

船舶事故調査報告書

船種 船名 押船 38三協丸
船舶番号 260-45576大阪
総トン数 19トン

事故種類 転覆
発生日時 平成25年5月27日 14時50分ごろ
発生場所 兵庫県洲本市生石鼻東方沖
生石鼻灯台から真方位115° 1.7km付近
(概位 北緯34°15' 東経134°58')

平成26年3月6日
運輸安全委員会(海事部会)議決
委員長 後藤昇弘
委員 横山鐵男(部会長)
委員 庄司邦昭
委員 石川敏行
委員 根本美奈

要旨

<概要>

押船38三協丸^{さんきょう}は、船長ほか甲板員2人が乗り組み、徳島県徳島小松島港から阪神港大阪区に向けて航行中、平成25年5月27日14時50分ごろ、兵庫県洲本市^{すもと}生石鼻^{おいしのはな}東方沖において、転覆した。

38三協丸は、甲板員2人が死亡し、引船により、和歌山県和歌山下津港に向けて被^まえい航中、沈没した。

<原因>

本事故は、徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報及び瀬戸内海に海上風警報が発表されている状況下、38三協丸が、淡路島生石鼻東方において、阪神港大阪区に向けて

約 9 kn の速力で波高約 2 ～ 3 m、波周期約 5 秒の波を右舷側から受けて単独で航行中、 4.7° 以上の舵角となる右舵を取ったため、ブルワーク上端が没水する角度を超える左舷側への傾斜が生じて復原しにくい状況となり、更に波浪を受け、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。

1 船舶事故調査の経過

1.1 船舶事故の概要

押船38三協丸^{さんきょう}は、船長ほか甲板員2人が乗り組み、徳島県徳島小松島港から阪神港大阪区に向けて航行中、平成25年5月27日14時50分ごろ、兵庫県洲本市^{すもと}生石鼻^{おいしのはな}東方沖において、転覆した。

38三協丸は、甲板員2人が死亡し、引船により、和歌山県和歌山下津港に向けて被^レえい航中、沈没した。

1.2 船舶事故調査の概要

1.2.1 調査組織

運輸安全委員会は、平成25年5月28日、本事故の調査を担当する主管調査官ほか2人の船舶事故調査官を指名した。

1.2.2 調査の実施時期

平成25年5月28日～30日、7月22日、23日、11月20日 口述聴取
平成25年6月3日、12月4日、5日 現場調査及び口述聴取
平成25年9月10日 回答書受領

1.2.3 調査の委託

38三協丸の復原性及び転覆に至るメカニズムに関する調査を、独立行政法人海上技術安全研究所に委託した。

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

38三協丸（以下「本船」という。）の船長（以下「船長A」という。）及び三協産業株式会社（以下「A社」という。）の担当者の口述によれば、次のとおりであった。

本船は、船長A及び甲板員2人（以下、それぞれ「甲板員A₁」及び「甲板員A₂」

という。)が乗り組み、空船の1,400m³積土運船S-1312(以下「本件土運船」という。)を回航するため、平成25年5月27日03時50分ごろ大阪府大阪市大正区の係留地を出発し、04時10分ごろ、大阪市此花区西島^{とりしま}棧橋において、係留されていた本件土運船を船首部に連結を行い、徳島小松島港に向けて約7ノット(kn)の速力(対地速力、以下同じ。)で船長Aの操船により、押航を開始した。

船長Aは、携帯電話でA社に対し、08時50分ごろ、04時に出発し、徳島小松島港への入港予定が12時ごろであると連絡した。

本船は、12時00分ごろ、徳島小松島港の末広岸壁に着き、本件土運船を離れた後、12時10分ごろ阪神港大阪区に向けて単独で航行を開始した。

船長Aは、12時20分ごろ、徳島小松島港の港界付近において、針路を友ヶ島水道に向け、速力を約9knとして手動操舵で航行中、甲板員A₁及び甲板員A₂に操船を代わり、仮眠をとるために降橋した。船長Aは、往航で沼島^{ぬしま}と淡路島の間を航行したので、復航でも沼島と淡路島の間を航行しており、また、機関回転数を下げたときの音の変化を感じなかったので、約9knの速力で航行を続けていると思った。

船長Aは、居室で仮眠中、左舷側に突然大きく傾いたため、居室を出て甲板へ出るために水密扉を開けようとしたが、水圧で開けることができなかった。その後、本船は左舷側へ転覆した。船長Aは、傾斜してから転覆するまで余り時間は掛かっていないと感じた。

船長Aは、操舵室と居室は電話がつながっているが、操舵室から異常を知らせる連絡はなく、船体が傾斜する前、衝撃や大きな揺れを感じなかった。

本事故の発生日時は、平成25年5月27日14時50分ごろで、発生場所は、兵庫県洲本市所在の生石鼻灯台から115°(真方位、以下同じ。)1.7km付近であった。

(付図1 事故発生経過概略図、写真1 本船転覆後の状況 参照)

2.1.2 事故発生後の経過

(1) 船長Aの口述によれば、次のとおりであった。

船長Aは、転覆後、エンジンが停止し、電気が消えた中で居室に戻り、携帯電話でA社等と連絡を取ろうとしたが、電波が届かず、連絡できなかった。居室には海水は入ってこなかったが、居室出入口の下まで浸水していた。船長Aは、居室で毛布にくるまっていたとき、船底をたたく音が聞こえ、たたき返したところしばらくして水密扉が開き、潜水士が入って

きて船外に脱出し、救助された。船長Aは、転覆してから救助されるまで、1時間以上はあったと思った。

(2) 和歌山海上保安部の情報によれば、捜索等の状況は、次のとおりであった。

① 海上保安庁は、5月27日15時15分ごろ航行中のパイロットボートから転覆船があるとの118番通報を受け、監視取締艇1隻、巡視艇2隻、巡視船2隻及び航空機1機を出動させた。転覆した本船を発見したとき、本船の舵はほぼ中央であった。17時14分ごろ海上保安官が転覆した本船の船内居住区で船長Aを発見して救助した。17時38分ごろから44分ごろの間において、甲板員A₁及び甲板員A₂が、本船の操舵室から救助され、巡視艇により、和歌山下津港に入港し、その後、救急車により、病院へ搬送されたものの、死亡した。(写真2-1参照)

② 本船は、22時20分ごろA社の手配した引船により、和歌山下津港に向けて被えい航が開始されたが、22時55分ごろえい航索が切れて漂流し、23時38分ごろ、生石鼻灯台の北東方4km付近において、海面から見えなくなった。



写真2-1 本船の舵板の状況

2.2 人の死亡に関する情報

和歌山海上保安部の情報によれば、甲板員A₁及び甲板員A₂の死因は、溺水であった。

2.3 船舶の損傷に関する情報

A社担当者によれば、本船は、生石鼻灯台から065°3km付近の水深約120mの場所に沈没した。

2.4 乗組員に関する情報

(1) 性別、年齢、操縦免許証

船長A 男性 63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13年10月22日

免許証交付日 平成22年12月13日

(平成28年10月21日まで有効)

甲板員A₁ 男性 57歳

二級小型船舶操縦士・特殊小型船舶操縦士・特定

免許登録日 昭和60年6月14日

免許証交付日 平成21年10月22日

(平成27年6月13日まで有効)

甲板員A₂ 男性 49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 昭和63年2月4日

免許証交付日 平成25年2月14日

(平成30年4月15日まで有効)

(2) 主な乗船履歴等

船長A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

平成19年に本船の船長となった。本事故当時は風邪気味であり、2日前から市販薬を服用していた。また、降圧剤を常用していた。

② 他の乗組員

甲板員A₁は、平成23年1月に本船の甲板員となった。本事故当時の体調は良好であるように見えた。

甲板員A₂は、平成25年3月に本船の甲板員となった。その前は、A社所有の他の押船に乗っていた。本事故当時の体調は良好であるように見えた。

甲板員A₁及び甲板員A₂は、A社所有の他の押船で船長を経験しており、押船の操船には慣れていた。

本船の乗組員は、本船の定期検査の間は休暇を取っており、疲労はないように見えた。

2.5 船舶等に関する情報

本船に関する情報は、次のとおりであった。

2.5.1 船舶の主要目

船舶番号	260-45576大阪
船籍港	大阪府大阪市
船舶所有者	土砂船舶有限会社
船舶借入人	A社
総トン数	19トン
L×B×D	16.00m×5.50m×2.00m
船質	鋼
機関	ディーゼル機関2基
出力	735.5kW/基 合計1,471kW
推進器	固定ピッチプロペラ2個
進水年月	平成19年9月
用途	押船兼引船
航行区域	沿海区域
最大搭載人員	船員3人、その他の乗船者3人計6人
第2回定期検査	平成25年5月9日

2.5.2 構造及び設備

船長A及びA社担当者の口述並びに一般配置図及び船体写真によれば、次のとおりであった。

(1) 操舵室

操舵室は、土運船等と一体となった場合、船首方の視界を確保するため、上甲板上に^{やぐら}檣を設け、その上に設置されているため、室内は非常に狭かった。

また、船首側に操舵スタンド等が船尾側には棚がそれぞれあり、中央に操船用の固定式の椅子が設置されており、通路は狭く、操舵室内を移動した場合に体が舵輪に接触する可能性があった。

(2) 航海設備

操舵室内には、操舵スタンド、自動操舵装置、GPSプロッター、レーダー、VHF等が装備されていたが、傾斜計、風向風速計、EPIRB^{*1}及

^{*1} 「EPIRB」(浮揚型極軌道衛星利用非常位置指示表示無線標識)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と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。

びレーダートランスポンダ*2はなかった。

(3) 居住区

居住区は、船首部の上甲板下であり、3つの居室に分かれていた。居住区の出入口は櫓の下にあり、水密扉が取り付けられていた。水密扉から階段を下りた正面の船首方向にある居室を船長Aは使用していた。

(4) その他

本事故発生前、本船の船体、機関及び機器類に不具合又は故障はなかった。

(付図2 本船の一般配置図、写真2 本事故発生前の本船の状況(1)、写真3 本事故発生前の本船の状況(2) 参照)

2.5.3 A船の燃料等の積載状態及び喫水の状況

船長A及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

本事故当時の燃料等の残量は、燃料が約10kℓであり、清水は約15kℓであった。また、徳島小松島港の出港時の喫水は、船首約1.3m、船尾約2.0mであった。

2.5.4 舵の特性

本船は、土運船等と連結した状態で良好な操縦性能を得るために舵面積が大きく、小舵角でも舵効は良かったが、船体を傾斜させる力も大きくなっていた。

(表1参照)

表1 舵面積比の比較

	舵数 N	舵面積 A_r (m ²)	船長 L (m)	喫水 d (m)	舵面積比 $N \cdot A_r / L d$
本船(19トン押船)	2	1.84	16.0	1.60	0.144
19トン漁船	1	1.44	19.0	2.10	0.0361
19トン引船	1	1.74	15.0	1.35	0.0859
19トン引船	1	2.00	15.0	1.50	0.0889

2.5.5 操舵の状況

船長Aの口述によれば、次のとおりであった。

*2 「レーダートランスポンダ」とは、船舶等のレーダーから発射された電波を受信し、遭難者からの信号であることを示す符号を付して応答電波を送信する装置であり、その電波を受信した船舶のレーダー画面に遭難位置を表示させるものである。

単独で航行する場合、舵効きが良く、船体が大きく傾斜するので、舵は5°程度までしか取らないようにし、また、舵を取れば、すぐ戻すようにして大舵を取らずに変針を行っていた。また、このような操舵方法を乗組員に伝え、甲板員A₁及び甲板員A₂も理解していた。

2.5.6 同型船の構造及び設備

- (1) A社担当者の口述によれば、本船の姉妹船の58三協丸（以下「同型船」という。）が建造され、平成20年1月に進水した。
- (2) 同型船の船長及び本船に乗船経験のある甲板員の口述並びに同型船の船体写真によれば、次のとおりであった。
 - ① 同型船の操舵室は、本船と同様に通路は狭く、操舵スタンドの前に操船用の椅子が置かれていた。
 - ② 単独で航行する場合、船長Aと同様に大舵としないように気を付け、舵角5°以下で行っていた。
 - ③ 同型船には、風向風速計、レーダートランスポンダ、AIS送信機及びEPIRBが設置されていた。EPIRBは、操舵室の外側のハンドレールに設置されており、自動離脱装置がないので、緊急時には手動でスイッチを入れる必要があった。

(写真4 同型船、写真5 同型船の操舵室、写真6 同型船のEPIRB設置位置 参照)

2.6 気象及び海象に関する情報

2.6.1 気象観測値

- (1) 本事故発生場所の北東約3.9kmに位置する友ヶ島灯台における観測値は、次のとおりであった。

日付	時刻	風向	風速 (m/s)
5月27日(月)	14時25分	南南西	7
	14時55分	南南西	8
	15時25分	南南西	6

- (2) 海上保安庁刊行の潮汐表によれば、友ヶ島水道の潮流は、5月27日14時07分が南流の最強時で流速は3.1knであり、17時07分に南流から北流に転じた。本事故当時の潮流は、南流2.8knであった。

2.6.2 気象庁の発表した防災気象情報

- (1) 本事故当時、神戸海洋気象台（現神戸地方気象台）が瀬戸内海に発表した風に関する海上警報は、次のとおりであった。

発表日時	警報	
5月26日 17時35分	海上風警報 ^{*3}	気圧の傾きが急になっている。 瀬戸内海では豊後水道及び紀伊水道で南東又は南の風が強く最大風速は30kn（15m/s）
23時35分	海上風警報	気圧の傾きが急になっている。 瀬戸内海では豊後水道で南東又は南の風が強く最大風速は30kn（15m/s）
27日 05時35分	海上風警報	気圧の傾きが急になっている。 瀬戸内海では豊後水道及び紀伊水道で南東又は南の風が強く最大風速は30kn（15m/s）
11時35分	海上風警報	気圧の傾きが急になっている。 瀬戸内海では南東又は南の風が強く最大風速は30kn（15m/s）

- (2) 本事故当時、徳島地方気象台が徳島・鳴門地域に発表した風及び波浪に関する注意報は、次のとおりであった。

5月27日04時26分発表

強風、波浪注意報^{*4}

風 27日昼前から27日夜のはじめ頃まで 南の風

最大風速 陸上 12m/s 海上 15m/s

波 27日昼前から27日夜のはじめ頃まで

波高 3メートル

^{*3} 「海上風警報」とは、海上で風速が28kn以上34kn未満（13.9m/s以上17.2m/s未満。風力階級は7）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のことをいう。

^{*4} 「強風、波浪注意報」とは、徳島地方気象台の警報・注意報発表基準一覧表によれば、徳島・鳴門では、平均風速15m/s以上、有義波高3m以上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。

2.6.3 一般財団法人日本気象協会の局地波浪推算データベースの推算値

標記データベースにおいて、本事故発生場所付近（地点1：北緯34°14′ 東経134°58′、地点2：北緯34°14′ 東経134°56′、地点3：北緯34°16′ 東経134°58′）における27日14時から16時の推算値は、次のとおりであった。

	時刻	波高 (m)	波周期 (s)	波向 (°)	風向 (°)	風速 (m/s)
地点1	14時	0.89	4.7	178.5	181.0	6.6
	15時	0.81	4.8	178.2	174.8	6.5
	16時	0.74	4.9	177.7	171.3	5.2
地点2	14時	0.95	4.9	174.1	180.0	6.2
	15時	0.87	5.0	173.7	174.6	6.1
	16時	0.81	5.1	173.3	170.8	5.0
地点3	14時	0.82	4.7	177.4	181.9	6.2
	15時	0.77	4.8	177.2	179.3	6.6
	16時	0.70	4.9	176.9	174.2	5.3

2.6.4 乗組員等の観測

- (1) 船長Aの口述によれば、次のとおりであった。

往航時、風は弱く白波は見えなかった。また、操業中の漁船を認めた。復航時、徳島小松島港界付近で操船を交代したとき、沖の方に白波等を見なかった。また、居室で休んでいるときには、波等による揺れをほとんど感じなかった。

- (2) 転覆した本船を発見したパイロットボートの船長の口述によれば、次のとおりであった。

風向は南、風速は6～7m/s、波高は2～3m、波周期は5秒前後であった。潮流は南流で風と反対であり、三角波^{*5}が発生していた。自船は、通常18knで航行するが、10kn程度に減速して航行していた。漁船が操業できるような状況ではなく、漁船を認めなかった。

