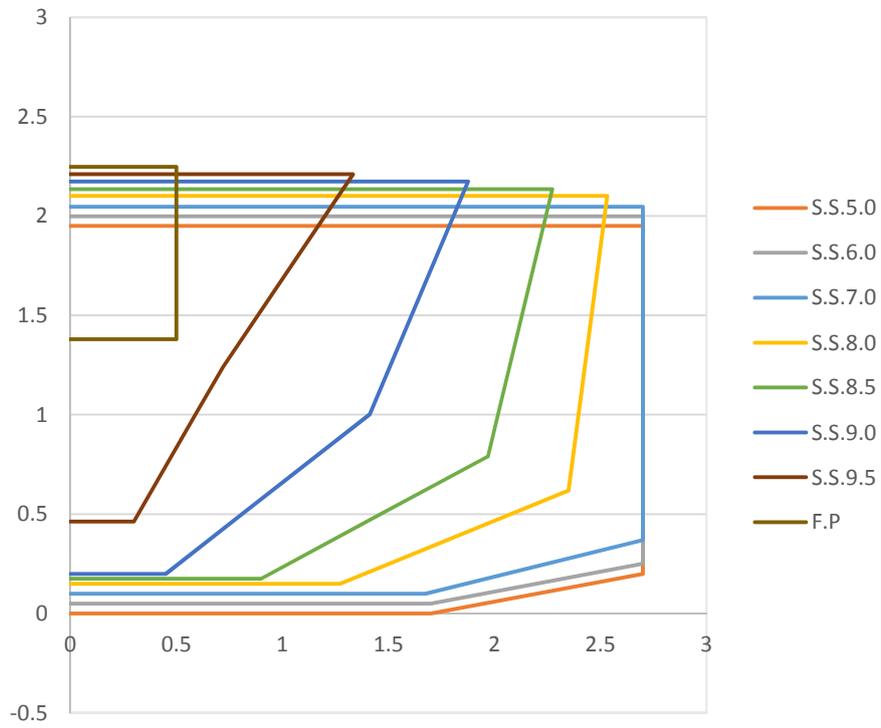
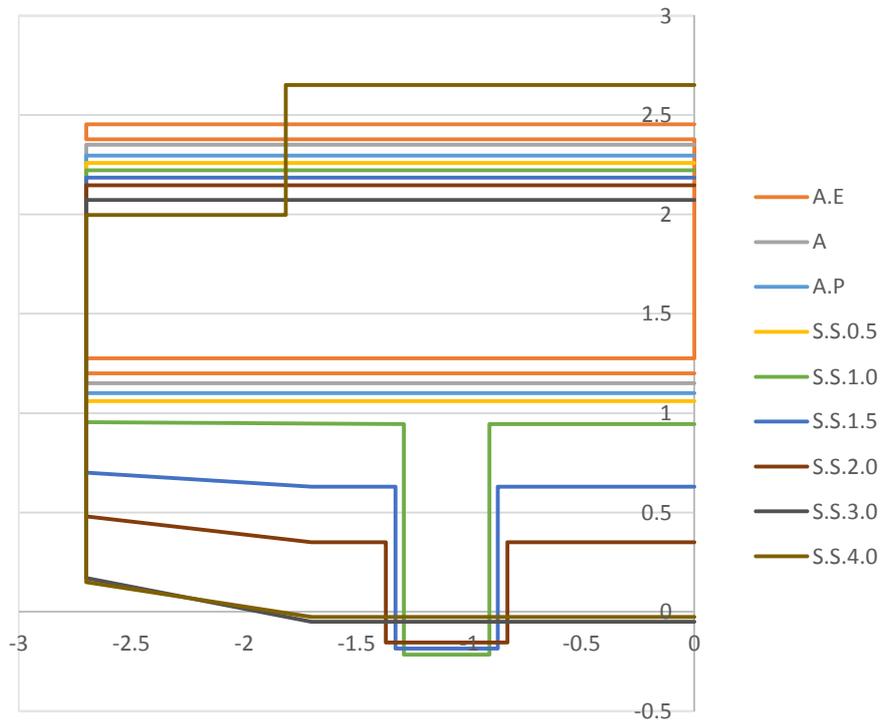


図 A2-2 復原力計算入力データ (対象船)