2.6.5 潮流と波浪の関係

文献^{*6}によれば、次のとおりである。

^{*5} 「三角波」とは、進行方向の異なる波がぶつかったときにできる峰のとがった波をいう。

^{*6} 文献：磯崎一郎著、「波浪学のABC」、成山堂書店、2006年8月発行、pp.34-35

流れに逆らって吹く強風で発達する波は相対的に風が強まり、また、流れがない場合よりも群速度が遅くなり、実効的に強風の吹走距離が長くなって、一層大きな波ができます。それに加えて、波長が短くなりますので、波形勾配が急峻になって海面は一層荒れた状態になります。

2.7 船舶の運航管理等に関する情報

(1) 船長A及びA社担当者の口述によれば、次のとおりであった。

A社は、5月29日の朝までに本件土運船を大阪から徳島小松島港に回航することを依頼され、A社担当者が船長Aに5月24日にその旨を伝えた。船長Aは、テレビで天気を確認したところ、5月28日から荒れるとの予報が出ていたため、27日に出発することを決めた。

船長Aは、27日の出発前に天候を確認したところ、遅くなるほど荒れる予報となっていたため、甲板員A₁及び甲板員A₂と相談し、07時の出発予定を早めることとしたが、瀬戸内海に海上風警報が発表されていることは知らなかった。船長Aは、出発後、最新の気象情報を入手しておらず、徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報が発表されていることを知らなかった。A社担当者は、船長Aに対し、帰りを急ぐ必要はないと話していた。

(2) 本件土運船の回航を依頼した会社に提出した回航計画書によれば、次のとおりであった。

① 出発は、船長AとA社担当者が天候等の状況を考慮して決定する。

② 押航を中止する気象等の条件は、次のとおりとする。

- ・風速 10m/s以上
- ・波高 1.5m以上
- ・視界 1,000m以下

2.8 類似の事故

当委員会の報告書によれば、押船が単独で航行中に転覆した事例は2件であった。

(1) 押船（総トン数19トン）は、神奈川県横浜市本牧沖を航行中、平成24年6月13日、右舷から海水が流入して復原力が減少し、右舷正横寄りの風と波を受け、左傾斜が増大して転覆した。

(2) 押船（総トン数19トン）は、沖縄県糸満市喜屋武^{きやん}埼東方沖を航行中、平成23年11月10日、左舷船首から連続して打ち込んだ海水が後部甲板に滞留して復原力が減少し、引き返そうと左に回頭したところ左舷側に傾き、更に波を受け転覆した。

2.9 A船の復原性及び転覆に関する調査

独立行政法人海上技術安全研究所による調査結果は、概略次のとおりであった。

2.9.1 同型船による実船計測

本船の復原性能及び操舵による横傾斜角の推定のため、同型船による傾斜試験、旋回試験及び操舵試験を実施した。

(1) 船体状態及び復原性能

傾斜試験及び乾舷^{*7}の計測から推定した燃料及び清水がほぼ満載の試験時の同型船の状態（以下「試験状態」という。）及び試験時から本船の事故発生時の燃料の積載状況等を考慮して推定した同型船の状態（以下「事故状態」という。）を表2に示す。また、各状態の復原力曲線^{*8}を図1に示す。図1では、排水量の増加により、復原てこ（GZ）の最大値及び最大となる横傾斜角が減少していることが示された。喫水が深くなることにより、予備浮力^{*9}が減少していることが影響していると考えられる。

表2 船の状態

		試験状態	事故状態
排水量	W (t)	1 4 1. 1 1	1 2 9. 2 1
重心高さ	KG (m)	1. 9 9	2. 0 3
重心の前後位置	mid-G (m)	2. 1 2	1. 1 9
船尾喫水	d a (m)	2. 2 4	1. 8 5
船首喫水	d f (m)	1. 1 3	1. 4 8
平均喫水	d m (m)	1. 6 8	1. 6 6
トリム	τ (m)	1. 1 1	0. 3 7
メタセンタ高さ ^{*10}	G_0M (m)	0. 7 6	0. 7 0
ブルワーク ^{*11} 上端 が没水する角度	ϕ_b (°)	1 5. 7	2 0. 7

重心の前後位置 (mid-G) : 船体中央からの船首尾方向の重心位置 (+ : 船首方)

メタセンタ高さ (G_0M) : 燃料等の自由表面影響による見かけの重心上昇 (GG_0) を考慮

^{*7} 「乾舷」とは、上甲板上面から喫水線までの垂直距離をいう。

^{*8} 「復原力曲線」とは、船体横傾斜角に対する復原てこ（GZ : 横傾斜を元に戻そうとする偶力のてこの長さ）の値をグラフ化したものをいう。

^{*9} 「予備浮力」とは、喫水線以上の密閉空間の容積に相当する浮力のことをいう。

^{*10} 「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けたときの浮力の作用線との交点であるメタセンタまでの高さをいう。

^{*11} 「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。

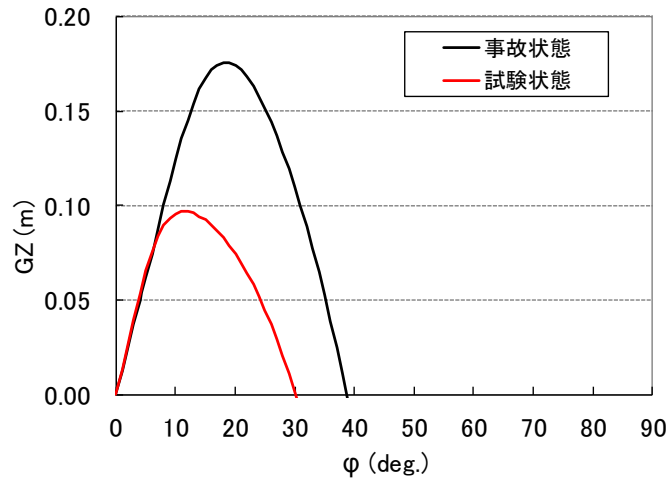


図1 復原力曲線

(2) 操舵に伴う横傾斜角

旋回試験及び操舵試験時に計測した舵角と横傾斜角の関係は図2のように示される。横軸は舵角であり、正が右舵を表している。縦軸は横傾斜角を表しており、正は左舷側への傾斜を表している。図中に線形近似式を示している。実船計測結果から旋回特性等を求め、本事故発生時の船速、 G_0M 、 KG を用いて事故状態時の舵角と横傾斜の関係を求めれば、図3のように表される。

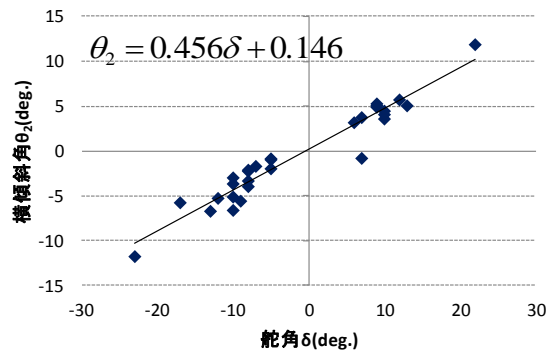


図2 舵角と横傾斜角の関係 (実船計測)

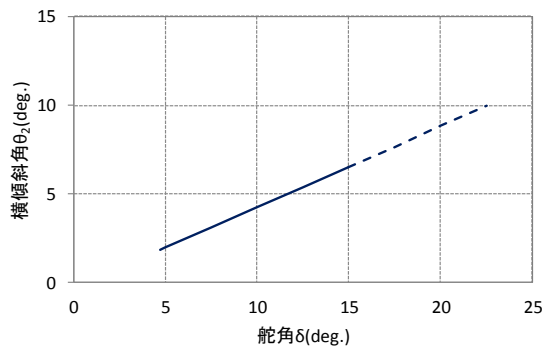


図3 本船における舵角と横傾斜角の関係

2.9.2 波浪中の操舵による横傾斜と転覆の関係

平均波周期 4.8 秒、有義波高*¹² 2.0 m の波浪中を速力 9 kn、波の主方向との出会い角 62～63° で航行しているとき、事故状態の横傾斜角を推定した結果は、次のとおりであった。

不規則波浪中での横揺れ応答の統計的予測を行い、200 回に 1 回の出現頻度で発生する最大横揺れ角（以下「最大横揺れ角」という。）を評価すれば、事故状態では 15.6° となる。なお、本事故発生場所付近の波周期から、出会い波 200 波に 1 波の高波の出会い頻度は約 22 分に 1 回の頻度に相当する。最大横揺れ角の揺れの発生と右舵による横傾斜の発生のタイミングが重なった場合の横傾斜角をエネルギーバランスの考え方をを用いて推定した結果を図 4 及び表 3 に示す。図 4 中の a は傾斜方向のエネルギー、b は復原方向のエネルギーを示しており、エネルギーバランスの考え方をを用いれば、a と b の面積が等しくなる角度まで船体は横傾斜する。

舵角は、

- ① ブルワーク上端が没水する限界の舵角
- ② 転覆する限界の舵角

の 2 種類について推定した。表 3 では、ブルワーク上端が没水する舵角を黄色で示し、転覆する舵角を赤色で示した。ブルワーク上端が没水すれば、ブルワークが抵抗となるため、復原しにくくなり、引き続く波の作用で転覆につながる危険性が高くなる。なお、図 4 の右図において、舵角が 9.7° より大きくなれば、a の面積 > b の面積となって転覆する。

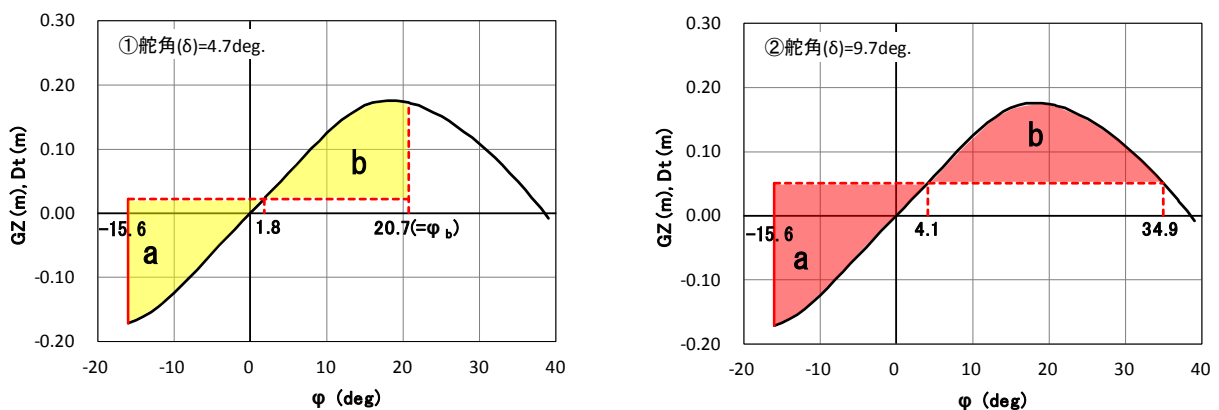


図 4 横揺短期予測値を用いたエネルギーバランス計算

*¹² 「有義波高」とは、ある地点で連続する波を観測したとき、波高の高い方から順に全体の 1/3 の個数の波を選び、これらの波高を平均化したものをいう。

表3 事故状態の横傾斜角

	舵角	操舵に伴う 横傾斜角	横傾斜角
①	4.7°	1.8°	20.7° (= ϕ_b)
②	9.7°	4.1°	34.9°

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から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、平成25年5月27日04時10分ごろ本件土運船を船首に連結して大阪市此花区西島棧橋を出発し、12時00分ごろに徳島小松島港に入港したものと考えられる。
- (2) 本船は、本件土運船を徳島小松島港で離した後、12時10分ごろ阪神港大阪区に向けて同港を出発したものと考えられる。
- (3) 本船は、友ヶ島水道に向ける針路とし、約9knで航行中、左舷側に傾き、その後、転覆した可能性があると考えられる。
- (4) 船長A、甲板員A₁及び甲板員A₂は、救助されたが、甲板員A₁及び甲板員A₂が死亡した。

3.1.2 事故発生日時及び場所

2.1から、本船は、徳島小松島港の港界から友ヶ島水道に向ける針路とし、約9knで往航時と同様に淡路島と沼島の間を航行した可能性があると考えられることから、針路は約060°であり、本事故の発生日時は、平成25年5月27日14時50分ごろで、発生場所は、生石鼻灯台から115°1.7km付近であった可能性があると考えられる。

3.1.3 死亡者の状況

2.1.2(2)及び2.2から、甲板員A₁及び甲板員A₂は、操舵室内で救助されたものと考えられるが、死亡し、死因は溺水であった。

3.2 事故要因の解析

3.2.1 乗組員の状況

2.4から、船長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。また、甲板員A₁及び甲板員A₂の健康状態は、良好であったものと考えられる。

3.2.2 船舶の状況

2.5.2(4)から、船体、機関及び機器類に不具合又は故障はなかったものと考えられる。

3.2.3 気象及び海象の状況

2.6から、次のとおりであった。

天気は曇り、風速約7～8m/sの南南西の風が吹き、波向は南、波高は約2～3m、波周期は約5秒であった。また、潮流は南流約2.8knであったものと考えられる。

神戸海洋気象台は、26日以降、瀬戸内海に海上風警報を、徳島地方気象台は、27日04時26分に徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報をそれぞれ発表していた。

3.2.4 本船における気象及び海象の把握状況

2.1、2.6及び2.7から、次のとおりであったものと考えられる。

船長Aは、徳島小松島港に向けて出発前にテレビで天気を確認しており、5月27日は、遅くなれば、荒れるとの認識はあったが、海上風警報が発表されていることを知らなかった。また、徳島小松島港に向けて出発後は最新の気象情報を入手していなかったことから、徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報が発表されていることを知らなかった。

3.2.5 本船の復原性に関する解析

2.5.3及び2.9から、同型船の復原力曲線において、復原てこの最大値及び復原てこが最大となる傾斜角が、排水量により変化していることから、本船は、燃料等の積載状況により、復原性が変化するものと考えられる。

3.2.6 本船の操舵に伴う傾斜角の解析

2.5.4、2.5.5及び2.9から、本船は、土運船等と一体となった状態で良好な操縦性を確保するため、舵面積比については、同等な船型の漁船の約4.0倍、引船の約1.6倍となっており、単独航行時には、舵角5°で2.0°、10°で

4.3°、20°で8.8°の外方傾斜が生じたものと考えられる。

3.2.7 波浪中における操舵による横傾斜と転覆に係る解析

2.9.2 及び 3.2.3 から、有義波高2.0m、波周期4.8秒の波浪中で4.7°以上の舵角とした場合、ブルワーク上端が没水し、復原しにくくなり、引き続く波の作用で転覆する危険性が高まると評価されることから、本船は、波高約2～3m、波周期約5秒の波を右舷側から受けて航行中、4.7°以上の舵角となる右舵を取った際、ブルワーク上端が没水する角度を超える左舷側への傾斜が生じ、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、更に波浪を受けて左舷側へ転覆したのものと考えられる。

転覆に至った操舵の状況及び転覆して発見された際の本船の舵がほぼ中央であった理由については、明らかにすることができなかった。

3.2.8 安全管理に関する解析

2.5.2(2)、2.6.4(1)、2.7及び3.2.4から次のとおりであった。

- (1) A社は、徳島小松島港までの回航時は、回航計画書を作成して押航中止の気象等の条件を定めていたが、阪神港大阪区への航行時には航行中止基準がなかったものと考えられる。
- (2) A社担当者は、船長Aに対し、帰りは急ぐ必要はないと伝えていたものと考えられる。
- (3) A社は、押船が単独航行時には操舵による傾斜が押航時に比べて大きく、波浪中における舵角の状況によっては転覆する危険性があることを理解し、操舵法を船長に周知するとともに、航行中止基準を設定し、この基準を船長が遵守するために必要な最新の気象及び海象情報の提供を行い、航行中には気象及び海象の変化に注意させ、早期避難等の措置を定め、安全航行に努めることが必要である。

3.2.9 救助の状況に関する解析

2.1、2.2及び2.5.6(2)から、次のとおりであった。

本船は、転覆していたところ、航行中のパイロットボートに発見され、118番通報が15時15分ごろに行われ、巡視船等が出動し、船長Aは船内居住区から、甲板員A₁及び甲板員A₂は操舵室からそれぞれ救助されたものと考えられるが、甲板員A₁及び甲板員A₂は死亡した。

船長Aは、居室で仮眠中に傾斜したことから、居室から出ようとしたが、水密扉が開かず、居室内に閉じ込められ、本船が転覆し、携帯電話でA社等と連絡を取る

うとしたものの、電波が届かず、本事故の発生を通報することができなかったものと考えられる。また、EPIRBは、設置されていなかった。本事故においては、事故発生約25分後に航行中の船舶に発見されたため、船長Aは救助されたが、事故の発生を迅速、確実に救助機関に通報できるよう、EPIRBを設置することは有効であるものと考えられる。

このため、同型船ではEPIRBは、操舵室の外のハンドレールに自動離脱装置のないタイプのものが設置されているが、本事故のような場合、EPIRBを作動させることができないことが予想されるので、EPIRBの積付け場所、積付け方法及び自動離脱装置の整備について、押船の事故の様態を検討し、事故時に迅速にEPIRBを作動させることができるように措置することが望まれる。

3.2.10 事故発生に関する解析

2.1、2.5、2.6、2.9及び3.2.5～3.2.7から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報及び瀬戸内海に海上風警報が発表されている状況下、5月27日12時10分ごろ徳島小松島港から阪神港大阪区に向けて出発し、友ヶ島に向ける約60°の針路として約9knの速力により、単独で航行した可能性があると考えられる。
- (2) 本船は、淡路島生石鼻東方を波高約2～3m、波周期約5秒の波を右舷側から受けて航行中、4.7°以上の舵角となる右舵を取ったことから、ブルワーク上端が没水する角度を超える左舷側への傾斜が生じ、ブルワークが抵抗となって復原しにくくなり、更に波浪を受けて左舷側へ転覆した可能性があると考えられる。
- (3) 本船は、転覆し、甲板員A₁及び甲板員A₂が死亡した。

4 原因

本事故は、徳島・鳴門地域に強風、波浪注意報及び瀬戸内海に海上風警報が発表されている状況下、本船が、淡路島生石鼻東方において、阪神港大阪区に向けて約9knの速力で波高約2～3m、波周期約5秒の波を右舷側から受けて単独で航行中、4.7°以上の舵角となる右舵を取ったため、ブルワーク上端が没水する角度を超える左舷側への傾斜が生じて復原しにくい状況となり、更に波浪を受け、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。

5 再発防止策

本事故は、本船が、淡路島生石鼻東方において、阪神港大阪区に向けて約9knの速力で波高約2～3m、波周期約5秒の波を右舷側から受けて単独で航行中、4.7°以上の舵角となる右舵を取ったため、ブルワーク上端が没水する角度を超える左舷側への傾斜が生じて復原しにくい状況となり、更に波浪を受け、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。

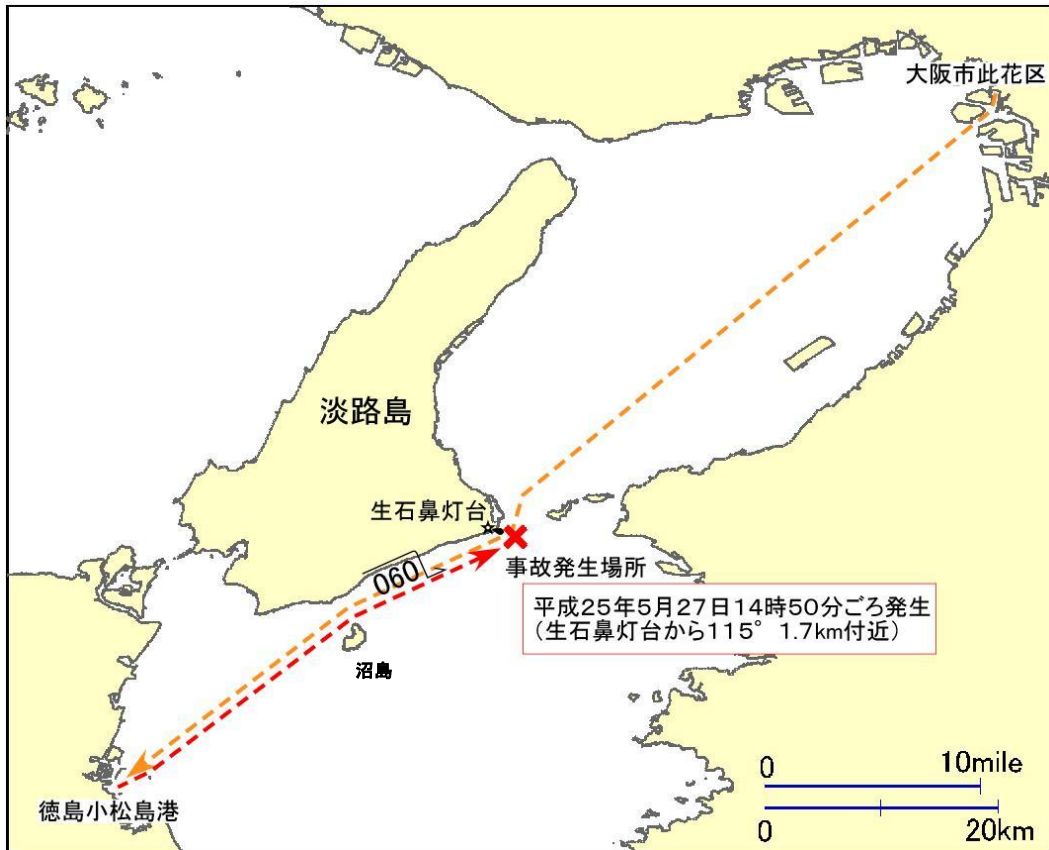
本船は、燃料等の積載状況によっては、復原性が低下する傾向にあり、荒天においては、波浪により、大きな横傾斜が発生しやすい。また、押船は、土運船等と一体となった状態で良好な操縦性が確保できるよう、舵が設計されているため、単独航行時には舵の影響で傾斜しやすい。

このため、本事故のように波浪中を単独で航行する場合、舵角の状況によっては転覆する危険性がある。

したがって、A社は、押船の単独航行時の注意事項として以下の項目をマニュアル等で定め、船長に対し、遵守するように指導する必要がある。

- ① 燃料等の積付け制限
- ② 航行中止基準（気象、海象等）
- ③ 最新の気象情報等の提供並びに航行中の気象及び海象の変化に対する対応措置
- ④ 操舵法（制限舵角、船体傾斜を防止する徐々の変針等）

付図1 事故発生経過概略図



付図2 本船の一般配置図

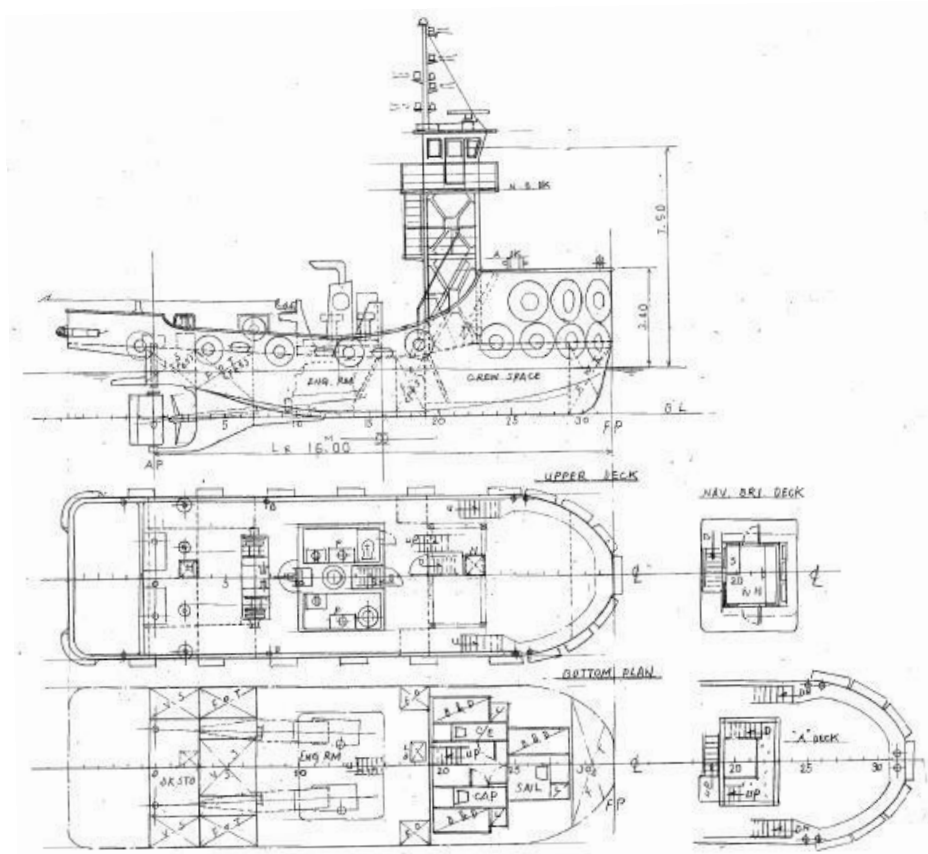


写真1 本船転覆後の状況



写真2 本事故発生前の本船の状況（1）



写真3 本事故発生前の本船の状況（2）



写真4 同型船



写真5 同型船の操舵室



写真6 同型船のEPIRB設置位置



押船転覆事故に係る解析調査 報告書

平成26年2月

独立行政法人 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. 実船計測	2
2. 1 傾斜試験	2
2. 2 旋回試験及び操舵試験	5
3. 転覆に至るメカニズムの検討	12
3. 1 事故発生当時の復原性	12
3. 2 事故関連要因の検討	13
3. 3 事故当時の風、波による横傾斜	14
3. 4 操舵に伴う横傾斜	15
3. 5 転覆メカニズムの検討	16
4. まとめ	20
参考文献	21
付録1 実船計測結果に基づく操舵に伴う横傾斜の推定	22
付録2 事故発生当時の横揺の推定	26

1. はじめに

1. 1 解析調査の目的

本解析調査は、平成 25 年 5 月 27 日、友ヶ島水道南端（兵庫県洲本市生石鼻東方沖 1.7 km 付近）で発生した押船 A 丸転覆事故調査に資するため、同型船の重心計測及び操舵試験等を行い、試験結果を解析することで、事故発生当時の A 丸（以下、本船と言う。）の復原性を推定するとともに、事故時の操舵に伴う傾斜外力が本船の復原性能に及ぼした影響等を考慮して転覆のメカニズムを検討することを目的とする。

1. 2 解析調査の概要

(1) 実船計測（第 2 章）

- ・同型船の喫水（乾舷）計測及び傾斜試験を実施し、傾斜試験時の排水量、重心位置を算定した。また、重量重心計算を行って傾斜試験用の weight 等を降ろして実施した旋回試験及び操舵試験時の排水量、重心位置を算定するとともに、復原力計算を行ってメタセンタ高さ等を推定した。
- ・舵角を変えた旋回試験、操舵試験を実施して横傾斜角、旋回角速度等を計測し、同型船の操舵に伴う横傾斜の方向及び舵角と横傾斜角、旋回角速度との関係を調査した。

(2) 転覆メカニズムの検討（第 3 章）

- ・実船計測結果を基に、調査官から指示された、事故発生当時の燃料、清水他の搭載量（重量）及び搭載位置（重心位置）を考慮して算定した排水量、重心位置から、事故発生当時の本船の復原性を推定した。
- ・調査官から提示された気象・海象下で推定した復原性を有する本船が転覆に至る状況について、想定される事故関連要因に起因する外力による最大横傾斜角を船舶復原性規則の所謂 C 係数基準におけるエネルギーバランスの考え方を援用して計算するなどして検討を行った。
- ・その際、事故発生当時の想定される波浪による横揺と併せて、同型船の旋回試験、操舵試験結果を基に事故発生当時の操舵に伴う横傾斜の影響を考慮した。

なお、実船計測結果を基に本船の操舵に伴う横傾斜角の推定方法について検討した結果と事故発生当時の想定される波浪による横揺を推定した結果を付録としてまとめた。

2. 実船計測

平成 25 年 12 月 5 日に、転覆した本船の同型船を用いた実船計測を広島県尾道市浦崎町所在の桑田船渠株式会社の岸壁及びその沖合で行った。今回の実船計測では、傾斜試験、旋回試験及び操舵試験を実施した。

2. 1 傾斜試験

最初に喫水（乾舷）計測及び傾斜試験を実施し、傾斜試験時の排水量、メタセンタ高さを算定した。同型船の船長によると、計測当日は燃料、清水とも満載とのことであった。

計測を行った同型船の一般配置図を図 2.1 に、主要目を表 2.1 に示す。また、計測当日の同型船の写真写真を写真 2.1 に示す。

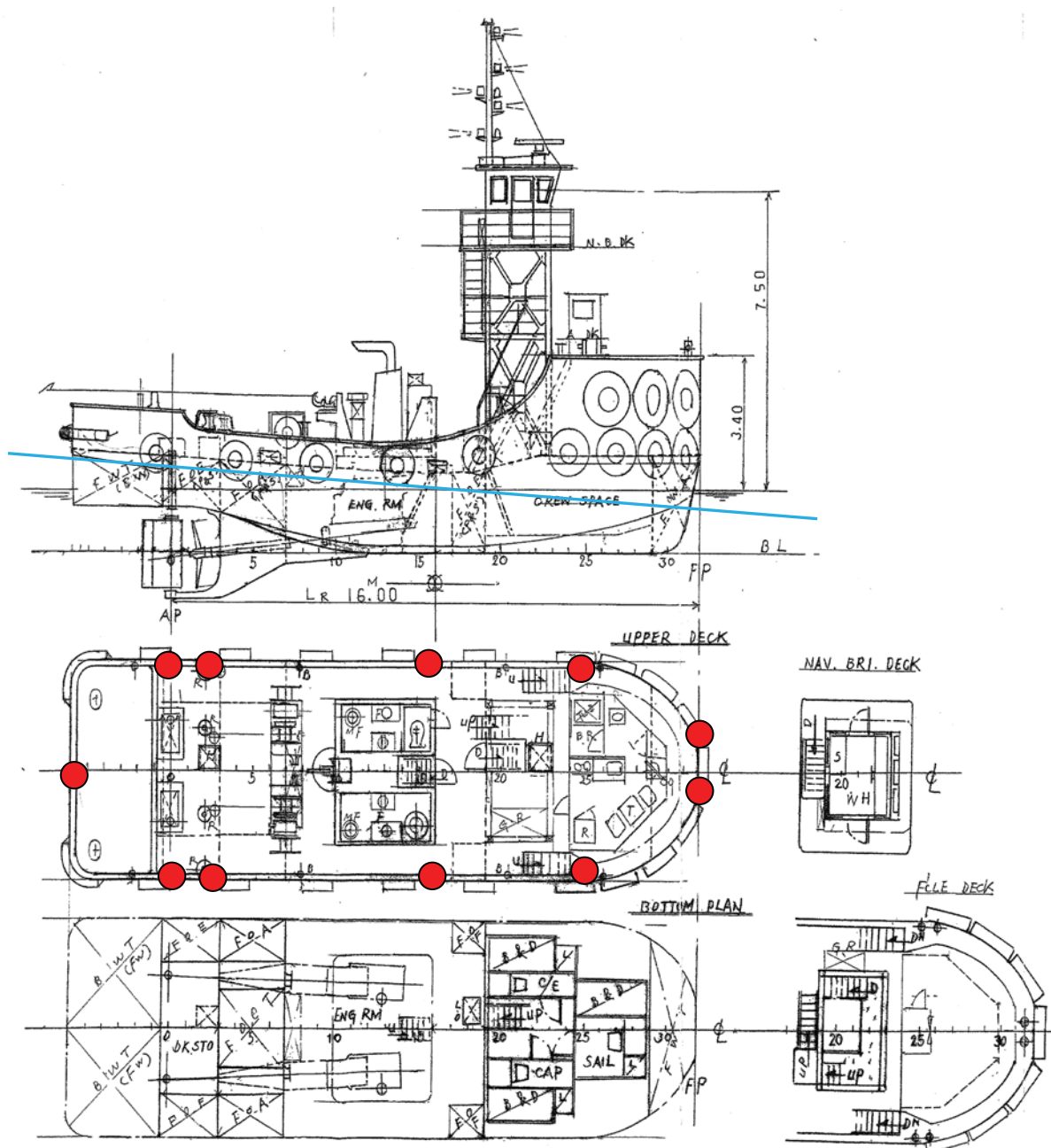


図 2.1 一般配置図（同型船）

計測を行った同型船は転覆した本船と同じく、1,000PSの主機を2基搭載した2軸2舵船である。調査官から示された資料によると、プロペラは固定ピッチで、直径1.700m、翼数4、展開面積比0.65となっており、舵は高さ1.750m、幅1.050mで舵面積は1.84m²となっている。