付録3 復原力計算入力データの検証

(1) hydrostatic table

同型船と対象船の hydrostatic table を表 A3-1, 表 A3-2 に示す。「Cal」がプログラムによって計算された排水量であり、「DISPT」が復原性報告書に記載されている排水量である。対象船においては復原性報告書が入手できていないため同型船との比較を行っている。喫水が浅い範囲において若干の差があるもののおおよそ一致している。

表 A3-1 同型船での hydrostatic table

DRAFT(m)	cal(m ³)	cal(t)	DISPT(Mid)(t)	DISPT(EXT)(t)
0.500	21.223	21.732	22.230	22.870
0.600	26.658	27.298	27.790	28.470
0.700	32.354	33.130	33.570	34.310
0.800	38.250	39.168	39.570	40.360
0.900	44.188	45.249	45.700	46.520
1.000	50.356	51.565	51.970	52.820
1.100	56.890	58.255	58.560	59.510
1.200	64.321	65.865	65.990	67.020
1.300	72.180	73.912	73.940	75.030
1.400	79.807	81.722	81.830	82.970
1.500	87.403	89.501	89.570	90.740
1.600	95.024	97.305	97.320	98.520
1.700	102.670	105.134	105.110	106.340

表 A3-2 対象船での hydrostatic table

DRAFT(m)	cal(m ³)	cal(t)	DISPT(Mid)(t)	DISPT(EXT)(t)
0.500	21.028	21.533	22.230	22.870
0.600	26.338	26.970	27.790	28.470
0.700	31.901	32.667	33.570	34.310
0.800	37.660	38.564	39.570	40.360
0.900	43.457	44.500	45.700	46.520
1.000	49.465	50.652	51.970	52.820
1.100	55.851	57.191	58.560	59.510
1.200	63.128	64.643	65.990	67.020
1.300	70.830	72.530	73.940	75.030
1.400	78.288	80.167	81.830	82.970
1.500	85.686	87.742	89.570	90.740
1.600	93.104	95.338	97.320	98.520
1.700	100.543	102.956	105.110	106.340

(2) 傾斜試験状態計算表

同型船の復原性報告書に記載されている傾斜試験時の状態の実測値（上段）と計算値（下段）を表 A3-3、表 A3-4 に示す。算定された船体の排水量等が計測値と若干のずれがあるため、表 A3-4 に関しては計算の入力とした船体の排水量を若干修正した。復原性報告書の排水量は平均喫水を基準に計算されているので差が発生したと考えられる。

表 A3-3 傾斜試験時における船体の姿勢（実測値）

W(t)=	82.45	mid-G(m)=-0.258	shift-G(m)=	0	KG(m)=	1.826				
***	TENNYUU									
	L=	14	B=	5.4	da=	1.344	df=	1.462	dm=	1.403
	GM=	1.14	KG=	1.906	DISP=	79.4	BM=	2.255		
***	TENNYUU									
	L=	14	B=	5.4	da=	1.372	df=	1.456	dm=	1.414
	GM=	1.133	KG=	1.826	DISP=	80.437	BM=	2.161		

表 A3-4 傾斜試験時における船体の姿勢（修正値）

W(t)=	81.367	mid-G(m)=-0.258	shift-G(m)=	0	KG(m)=	1.826				
***	TENNYUU									
	L=	14	B=	5.4	da=	1.344	df=	1.462	dm=	1.403
	GM=	1.14	KG=	1.906	DISP=	79.4	BM=	2.255		
***	TENNYUU									
	L=	14	B=	5.4	da=	1.361	df=	1.439	dm=	1.4
	GM=	1.152	KG=	1.826	DISP=	79.414	BM=	2.187		

(3) 軽荷状態での GZ 曲線（同型船）

同型船の復原性報告書に記載されている軽荷状態での GZ 曲線と計算結果を図 A3-1 に示す。入力とした排水量として復原性報告書に記載されているものと別途計算から求めたもの（(2)参照）の 2 パターン計算したが大きな差はなかった。