表 2.1 主要目 (同型船)

Loa (m)	19.00
Lpp (m)	16.00
B (m)	5.50
D (m)	2.00

写真 2.1 試験当日の同型船

(1) 試験時の喫水 (乾舷)

傾斜試験の解析に必要な試験時の排水量を算定するために、船長方向の6つの位置で船体中心線上あるいは両舷端 (合計11か所: 図 2.1 ●印) から水面まで下げ振りをおろし、各位置におけるブルワーク上端から水面までの鉛直距離を計測した。そして、計測した各位置のブルワーク上端の基線上高さからブルワーク上端から水面までの鉛直距離の計測値を差し引いて、各計測位置での喫水を求めた (図 2.2)。試験時の喫水線を側面図上 (図 2.1 青線) に示す。

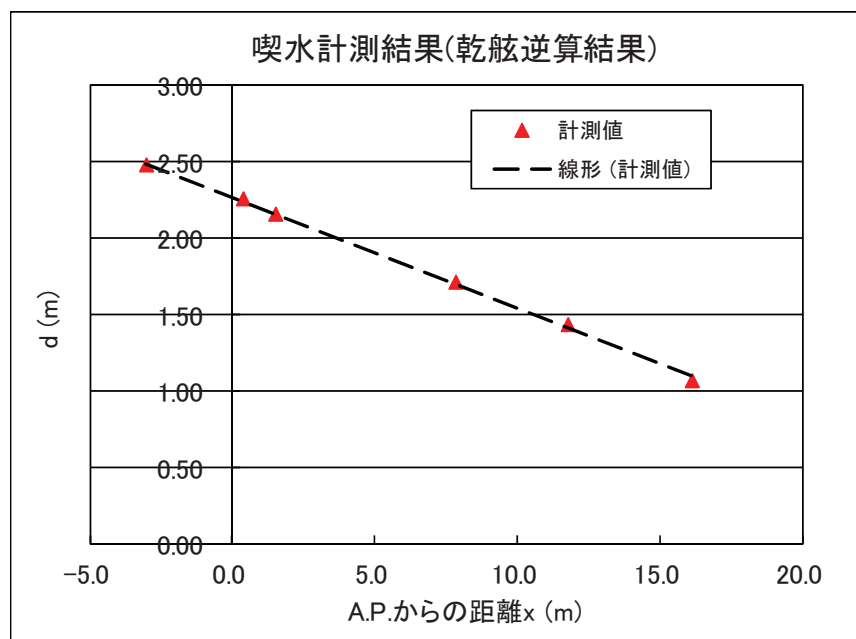


図 2.2 喫水の計測結果

各計測位置での喫水から推定した、A.P. 位置での喫水 (da) と F. P. 位置での喫水 (df) 及び

喫水計測時の排水量 (W) を算定結果を表 2.2 に示す。

表 2.2 喫水計測時の状態

da (m)	df (m)	W (t)
2.27	1.10	141.88

(2) 傾斜試験

船上に搭載した水入りポリタンク 33 個 (合計重量 626kgf) 及び人員 5 名 (合計体重 434kgf) を舷側方向に移動させて傾斜試験を実施した (写真 2.2)。傾斜用 weight (水入りポリタンク及び人員) の移動による傾斜モーメントは、個々の重量及び移動距離を合算して算出した。

試験時に計測された傾斜角を図 2.3 に示す。片舷の傾斜角は約 1.7 度であり、傾斜試験時の状態の復原力曲線 (図 2.4 赤線) と比較して十分な精度で計測を行えたことを確認した。

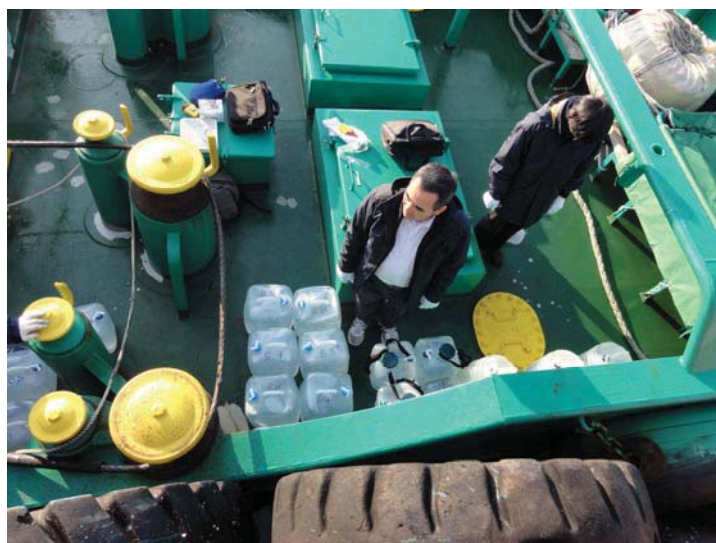


写真 2.2 傾斜試験 (左舷側傾斜時)

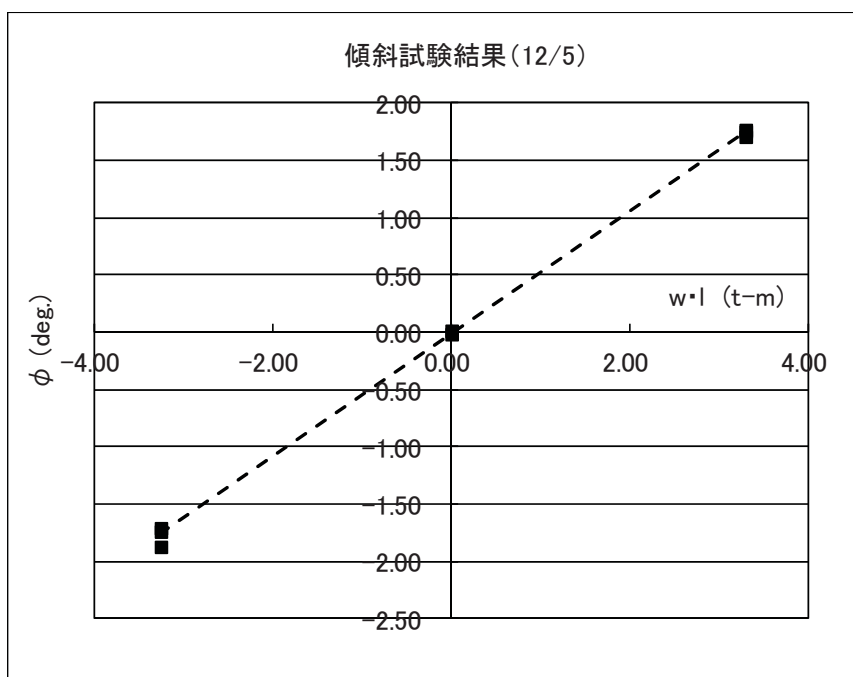


図 2.3 傾斜角の計測結果 (傾斜試験)

表 2.3 にメタセンタ高さ GM の算定結果と関連するデータ（試験時の排水量 W、傾斜用 weight 重量 w、平均移動距離 l 、傾斜角 ϕ ）を示す。表 2.3 に示した排水量 W には、喫水計測後に乗船した人員の体重を算入している。

表 2.3 傾斜試験解析結果

W (t)	w (t)	l (m)	ϕ (deg.)	GM (m)
142.02	1.060	3.09	1.74	0.759

2. 2 旋回試験及び操舵試験

舵角を変えた旋回試験、操舵試験を実施して横傾斜角、旋回角速度等を計測し、操舵に伴う横傾斜の方向及び舵角と横傾斜角、旋回角速度との関係を調査した。また、計測データを基に、同型船の操舵に伴う横傾斜角の推定方法について検討した（付録 1）。

(1) 試験状態

旋回試験及び操舵試験は、傾斜試験用の weight 等を降ろして実施した。そこで、重量重心計算を行って旋回試験及び操舵試験時の排水量、重心位置を算定するとともに、復原力計算を行ってメタセンタ高さ等を推定した。

表 2.4 に旋回試験及び操舵試験時の排水量 W、重心位置（KG：上下位置、mid-G：前後位置）及び各種タンクの自由表面による見かけの重心上昇量（GG₀）の算定結果を示す。なお、表中には参考のため、傾斜試験時の値も示す。

表 2.4 旋回試験及び操舵試験状態

	W (t)	mid-G (m)	KG (m)	GG ₀ (m)
旋回試験及び操舵試験時	141.31	-2.11	1.99	0.03
傾斜試験時	142.02	-2.19	1.99	0.03

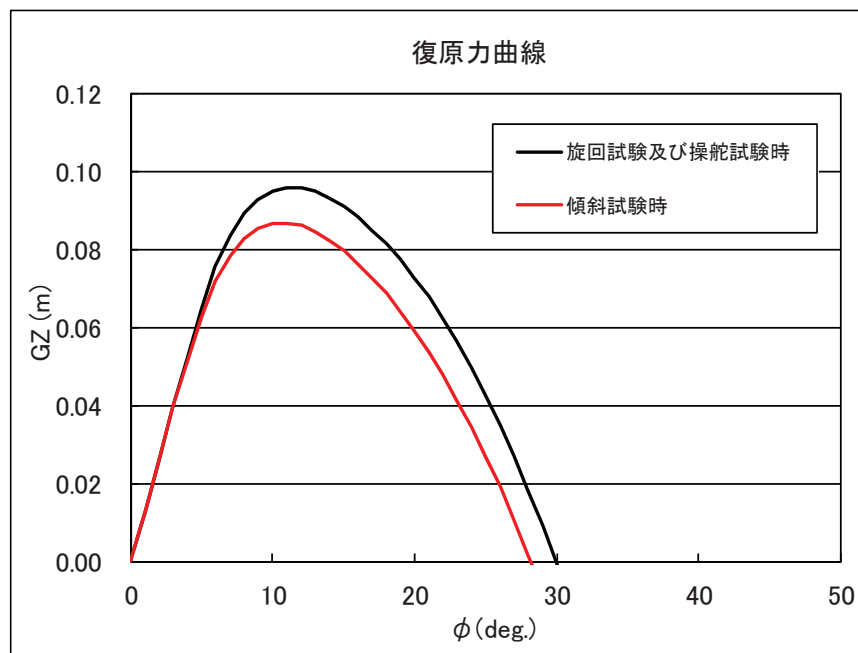


図 2.4 旋回試験及び操舵試験時の復原力

図 2.4 に表 2.4 に示した旋回試験及び操舵試験時の状態で復原力を計算した結果を示す(黒線)。なお、図中には参考のため、傾斜試験時の状態の復原力を赤線で示す。また、表 2.5 に旋回試験及び操舵試験時の喫水 (da : 船尾喫水, df : 船首喫水, dm : 平均喫水)、トリム (τ : 船尾トリム正)、タンクの自由表面影響を考慮したメタセンタ高さ (GoM) を傾斜試験時の値とともに示す。

表 2.5 に示したように、旋回試験及び操舵試験時のメタセンタ高さ GoM は 0.76m であり、傾斜試験時の値と等しくなっている。一方、復原力の最大値 (GZmax) は旋回試験及び操舵試験時と傾斜試験時で約 0.01m 差異が見られる (図 2.4)。これは傾斜試験用の weight 等を降ろしたことで重心の前後位置が変化 (表 2.4) し、傾斜試験時に比べて旋回試験及び操舵試験時の船尾トリムが若干小さくなったこと (表 2.5) が関連していると考えられる。

表 2.5 旋回試験及び操舵試験時の喫水、トリム及びメタセンタ高さ

状態	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)	GoM (m)
旋回試験及び操舵試験時	2.24	1.13	1.69	1.11	0.76
傾斜試験時	2.27	1.10	1.69	1.17	0.76

(2) 試験概要

旋回試験及び操舵試験は、事故発生当時の本船の推定船速と同じ約 9kn で直進した状態から実施した。試験内容を表 2.6 に示す。

表 2.6 試験内容 (旋回試験、操舵試験)

TNO	試験内容	指示舵角
10	旋回試験	5° P (360° 旋回)
11	旋回試験	5° P
12	旋回試験	5° P
13	旋回試験	7° P
14	旋回試験	7° P
15	旋回試験	10° P
16	旋回試験	10° P
17	旋回試験	10° S
18	旋回試験	10° S
20	操舵試験	5° P→5° S→中央
21	操舵試験	7° S→7° P→中央
22	操舵試験	10° P→10° S→10° P→中央
23	操舵試験	10° P→10° S→10° P→中央
24	操舵試験	S→中央→P→中央(大舵角、急速)

今回は事故発生当時の本船の想定される操舵に近い状況で試験を行うため、指示舵角は通常の操船で取る舵角より大きな値とし、旋回試験では、Tno.10 を除いて 180° 旋回までで試験を終了した。また、操舵試験は、通常の試運転と異なり、戻し舵による危険性を確認するために実施したものであり、設定値の舵角に到達するまでの時間の計測を意図したものではない。

旋回試験及び操舵試験における計測項目、計測機材を以下に示す。船速及び航跡は、操舵室及び曳航アーチ上に各 1 台設置した GPS で計測し、ログデータとして保存した。横揺角、回頭角、回頭角速度は操舵室に設置した MEMS ジャイロで計測し、計測データを PC に収録した。また、

舵角は操舵室内に取り付けたビデオカメラで舵角指示器を撮影した画像から読み取った。

①計測項目

船速、航跡、横揺角、回頭角、回頭角速度、舵角

②計測機材

GPS（操舵室、曳航アーチ上）、MEMS ジャイロ（操舵室）、ビデオカメラ（操舵室）

(3) 試験結果

図 2.5 及び図 2.6 に横揺角（Roll：黒線）、回頭角（Yaw：赤線）及び回頭角速度（Yaw_rate：緑線）の計測例を横軸に計測開始からの時間をとって示す。横揺角は左舷下げ、回頭角及び回頭角速度は右旋回を正として示しており、何れも零点補正前のデータである。

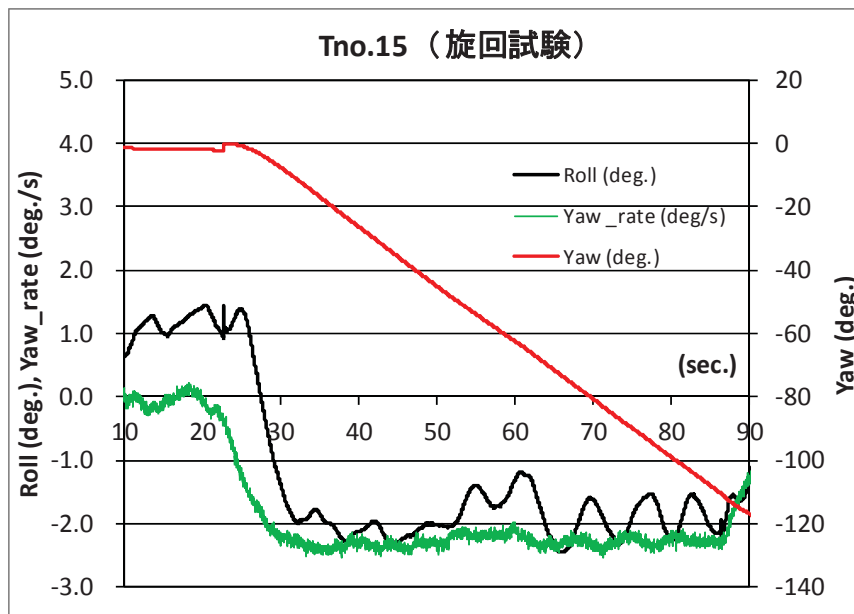


図 2.5 計測例 (Tno.15 旋回試験：指示舵角左 10deg.)

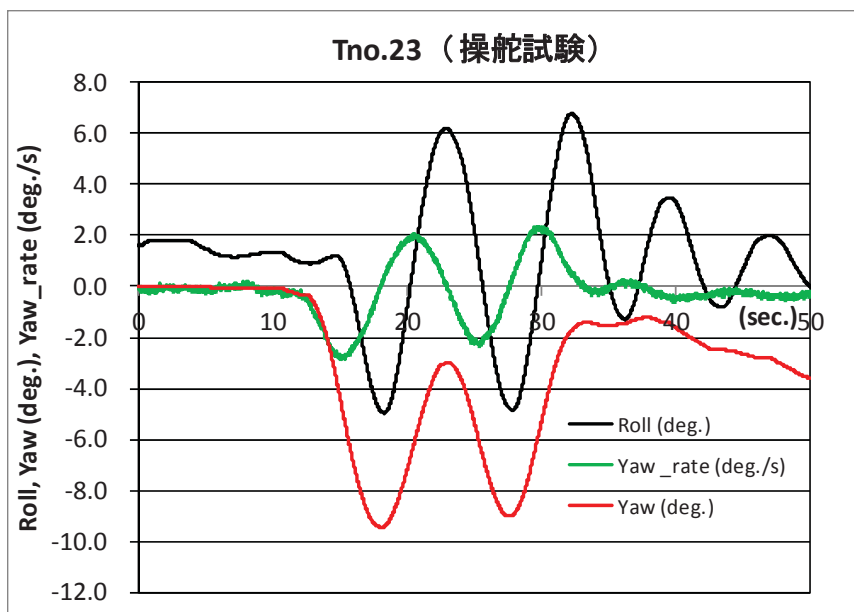


図 2.6 計測例 (Tno.23 操舵試験：指示舵角左右 10deg.)

試験結果をまとめて表 2.7 に示す。船速は GPS ログの試験中（解析範囲）の平均速度である。舵角、横傾斜角（横揺角）及び回頭角速度は、旋回試験では平均値であり、操舵試験では最大値である。また、いずれの横傾斜角も外方傾斜である。

表 2.7 試験結果（旋回試験、操舵試験）

T.NO.	試験の種類	舵角 (deg)	操舵方向	船速 (kn)	横傾斜角 (deg)	角速度 (deg/sec)
10	旋回試験	5	Port	9.08	-0.89	-0.97
11	旋回試験	5	Port	9.21	-2.00	-1.21
12	旋回試験	5	Port	9.05	-1.00	-1.11
13	旋回試験	8	Port	9.06	-3.36	-1.96
14	旋回試験	8	Port	9.00	-2.72	-1.83
15	旋回試験	10	Port	9.16	-3.01	-2.56
16	旋回試験	10	Port	8.95	-3.69	-2.57
17	旋回試験	10	Starboard	9.13	4.04	2.13
18	旋回試験	10	Starboard	9.06	3.55	2.10
20	操舵試験	7	Port	9.15	-1.73	-1.20
		7	Starboard		3.71	1.63
		8	Port		-2.15	-1.51
		6	Starboard		3.14	1.20
21	操舵試験	9	Starboard	8.91	5.04	1.98
		8	Port		-3.99	-1.78
		9	Starboard		5.24	1.72
		9	Port		-5.61	-2.15
22	操舵試験	10	Port	8.43	-5.15	-2.36
		9	Starboard		4.86	1.63
		12	Port		-5.30	-2.57
		12	Starboard		5.68	2.22
23	操舵試験	13	Port	10.53	-6.74	-2.86
		10	Starboard		4.43	2.09
		10	Port		-6.64	-2.23
		13	Starboard		5.02	2.36
24	操舵試験	22	Starboard	9.90	11.84	4.95
		17	Port		-5.79	-3.48
		23	Port		-11.79	-5.50
		7	Starboard		-0.84	0.01

図 2.5、図 2.6 及び表 2.7 より、同型船の操舵に伴う横傾斜の特徴としてとして、①有意な内方傾斜が発生しないこと、②操舵角度に対応して比較的大きな外方傾斜が発生すること、③操舵に対する横傾斜の応答（外方傾斜の発生）は比較的是早いことなどが分かる。

以下、計測結果に関する考察を行った。

①横傾斜角

表 2.7 に示した計測した舵角と横傾斜角の関係を図 2.7 に示す。横軸は舵角（ δ ）であり、右舵を正、左舵を負として表している。縦軸は横傾斜角（外方傾斜角 θ_2 ）を表しており、正は左舷側への傾斜（右旋回での外方傾斜）を表している。(a) 図が旋回試験、(b) 図が操舵試験での計測結果であり、(c) 図に全ての計測結果をまとめて示している。

旋回試験（(a) 図）に比べて操舵試験（(b) 図）の計測結果にバラツキが見られるが、旋回試験では時間平均を取っているのに対し、操舵試験では瞬間値（最大値）を取っていることに

加え、舵角指示器の撮影画像の読取り誤差や、指示器自体の精度上の限界も影響したものと考えられる。

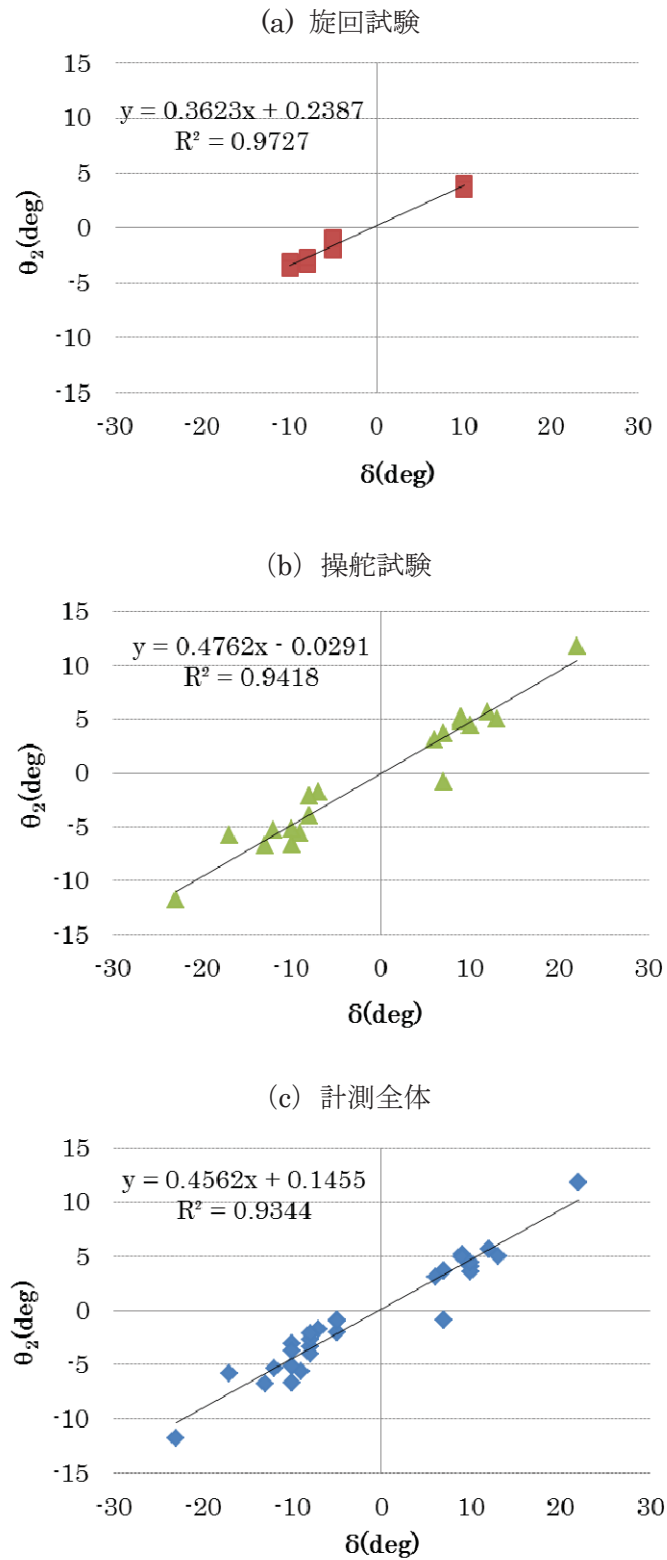


図 2.7 計測した舵角と横傾斜角

なお、図 2.7 の各図中には、計測値の線形近似式を示しており、今回の実船計測では、計測

された横傾斜角は舵角に対してほぼ線形の関係があることが分かる。また、その 1 次の係数は旋回試験結果より操舵試験結果の方が大きくなっており、その原因としては、横傾斜方向の慣性の他、操舵試験の場合舵を反転する際に舵力が横傾斜角を増加させる方向に作用するため[1]と考えられる。また、計測値全体の近似式 ((c) 図) を見ると、今回の実船計測では舵角の大きさに対して約半分の大きさの横傾斜角（外方傾斜角）が発生していることが分かる。

②旋回（回頭）角速度

旋回運動中の外方傾斜は、遠心力に基づく傾斜モーメントが作用することで発生する。そのため、操舵に伴う横傾斜角（外方傾斜角）を推定するには、舵角に対応する旋回角速度 ω あるいは航跡の曲率半径 r を把握する必要がある。そこで、今回の実船計測結果から舵角と旋回角速度、航跡の曲率半径の関係を調べた。

まず、表 2.7 に示した旋回角速度 ω (rad/sec)と船速 v (m/sec)の計測結果から局所的な旋回半径（航跡の曲率半径） r (m)を(1)式で推定した。次に、推定した旋回半径 r と船長(L_{pp})を用いて無次元旋回角速度 r' を(2)式で算定した。

$$r = \frac{v}{\omega} \quad (1)$$

$$r' = \frac{L_{pp}}{r} \quad (2)$$

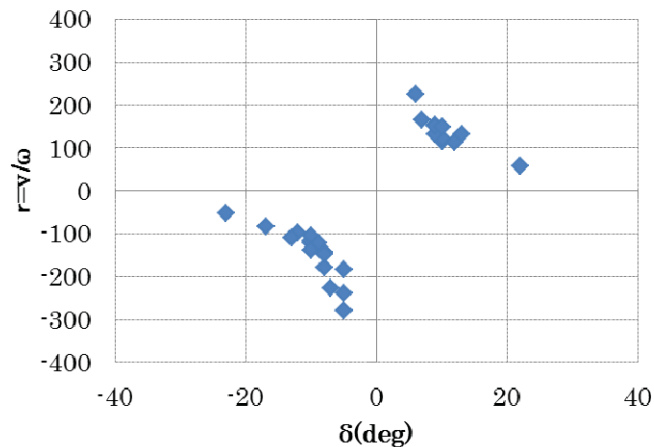


図 2.8 計測した舵角と局所的な旋回半径

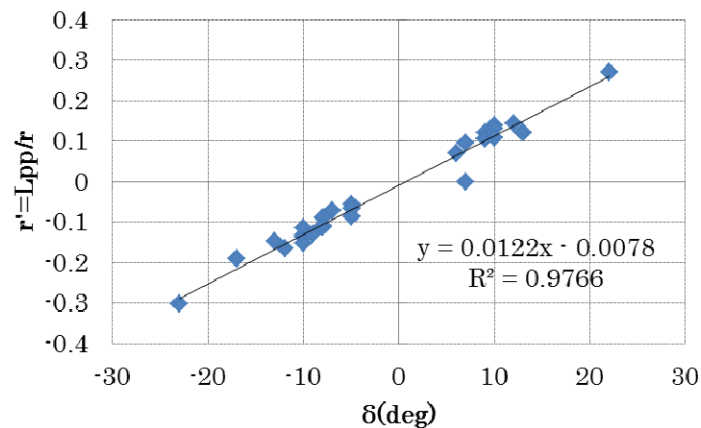


図 2.9 計測した舵角と無次元旋回角速度

(1)式、(2)式を用いて求めた旋回半径 r と無次元旋回角速度 r' をそれぞれ図 2.8、図 2.9 に示す。横軸は舵角である。図 2.9 には計測値の線形近似式も示している。今回の実船計測で実施した条件では、無次元旋回角速度は舵角に対してほぼ線形に変化することが分かる。

3. 転覆に至るメカニズムの検討

事故発生当時の気象・海象下で本船が転覆に至る状況について、事故発生当時の本船の復原性を推定した上で、想定される事故関連要因に起因する外力による横傾斜角を推定するとともに、船舶復原性規則の所謂 C 係数基準におけるエネルギーバランスの考え方を援用して想定される複合外力下の最大傾斜角を計算するなどして転覆メカニズムの検討を行った。

3. 1 事故発生当時の復原性

(1) 事故発生当時の船体状態

同型船の操舵試験等、実船計測を行った際の状態（以下、「実船試験状態」と言う。）を基に、調査官から指示された事故発生当時の状態における燃料及び清水の搭載量等を考慮して事故発生当時の本船の船体状態（以下、「事故発生当時（推定）状態」と言う。）を推定した。

推定した事故発生当時の排水量 W 、重心位置（KG：上下位置、mid-G：前後位置）及び各種タンクの自由表面による見かけの重心上昇量（ GG_0 ）を表 3.1 に示す。なお、表中には参考のため、実船計測時の値も示す。実船計測時の値は、表 2.4 に示した旋回試験及び操舵試験時の状態から計測員等が下りた状態の重量重心の計算結果である。

表 3.1 事故発生当時の排水量等

状態	W (t)	KG (m)	mid-G (m)	GG_0 (m)
事故発生当時(推定)	129.21	2.03	1.19	0.11
実船試験	141.11	1.99	2.12	0.03

(2) 復原性計算結果

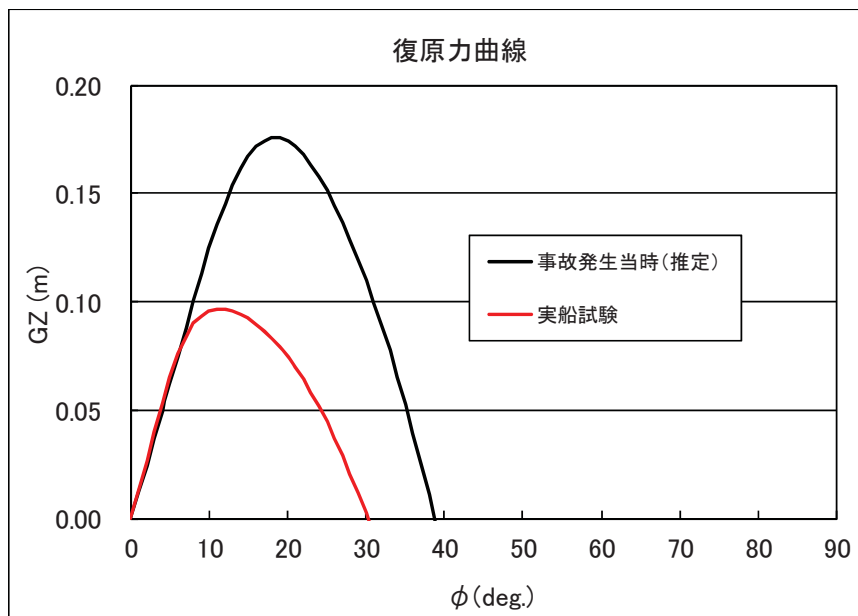


図 3.1 事故発生当時の復原力

図 3.1 に表 3.1 に示した事故発生当時の状態で復原力を計算した結果を示す（黒線）。なお、図中には参考のため、表 3.1 に示した実船試験時の状態の復原力を赤線で示す。また、表 3.2 に事故発生当時の喫水（da：船尾喫水、df：船首喫水、dm：平均喫水）、トリム（ τ ）、タンクの自由表

面影響を考慮したメタセンタ高さ (G_0M)、ブルワーク上端の没水角 (ϕb) を実船試験時の値とともに示す。

表 3.2 に示したように、事故発生当時の状態で本船のメタセンタ高さ G_0M は 0.70m であり、実船試験時の状態 ($G_0M=0.76m$) より約 0.06m 小さくなっている。一方、図 3.1 に示したように、傾斜角が約 8 度以上では、事故発生当時の状態の方が、実船試験時の状態より復原力 (GZ) が大きい。これは、実船試験時の状態の方が事故発生当時の状態より排水量が大きく (表 3.1)、喫水が深いので (表 3.2)、より小さな傾斜角で舷端が没水するためと考えられる。そのため、本船と同様な船では、排水量が過大となり復原力が減少しないように、燃料、清水等の積載に留意する必要があると考えられる。