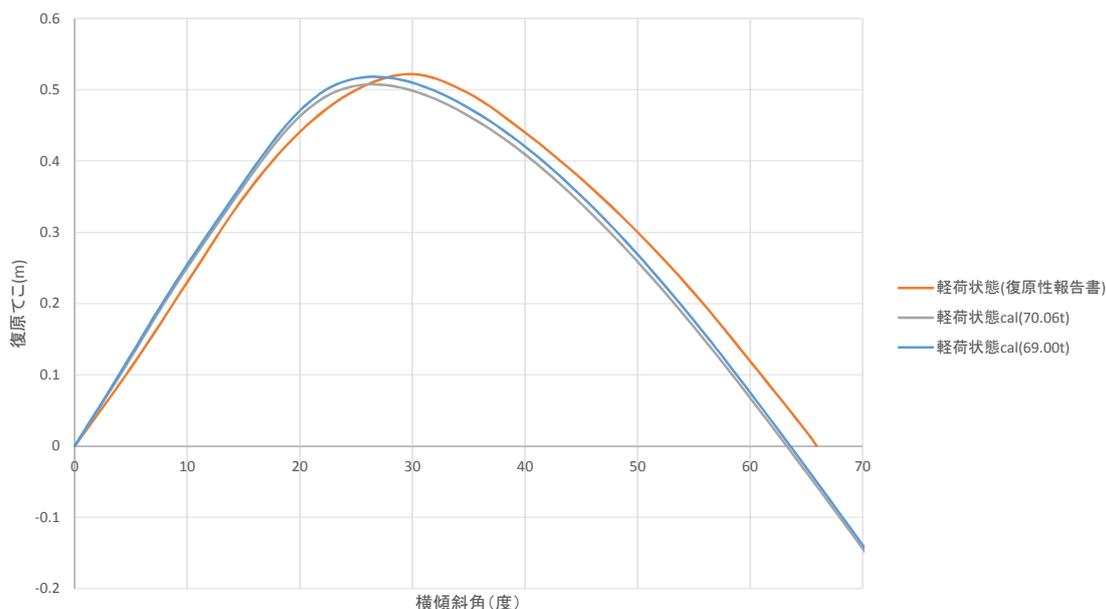


図 A3-1 軽荷状態での GZ 曲線（同型船）

(4) 事故発生時の復原力曲線 (対象船)