表 3.2 事故発生当時の喫水、トリム、メタセンタ高さ及びブルワーク上端没水角

状態	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)	G_0M (m)	ϕb (deg.)
事故発生当時(推定)	1.85	1.48	1.66	0.37	0.70	20.7
実船試験	2.24	1.13	1.68	1.11	0.76	15.7

3. 2 事故関連要因の検討

調査官の説明では、事故時には、本船は一気に大傾斜した後転覆したと想定されるのとことであつた。そのため、本船の転覆の発生状況は船舶復原性規則の C 係数基準で想定される状況に近いと考えられる。

調査官から提示された事故発生当時の気象・海象データ (事故当日 14 時~16 時) をまとめると表 3.3 のとおりである。また、調査官によると転覆した本船を発見した通行船の船長の説明では、事故現場では三角波が発生しており、通常 18kn で航行する自船は 10kn 程度に減速して航行しており、漁船が操業できるような状況ではなく、漁船を認めなかったとのことである。

表 3.3 事故発生当時の気象・海象 (平成 25 年 5 月 27 日 14 時~16 時)

	友ヶ島灯台 (観測値)	沿岸波浪DB (地点1, 地点3 内挿)	通行船船長 (観測値)
風速 (m/s)	6~8	5.3~6.6	6~7
風向	南南西	173~182deg.	南
波高 (m)	-	0.72~0.86	2~3
波周期 (s)	-	4.7~4.9	約5
波向	-	177~178deg.	-

更に、調査官の説明では、本船及び同型船では、操舵に伴う横傾斜角が比較的大きく、運航の際には大舵を取らないように注意していたとのことである。また、第 2 章で報告したとおり、同型船の実船計測では、操舵に伴う横傾斜として、①有意な内方傾斜が発生しないこと、②操舵角度に対応して比較的大きな外方傾斜が発生すること、③操舵に対する横傾斜の応答 (外方傾斜の発生) は比較的はやいことなどが明らかになった。

そこで、本解析調査では、事故発生当時の風、波に加えて操舵に伴う横傾斜が本船の転覆に関連した要因と考え、船舶復原性規則の所謂 C 係数基準におけるエネルギーバランスの考え方を援用して最大横傾斜角を計算するなどして本船の転覆メカニズムの検討を行った。

3.3 事故当時の風、波による横傾斜

(1) 風による横傾斜

事故発生当時には風速 5~8m/s の南~南南西の風が吹いていたと想定される (表 3.3)。ここでは、風向の時間変動を考慮して、最も風の影響が大きな状況として横風状態の風による横傾斜角を C 係数基準において風による横傾斜角を評価する方法を援用して計算した。その際、C 係数基準と同様に定常風の 1.5 倍の風圧力が生じる突風が作用した場合の横傾斜角も求めた。

風による横傾斜角の計算結果と計算に必要なデータをまとめて表 3.4 に示す。表 3.4 において赤字で示した風圧力に関する係数 k に関しては、定常風速 8m/s として設定した値である。

表 3.4 に示したように風速 8m/s の定常風による横傾斜角 ϕ_0 は約 0.4 度であり、C 係数基準で想定している突風が作用した場合でも風による傾斜角は 1 度未満である。図 3.1 に示した事故発生当時の復原力と比較すると、事故発生当時に想定される風による横傾斜が本船の転覆に及ぼした影響は非常に限定的であったと考えられる。このため、3.5 節で述べる転覆メカニズムの検討の際には、風の影響は考慮しないこととした。

表 3.4 風による横傾斜の計算結果 (定常風速 8m/s)

		備考
A [m ²]	49.06	事故発生当時の状態
H [m]	2.82	
W [ton]	129.21	
k [ton/m ²]	0.0049	風速 8 m/s の値
$lw1=kAH/W$ [m]	0.005	
$lw2=1.5*lw1$ [m]	0.008	
ϕ_0 [deg]	0.44	定常風による傾斜角
$1.5\phi_0$ [deg]	0.65	突風による傾斜角

(2) 波による横揺

調査官の説明では、事故発生当時の本船に関しては、実際の針路は判明していないものの、出発地と目的地の位置関係から針路は凡そ 60 度であったとのことである。また、沿岸波浪 DB から事故発生当時の波向は 177~178 度と推定されている (表 3.3)。そのため、事故発生当時の出会う角は凡そ 62~63 度と、横波状態より斜め追波状態に近かったと推定される。

また、表 3.3 に示したように、事故発生当時の海象データとしては、(有義)波高、波向の他、(平均波)周期も推定されており、標準的な波浪スペクトル形状を仮定すれば、所謂船体動揺の短期予測手法[2]により、事故発生当時の本船の横揺を推定することができる。

事故発生当時の状態で本船の横揺の統計値の短期予測を行い (付録 2)、C 係数基準と同様に出会波 200 波に 1 回の横揺に対応する 1/200 最大期待値の横揺角 (ϕ_1) を推定した結果を表 3.5 に示す。その際、事故当時の本船の船速は 9kn、有義波高は 2m、平均波周期は 4.8 秒とした。表 3.5 には参考のため実船試験時の状態での推定結果も示す。

表 3.5 に示したように事故発生当時の状態で出会波 200 波に 1 回の横揺の期待値は 15.6 度となっており、図 3.1 に示した事故発生当時の復原力と比較すると、事故発生当時に想定される波浪中の横揺が本船の転覆に関連する主要な要因の一つであったと考えられる。なお、実船試験状態では、1/200 最大期待値の横揺角は、事故発生当時の状態に対する値の半分以下 ($\phi_1=6.2\text{deg.}$)

であるが、同状態の復原力（図 3.1 赤線）と比較すると、安全性に影響を及ぼす有意な横揺であることが分かる。

表 3.5 波浪中横揺の短期予測値（1/200 最大期待値）

状態	ϕ_1 (deg.)
事故発生当時(推定)	15.6
実船試験	6.2

3. 4 操舵に伴う横傾斜

調査官の説明では、本船及び同型船では、操舵に伴う横傾斜角が比較的大きく、運航の際には大舵を取らないように注意していたとのことであるが、事故発生当時の本船の操舵に関しては、情報が皆無であった。

ここでは、第 2 章で報告した同型船の実船計測結果から、舵角をパラメータとして事故発生当時の状態における操舵に伴う横傾斜角を推定した。その際、操舵に伴う船速の低下は無視できるのものとし、旋回特性（舵角～旋回角速度）は実船計測時の同型船（図 2.9）と事故発生当時の本船で等しいと仮定した。また、操舵に伴う傾斜モーメントは、実船計測結果に示された、水流抵抗の着力点位置や舵を反転する際の舵力の影響を考慮して推定した（付録 1）。

操舵に伴う横傾斜の推定式をまとめると(3)式のようになる。具体的には、まず、(3)式の第 1 式から想定する舵角 δ に対する無次元旋回角速度 r' を求め、これを第 2 式に示すように船長 (L_{pp}) を用いて旋回半径 r に変換した。この旋回半径 r と船速 v 及び船の状態（喫水 d 、重心高さ KG 、メタセンタ高さ GM) を用いて第 3 式から想定する舵角に対する横傾斜角 ϕ_2 を算定した。

$$\left. \begin{aligned} r' &= 0.0122 \times \delta - 0.0078 \\ r &= \frac{L_{pp}}{r'} \\ \sin \phi_2 &= 2.77 \times \frac{v^2}{g \cdot r \cdot GM} \left(\frac{KG}{2} - \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

なお、上述したように(3)式では指定した舵角に対する本船の旋回角速度が同型船と等しいことを仮定している。しかしながら、表 3.2 に示したように、実船試験時の状態でトリムは 1.11m であるのに対し、事故発生当時の状態では 0.37m と小さくなるため、旋回半径は事故発生当時の状態の方が実船試験時の状態より小さくなると推測される。その分、(3)式では事故発生当時の操舵に伴う横傾斜角を小さく推定している可能性がある。

事故発生当時の状態で、船速を 9kn として、舵角 δ を 5 度～15 度取った場合の操舵に伴う横傾斜角 (ϕ_2) を計算した結果を実船試験時の状態の計算結果とともに図 3.2 に示す。

事故発生当時の状態では、実船試験時の状態より操舵に伴う横傾斜は小さく、舵角 5 度で横傾斜角は約 2 度、舵角 10 度で 4.2 度、舵角 15 度で 6.5 度と推定されている。事故発生当時の操舵に伴う傾斜角は、波浪中横揺の短期予測値（表 3.5）に比べて小さいが、操舵に伴う傾斜モーメントは継続的に作用するので、図 3.1 に示した復原力と対比すると、事故発生当時の状態で操舵を行っている間の残存復原力の減少量は比較的大きいと考えられる。

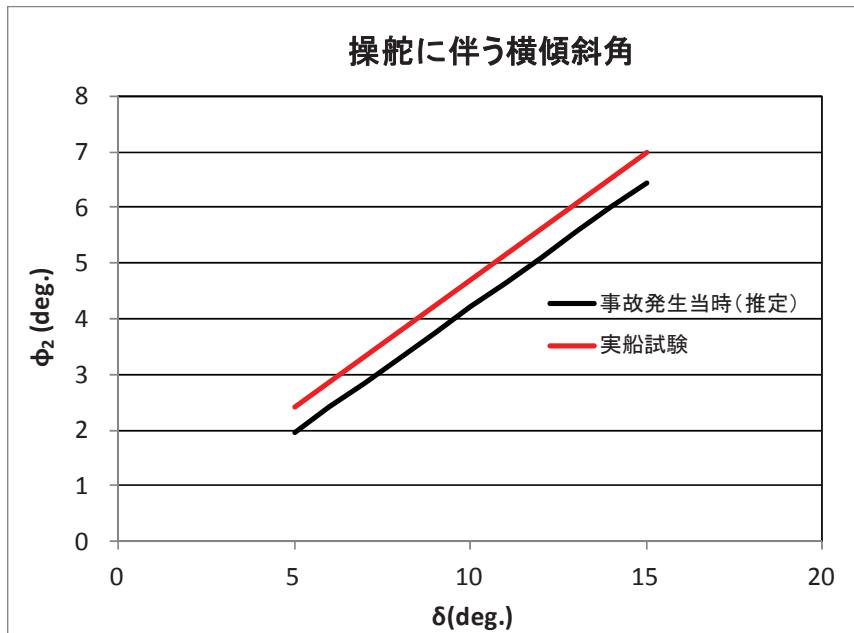


図 3.2 操舵に伴う横傾斜 (船速 9kn)

3.5 転覆メカニズムの検討

前節までに述べたように、本船の転覆に関連する主要因としては、①事故発生当時の波浪による横揺と②操舵に伴う横傾斜が考えられた。そこで、本船は事故発生当時に波浪による横揺をした状態で操舵をしたと想定し、船舶復原性規則の所謂 C 係数基準における横揺エネルギーバランスの考え方を援用して最大横傾斜角を計算することで転覆メカニズムの検討を行った。

具体的には、平均波周期 (Tw) 4.8 秒、有義波高 ($H_{1/3}$) 2m の波浪中を船速 (Vs) 9kn、波の主方向との出会角 (χ) 62~63 度で航行中、1/200 最大期待値の横揺が発生し、波上側 (右舷側) に最大限横傾斜した際に右舵操舵に伴う傾斜モーメントが作用したと想定し、横揺エネルギーバランスの計算を行った。その際、事故発生当時の本船の操舵に関しては情報が皆無であったので、舵角をパラメータとして計算を行い、波下側 (左舷側) 最大横傾斜角がブルワーク上端の没水角に達する舵角や転覆に至る舵角を求め、その妥当性を検討した。

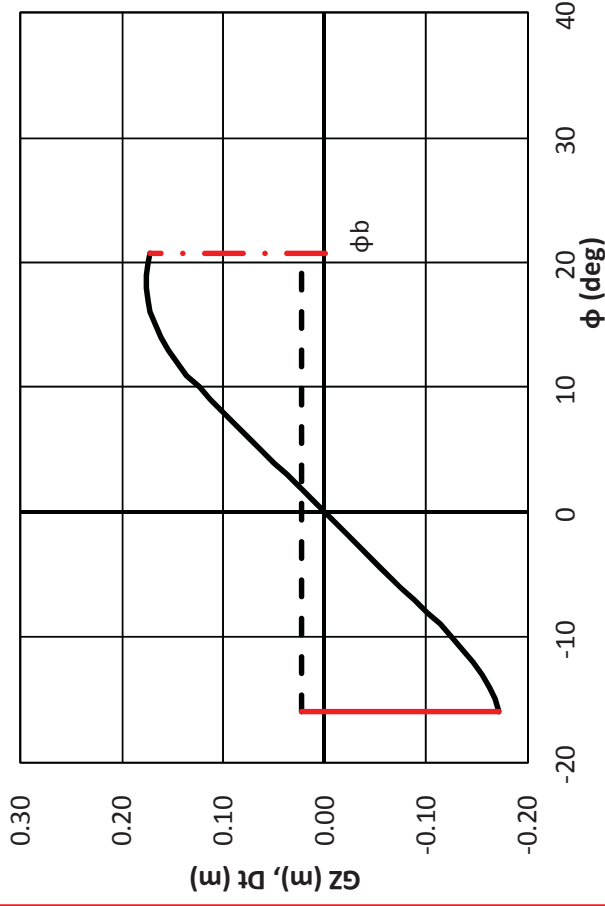
なお、ここで示す計算は、操舵に伴う傾斜モーメントが横揺している船体が片舷側に振れ止まった瞬間に作用すると想定して傾斜方向のエネルギーと復原方向のエネルギー (動復原力) のバランスを計算するもので、最も危険な状況を想定していることになる[3]。

事故発生当時の状態で①舵角 5 度、②ブルワーク上端が没水する限界の舵角、③転覆する限界の舵角に対応する傾斜モーメントが作用したと想定して横揺エネルギーバランスを計算した結果を表 3.6 に示す。また、計算に用いた図を図 3.3 に示す。

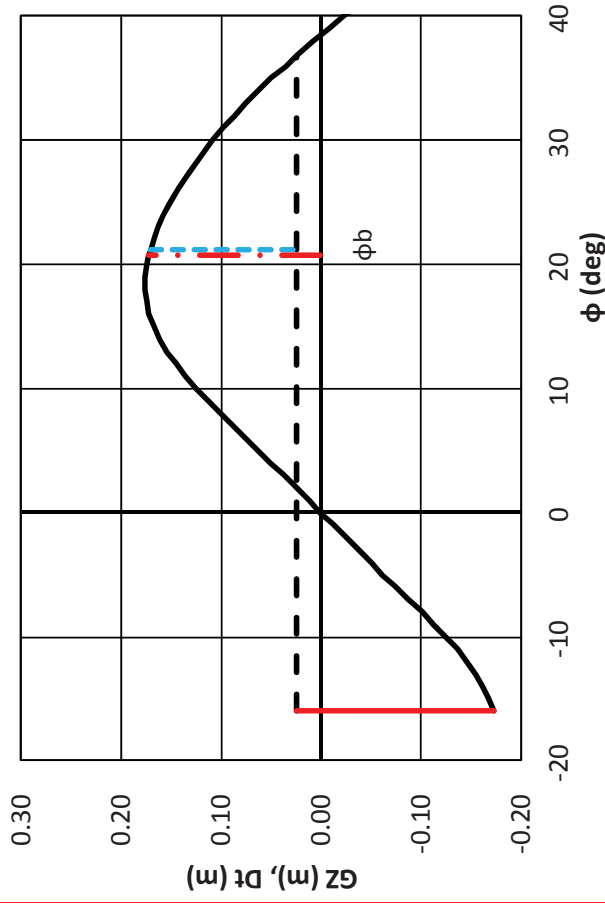
表 3.6 操舵に伴う傾斜モーメントを考慮した短期予測値を用いた横揺エネルギーバランス計算 (事故発生当時 (推定) 状態)

δ (deg.)	φ₂ (deg.)	a (m*deg)	b(φb) (m*deg)	b(φb)/a	b (m*deg)	b/a	φl (deg.)
4.7	1.8	1.91	1.91	1.00	3.38	1.77	20.7
5.0	2.0	1.95	1.88	0.97	3.32	1.70	21.1
9.7	4.1	2.45	1.41	0.58	2.45	1.00	34.9

横揺短期予測値を用いたエネルギーバランス計算
(事故当時(推定)状態: $\delta = 4.7 \text{ deg.}$)



横揺短期予測値を用いたエネルギーバランス計算
(事故当時(推定)状態: $\delta = 5.0 \text{ deg.}$)



横揺短期予測値を用いたエネルギーバランス計算
(事故当時(推定)状態: $\delta = 9.7 \text{ deg.}$)

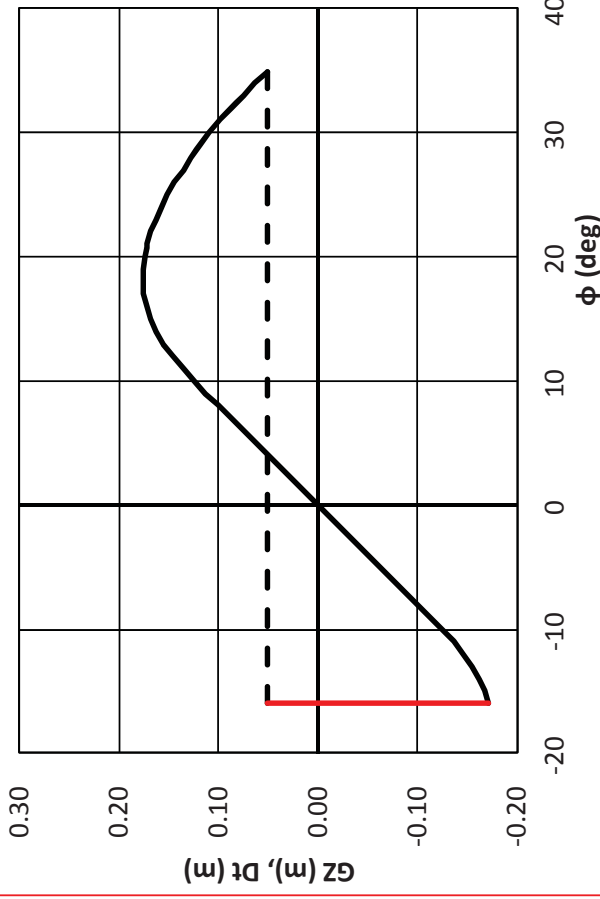


図 3.3 操舵に伴う傾斜モーメントを考慮した短期予測値を用いた
横揺エネルギーバランス計算 (事故当時 (推定) 状態)
(左上図: 舵角 4.7 度 、左下図: 舵角 5.0 度 、右上図: 舵角 9.7 度)

表 3.6 で、 ϕ_2 は舵角 δ の操舵に伴う横傾斜角であり、 a は 1/200 最大期待値の横揺で波上側に最大限横傾斜した際に舵角 δ の操舵に伴う傾斜モーメントが作用した場合の傾斜方向のエネルギー、 b は復原方向のエネルギー(動復原力)、 $b(\phi b)$ はブルワーク上端が没水するまでの動復原力であり、 ϕl は波下側への最大傾斜角を示す。

表 3.6 より、事故発生当時の状態では、波浪中横揺により波上(右舷)側に最大限横傾斜した際に舵角 4.7 度の右舵に対応した傾斜モーメントが作用したと想定した場合、波下(左舷)側への最大傾斜角 ϕl はブルワーク上端没水角 (ϕb : 20.7 度) に達すると推定されることが分かる。

想定した舵角が 4.7 度より大きくなると、例えば舵角が 5.0 度の場合、左舷側への最大傾斜角 ϕl は 21.1 度と、ブルワーク上端没水角 ϕb より大きくなり、ブルワーク上端が没水する。ブルワーク上端が没水するとブルワークが抵抗になるので、船がなかなか復原しない。そのため、引き続き波の影響により船が転覆することも考えられる。

また、表 3.6 に示した計算結果から、事故発生当時の状態で、横揺により右舷側に最大限横傾斜した際に右舵を 10 度以上取ったとすると船は一気に左舷側へ転覆することも考えられる。

なお、本船及び同型船では、操舵に伴う横傾斜角が比較的大きく、運航の際には大舵を取らないように注意していたとのことであるが、事故発生当時の状態で舵角 5 度程度の操舵を行ったと想定することは、非現実的ではないと考える。

参考のため、実船試験時の状態で同様の計算を行った結果を表 3.7 に示す。また、両状態のブルワーク上端が没水する限界の舵角 (δlb)、転覆する限界の舵角 (δlc) をまとめて表 3.8 に示す。

表 3.7 操舵に伴う傾斜モーメントを考慮した短期予測値を用いた横揺エネルギーバランス計算
(実船試験状態)

δ (deg.)	ϕ_2 (deg.)	a (m*deg)	$b(\phi b)$ (m*deg)	$b(\phi b)/a$	b (m*deg)	b/a	ϕl (deg.)
5.0	2.4	0.50	0.66	1.32	1.03	2.05	13.1
6.2	3.0	0.57	0.57	1.00	0.86	1.52	15.7
7.8	3.7	0.66	0.45	0.69	0.66	1.00	24.3

表 3.8 限界舵角

状態	δlb (deg.)	δlc (deg.)
事故発生当時(推定)	4.7	9.7
実船試験	6.2	7.8

図 3.1 に示したように復原力は、実船試験時の状態の方が事故発生当時の状態より小さいが、横揺角も実船試験時の状態の方が小さく推定されており(表 3.5)、その結果、実船試験時の状態でブルワーク上端が没水する限界の舵角 δlb は事故発生当時(推定)状態より 1.5 度大きく 6.2 度と推定されている。但し、転覆する限界の舵角 δlc は実船試験時の状態の方が小さくなっているなど、载荷状態により復原性の他、横揺特性や操舵に伴う傾斜モーメントも変化することから、今回の計算結果から载荷状態が安全性に及ぼす影響を端的に表すことは困難であると考えられる。

しかしながら、今回の計算では、操舵に伴う傾斜モーメントが横揺している船体が片舷側に振れ止まった瞬間に作用する最も危険な状況を想定した場合、両状態とも舵角が 10 度未満であって

も転覆が発生することが示されたので、安全性確保のためには大舵を取らない慎重な操船を行うことが必須と考えられる。

4. まとめ

平成 25 年 5 月 27 日、友ヶ島水道南端（兵庫県洲本市生石鼻東方沖 1.7km 付近）で発生した押船 A 丸転覆事故調査に資するため、同型船の重心計測及び操舵試験等を行い、試験結果を解析することで、①事故発生当時の復原性を推定するとともに、②事故発生状況から推定される転覆メカニズムの検討を行った。

今回の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。

(事故発生当時の復原性)

- (1) 実船計測結果を基に、調査官から指示された、事故発生当時の燃料、清水他の搭載量（重量）及び搭載位置（重心位置）を考慮して算定した排水量、重心位置から、事故発生当時の本船の復原性を推定した結果、事故発生当時の状態で本船のメタセンタ高さは 0.70m であり、実船試験時の状態（GoM=0.76m）より約 0.06m 小さくなっていること、但し傾斜角が約 8 度以上では、事故発生当時の状態の方が、実船試験時の状態より復原力（GZ）が大きいことが明らかになった。
- (2) これは、燃料、清水とも満載であった実船試験時の状態の方が事故発生当時の状態より排水量が大きく、喫水が深くなり、より小さな傾斜角で舷端が没水するためと考えられ、本船と同様な船では、排水量が過大となり復原力が減少しないように燃料、清水等の積載に留意する必要があると考えられる。

(転覆メカニズム)

- (1) 調査官から説明があった事故の発生状況等から、本船の転覆に関連した要因としては、事故発生当時の波、風に加えて操舵に伴う横傾斜が考えられた。
- (2) 事故発生当時の状態で風速 8m/s の定常風による本船の横傾斜角は約 0.4 度であり、C 係数基準で想定している突風が作用した場合でも風による傾斜角は 1 度未満と推定されることから、事故発生時に想定される風による横傾斜が本船の転覆に及ぼした影響は非常に限定的であったと考えられる。
- (3) 事故発生当時の状態で本船の横揺の統計値の短期予測を行い、C 係数基準と同様に 1/200 最大期待値の横揺角を推定した結果、出会波 200 波に 1 回の横揺に対応する横揺角は 15.6 度となり、事故発生当時の復原力と比較すると、事故発生時に想定される波浪中の横揺が本船の転覆に関連する主要な要因の一つであったと考えられる。
- (4) 実船計測結果から事故発生当時の状態における操舵に伴う横傾斜を推定した結果、舵角 5 度で横傾斜角は約 2 度、舵角 10 度で 4.2 度、舵角 15 度で 6.5 度と推定された。事故発生当時の操舵に伴う傾斜角は、波浪中横揺の短期予測値に比べて小さいが、操舵に伴う傾斜モーメントは継続的に作用するので、事故発生当時の復原力と対比すると、事故発生当時の状態で操舵を行っている間の残存復原力の減少量は比較的大きいと考えられる。
- (5) 最も危険な状況を想定して、横揺している船体が右舷側に振れ止まった瞬間に右舵操舵に伴う傾斜モーメントが作用する場合についてエネルギーバランスを計算した結果、舵角が 4.7 度より大きくなると、左舷側への最大傾斜角は、ブルワーク上端没水角（20.7 度）より大きくなると推定された。ブルワーク上端が没水するとブルワークが抵抗になるので、船がなかなか復原しない。そのため、引き続く波の影響により船が転覆することも考えられる。

参考文献

- [1] 森田知治：船舶復原論—基礎と応用—、pp.141、海文堂、昭和 60 年 4 月
- [2] 福田淳一：船体応答の統計予測、耐航性に関するシンポジウムテキスト、pp.99-pp.109、日本造船学会、昭和 44 年 7 月
- [3] 森田知治：船舶復原論—基礎と応用—、pp.131、海文堂、昭和 60 年 4 月

付録1 実船計測結果に基づく操舵に伴う横傾斜の推定

同型船の実船計測では、操舵に伴う横傾斜として、①有意な内方傾斜が発生しないこと、②操舵角度に対応して比較的大きな外方傾斜が発生すること、③操舵に対する横傾斜の応答（外方傾斜の発生）は比較的はやいことなどが明らかになった。そのため、本船の事故では、関連要因として操舵に伴う横傾斜（外方傾斜）を検討する必要があると考えられた。そこで、同型船の実船計測結果をもとに、外方傾斜角（傾斜モーメント）を推定する式を検討した。

（1）外方傾斜角の推定式

森田[A1]によると、船の旋回が始まると船の重心に遠心力が働くようになり、これにより船は外方傾斜を起こす。

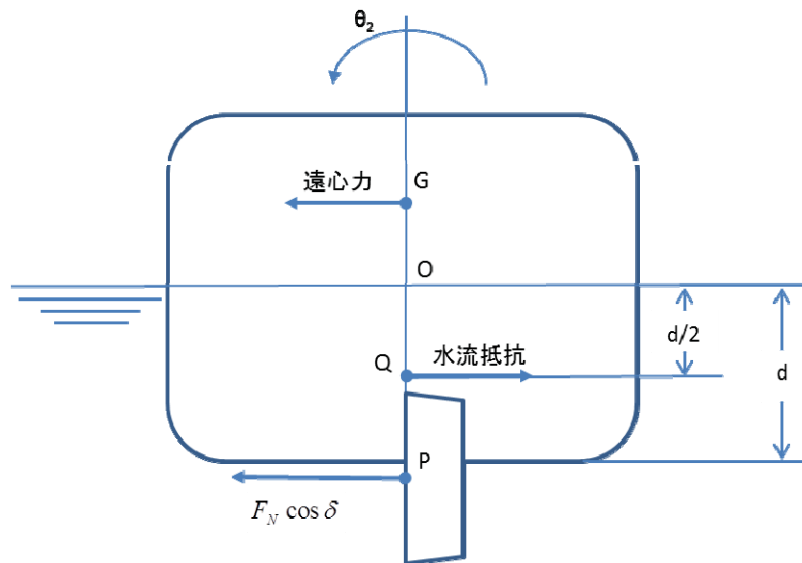


図 A1.1 外方傾斜時に船体作用する横方向の力

定常旋回中では、図 A1.1 に示すように、船に働く横方向（船幅方向）の力は、
 遠心力+舵の横力=水流抵抗
 のように釣り合っ定常旋回が続く。また、水流抵抗の作用点（Q 点）周りで船に働く横方向の力のモーメントと復原力（モーメント）の釣り合いを考えると、
 復原モーメント=遠心力のモーメント-舵の横力のモーメント
 となる。この関係は、(A1.1)式のように表される。

$$W \cdot \overline{GZ}(\theta_2) = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot \overline{GQ} - \overline{PQ} \cdot F_N \cos \delta \quad (A1.1)$$

ここで、 W : 船の排水量

\overline{GZ} : 復原てこ

θ_2 : 横傾斜角（外方傾斜角）

v : 船速

r : 旋回半径

g : 重力加速度

F_N : 舵力

δ : 舵角

である。

また、横傾斜角が小さく、復原力がメタセンタ高さ (GM) を用いて表示した初期復原力で近似できる場合は、(A1.1)'式となる。

$$W \cdot \overline{GM} \cdot \sin \theta_2 = \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot \overline{GQ} - \overline{PQ} \cdot F_N \cos \delta \quad (\text{A1.1})'$$

(A1.1)'式から、船体に働く遠心力及び舵に作用する横力が与えられた場合、横傾斜角 (外方傾斜角) は(A1.2)式で表される。

$$\sin \theta_2 = \frac{v^2 \cdot \overline{GQ}}{g \cdot r \cdot \overline{GM}} - \frac{\overline{PQ} \cdot F_N \cos \delta}{W \cdot \overline{GM}} \quad (\text{A1.2})$$

今、水流抵抗の着力点 Q が船の基線から喫水 d の 1/2 の位置 ($d/2$) にあると仮定すると、外方傾斜角は(A1.3)式で表される。

$$\sin \theta_2 = \frac{v^2}{g \cdot r \cdot \overline{GM}} \left(\overline{KG} - \frac{d}{2} \right) - \frac{\overline{PQ} \cdot F_N \cos \delta}{W \cdot \overline{GM}} \quad (\text{A1.3})$$

ここで、 KG : 船の重心高さ

d : 船の喫水

復原モーメントを復原てこ GZ を用いて表した(A1.1)式の場合も、船体に働く遠心力及び舵に作用する横力が与えられた場合の横傾斜角は(A1.2)式、(A1.3)式と同様の式で表現できる。

なお、一般には、船に働く横方向の力のモーメントに対応する(A1.1)式～(A1.3)式右辺は、 PQ が小さいとして第 2 項を省略し第 1 項 (遠心力によるモーメント) のみで表現されることが多い。その場合、水流抵抗の着力点 Q を船の基線から $d/2$ の位置と仮定すると、外方傾斜角は(A1.4)式で表される。

$$\sin \theta_2 = \frac{v^2}{g \cdot r \cdot \overline{GM}} \left(\overline{KG} - \frac{d}{2} \right) \quad (\text{A1.4})$$

また、一般には、水流抵抗の着力点 Q としては船の基線から $d/2$ の位置を取るが、船型 (水面下の形状) や旋回運動の大きさ、性質によって、水流抵抗の着力点 Q の位置は大幅に変化することも考えられる。

(2) 実船計測結果に基づく操舵に伴う横傾斜の推定

ここでは、実船計測結果をもとに、本船の事故当時の操舵に伴う横傾斜を (A1.4)式を用いて推定するための検討を行う。

まず、(A1.4)式を用いて横傾斜角を推定することの妥当性を確認するために、計測時に作用したと推定される遠心力による傾斜モーメントと計測された傾斜角に対応する復原力との相関を見しておく。旋回試験、操舵試験及び全ての計測データに対して船速 v 、旋回半径 r 他の計測値を用いて(A1.5)式で推定した遠心力による傾斜モーメントと横傾斜角 θ_2 の計測値を用いて(A1.6)式で算定した復原力との関係を図 A1.2～図 A1.4 にそれぞれ示す。

$$\text{遠心力による傾斜モーメント} : \frac{W}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \left(\overline{KG} - \frac{d}{2} \right) \quad (\text{A1.5})$$

$$\text{復原力} : W \cdot \overline{GM} \sin \theta_2 \quad (\text{A1.6})$$

各図中には線形近似式を示しており、(A1.5)式で推定された遠心力による傾斜モーメントと計測された傾斜角に対応する復原力の関係は線形で表されること（外方傾斜の主要因は遠心力による傾斜モーメントであること）が分かる。また、旋回試験結果（図 A1.2）から、遠心力による傾斜モーメントと傾斜角に対応する復原力の関係を線形近似した場合の1次の係数は約2.15であり、同型船の場合、(A1.5)式の()内で示した遠心力による傾斜モーメントのレバーが、水流抵抗の着力点 Q を一般に想定されている船の基線から d/2 の位置とした場合に比べて2倍以上大きくなることを示している。