事故発生時の GZ 曲線についても入力とした排水量を 2 パターン設定 ((2)参照) して計算を行ったが大きな差はなかった (図 A3-2)。

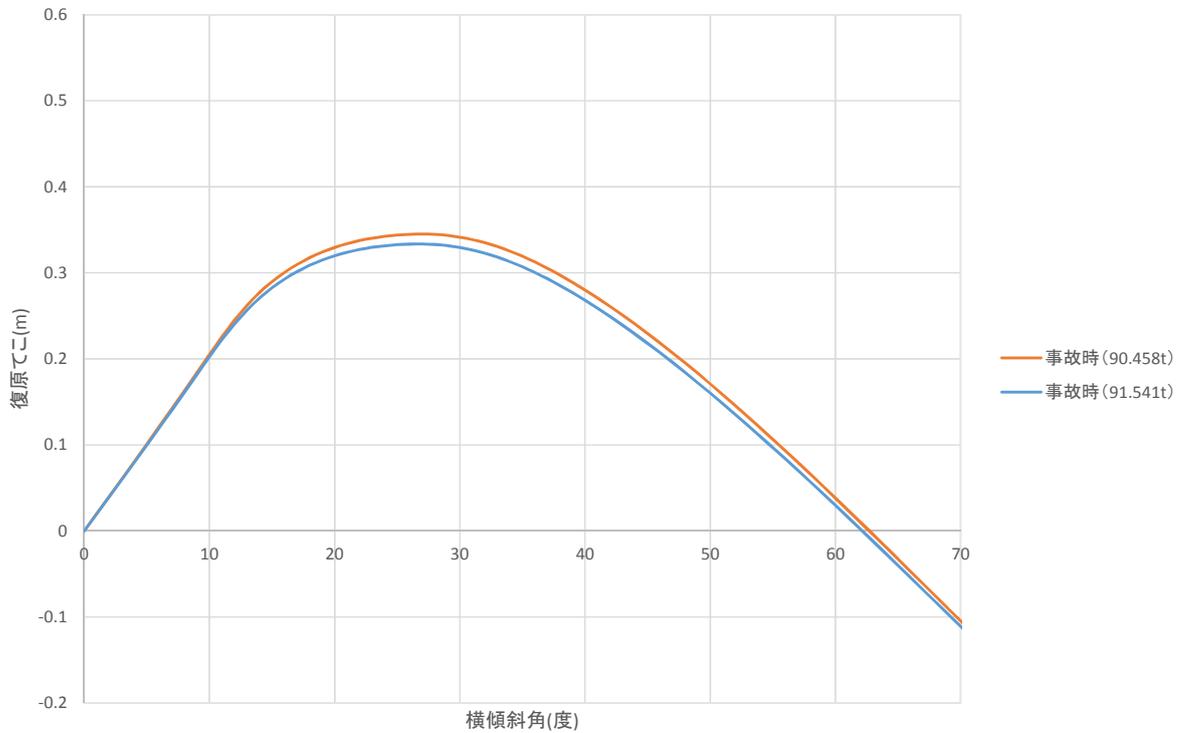


図 A3-2 事故発生時での GZ 曲線 (対象船)

付録4 波長船長比ごとの船体動揺

横波中の横揺（図 A4-1）及び上下揺（図 A4-2）の計算結果を示す。横揺れ同調時には最大波傾斜の約 3.4 倍の横揺が生じると推測される。

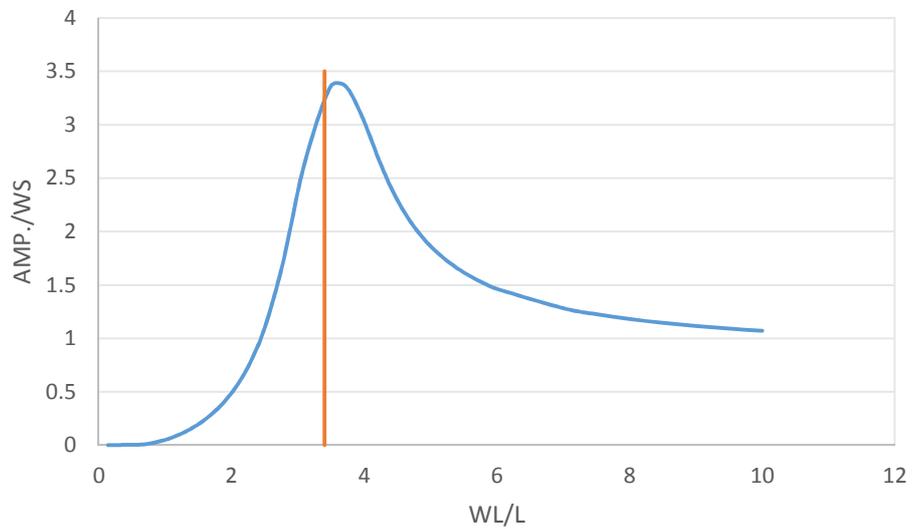


図 A4-1 波長船長比ごとの船体動揺（Roll：横波）（橙線は固有周期との同調点）

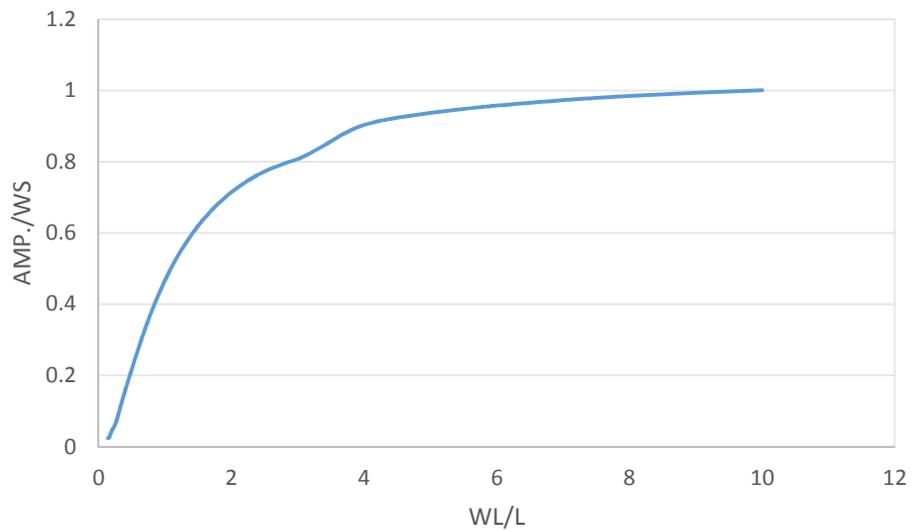


図 A4-2 波長船長比ごとの船体動揺（Heave：横波）