また、旋回試験（図 A1.2）の場合より操舵試験（図 A1.3）の方が、遠心力による傾斜モーメントと計測された傾斜角に対応する復原力の関係を線形近似した場合の1次の係数が大きくなっている。この原因としては、操舵試験の場合、横傾斜方向の慣性の他、舵を反転する際に舵力が横傾斜角を増加させる方向に作用するため[A1]と考えられる。

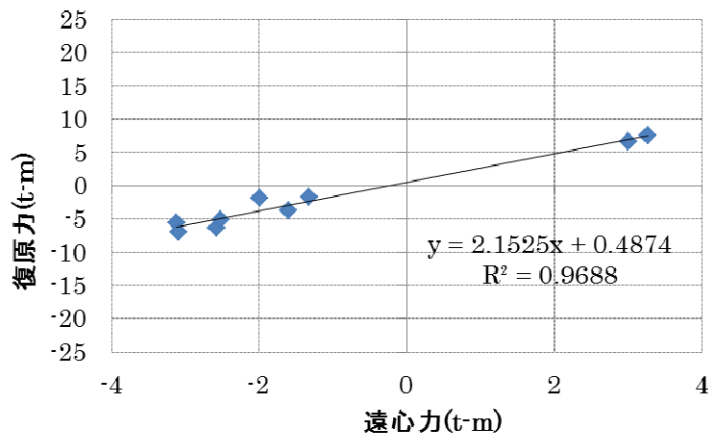


図 A1.2 遠心力による傾斜モーメントと傾斜角に対応する復原力（旋回試験）

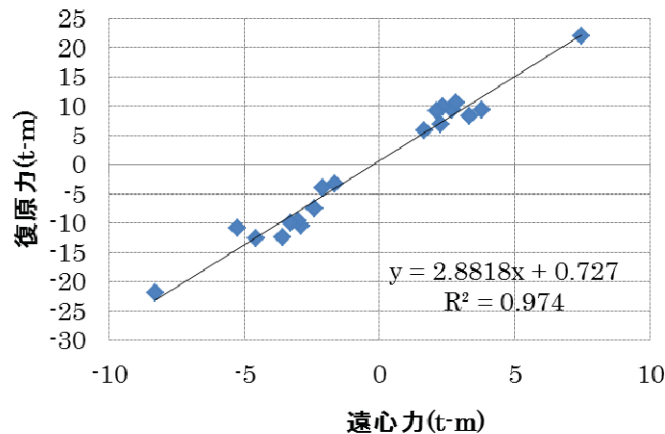


図 A1.3 遠心力による傾斜モーメントと傾斜角に対応する復原力（操舵試験）

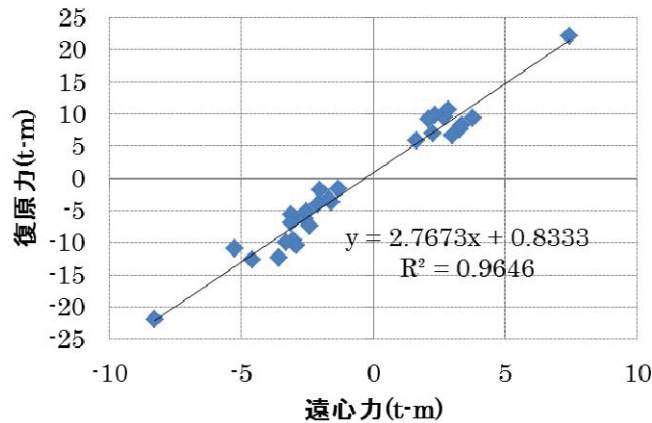


図 A1.4 遠心力による傾斜モーメントと傾斜角に対応する復原力（全体）

事故発生当時の本船の操舵に関しては、情報が皆無であった。そのため、今回は全ての計測データに対する遠心力による傾斜モーメントと傾斜角に対する復原力との関係（図 A1.4）から、操舵に伴う横傾斜の推定を行うこととした。

図 A1.4 から、今回の実船試験では、横傾斜角の計測結果から算定される復原力は (A1.5)式で推定した遠心力による傾斜モーメントの約 2.8 倍になっていることが分かる。これは、実船計測を行った同型船では、水流抵抗の着力点 Q は、一般に想定されている船の基線から $d/2$ の位置とは異なると推定されることに加え、傾斜方向の慣性、舵を反転する際の舵力の影響で操舵に伴う横傾斜角が大きくなったためと考えられる。

以上の検討結果から、今回の解析調査では、本船の操舵に伴う横傾斜角は、(A1.4)式に操舵の影響も含めた水流抵抗の着力点位置に関する修正係数を掛けた (A1.7) 式を用いて推定することとした。

$$\sin \theta_2 = 2.77 \times \frac{v^2}{g \cdot r \cdot GM} \left(\overline{KG} - \frac{d}{2} \right) \quad (A1.7)$$

参考文献

- [A1] 森田知治：船舶復原論—基礎と応用—、pp.133-pp.143、海文堂、昭和 60 年 4 月

付録2 事故発生当時の横揺の推定

事故発生当時の本船に関しては、実際の針路は判明していないものの、出発地と目的地の位置関係から針路は凡そ 60 度であったとされ、また、沿岸波浪 DB から事故発生当時の波向は 177 ~178 度と推定されている。そのため、事故発生当時の出会角は凡そ 62~63 度と、横波状態より斜め追波状態に近かったと推定される。

また、事故発生当時の海象データとして、(有義)波高、波向の他、(平均波)周期も推定されており、標準的な波浪スペクトル形状を仮定すれば、所謂船体動揺の短期予測手法[A2]により、事故発生当時の本船の横揺を推定することができる。

(1) 横揺短期予測計算概要

①横揺応答関数

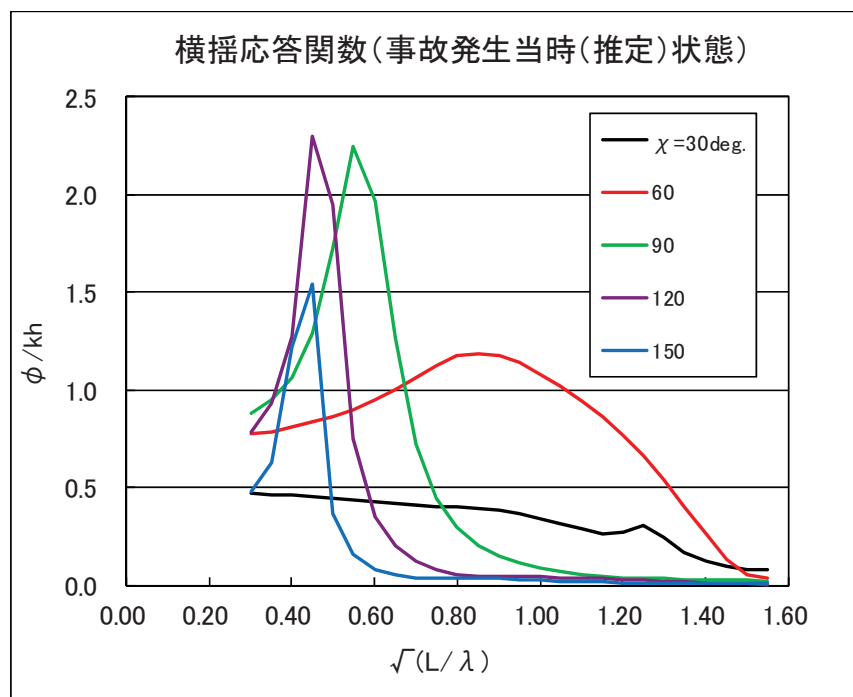


図 A2.1 横揺応答関数 (事故発生当時 (推定) 状態)

短期予測計算に必要な横揺の応答関数に関しては、STF 法により計算を行った、その際、必要となる横揺減衰係数に関しては、データが入手できなかったため、C 係数基準の算式で通常用いられる N 係数の値(0.02)を STF 法の計算における減衰係数に変換して用いた。また、船速は 9kn とし、排水量喫水等は、事故発生当時の状態の推定値 (本文表 3.1、表 3.2) を用いた。

図 A2.1 に STF 法により計算した本船の横揺応答関数を示す。横軸は波長船長比 (λ/L) の逆数の平方根 (波周波数の無次元値) であり、縦軸は横揺振幅を最大波傾斜で無次元化した値 (ϕ/kh) を示している。出会波周期と横揺固有周期との関係や、横揺強制力の大きさ等の関係で、出会角 χ が 120 度の斜め向波場合の本船の横揺の peak 値は、横波 ($\chi=90\text{deg.}$) の場合の peak 値とほぼ同じ大きさとなっている。

②波スペクトル

短期予測を行う不規則波のスペクトル $S(\omega)$ としては、通常用いられる ISSC スペクトル((A2.1) 式)を使用した。ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 T_w は平均波周期である。

沿岸波浪DBによると、事故当時の平均波周期 T_w は4.7~4.9秒と推定されている(本文表3.3)。図A2.2に平均波周期4.8秒のISSC型波スペクトルを示す。また、図中には、通行船船長の観測値($T_w=5s$)及びより波周期が長い $T_w=6s$ の波スペクトルも参考のため示す。

$$\frac{S(\omega)}{H_{1/3}^2} = 0.11\omega_1^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{-4}\right\}, \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T_w} \quad (A2.1)$$

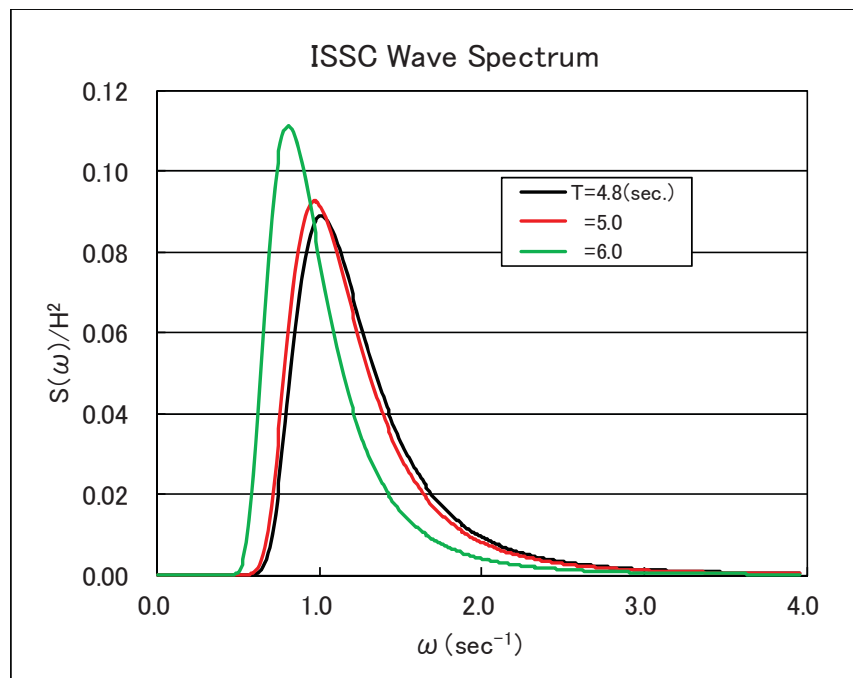


図 A2.2 波スペクトル (ISSC 型)

③横揺応答スペクトル

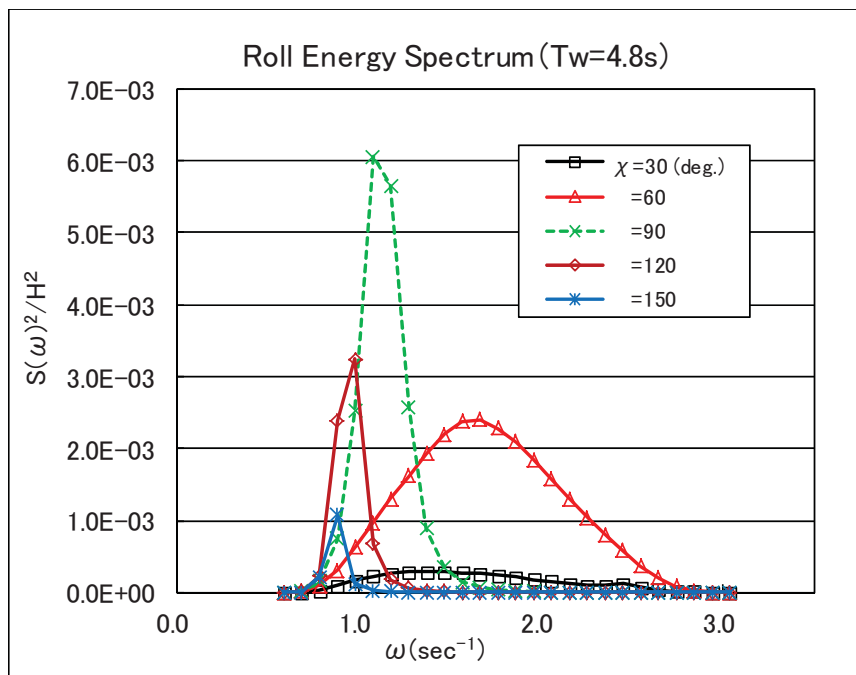


図 A2.3 横揺応答パワースペクトル (事故当時 (推定) 状態)

図 A2.1 で示した横揺応答関数と図 A2.2 で示した波スペクトルを用いて計算した横揺応答のパワースペクトルを図 A2.3 に示す。応答スペクトルの面積が不規則波中の横揺の分散に対応する。船体応答の極大値（極小値）の確率分布が Rayleigh 分布で近似できるとすると、極値の平均値や最大期待値等が、図 A2.3 に示したパワースペクトルの面積に対応する横揺分散値から算定される標準偏差を使用して推定することができる。

(2) 予測計算結果

事故発生当時の波向分布に関するデータが入手できなかった。そこで、事故発生当時の波向分布が主方向に対し \cos^2 乗となるとして短波頂不規則波中の横揺の短期予測を行った。

表 A2.1 は、平均波周期 4.8 秒、有義波高 2m で波向分布を \cos^2 乗とした場合の短波頂不規則波中での横揺の統計値の予測結果である。

上述した通り事故当時の出会角 χ は凡そ 62~63 度と想定されており、波向分布を主方向に対して \cos^2 乗とした場合の横揺振幅の平均値は 6 度程度、有義値は 9 度程度と推定される。また、出会波 200 波に 1 回は横揺振幅が 16 度程度に達すると予測される。

表 A2.1 横揺短期予測結果（事故当時（推定）状態：Tw=4.8s, H_{1/3}=2m；波向分布 \cos^2 乗）

	χ (deg.)						
	0	30	60	90	120	150	180
平均値	3.75	4.13	5.71	5.43	4.36	2.88	2.01
1/3最大平均値	6.00	6.61	9.13	8.68	6.96	4.60	3.22
1/10最大平均値	7.63	8.40	11.61	11.04	8.85	5.84	4.09
1/100最大期待値	9.66	10.64	14.70	13.98	11.21	7.40	5.18
1/200最大期待値	10.28	11.32	15.64	14.88	11.93	7.88	5.52

参考のため、本文表 3.1、表 3.2 に示した実船試験時の状態についても同様の計算を行った結果を表 A2.2 に示す。同一の船であっても船体状態によって横揺の統計予測値に大きな差異があることが分かる。

表 A2.2 横揺短期予測結果（実船試験状態：Tw=4.8s, H_{1/3}=2m；波向分布 \cos^2 乗）

	χ (deg.)						
	0	30	60	90	120	150	180
平均値	1.20	1.64	2.27	2.75	2.26	1.72	1.23
1/3最大平均値	1.92	2.62	3.64	4.39	3.61	2.74	1.97
1/10最大平均値	2.43	3.33	4.62	5.58	4.59	3.48	2.51
1/100最大期待値	3.08	4.22	5.85	7.07	5.81	4.41	3.17
1/200最大期待値	3.28	4.49	6.23	7.52	6.18	4.70	3.38

参考文献

- [A2] 福田淳一：船体応答の統計予測、耐航性に関するシンポジウムテキスト、pp.99-pp.109、日本造船学会、昭和 44 年 7 月