

船舶事故調査報告書

船種船名 貨物船 JIA DE
IMO番号 8989848
総トン数 1,925トン

事故種類 沈没

発生日時 令和元年10月12日 21時39分ごろ

発生場所 神奈川県川崎市東扇島南東沖

川崎東扇島防波堤東灯台から真方位137°1.0海里付近
(概位 北緯35°28.9' 東経139°47.8')

令和3年1月20日

運輸安全委員会(海事部会)議決

委員長 武田展雄
委員 佐藤雄二(部会長)
委員 田村兼吉
委員 柿嶋美子
委員 岡本満喜子

要旨

<概要>

貨物船^{ジアデ}JIA DEは、船長ほか11人が乗り組み、ベトナム社会主義共和国ソندان港に向けて京浜港を出航し、京浜港K1錨地に錨泊中、台風第19号が接近して増勢した風及び波を受け、右舷傾斜して横転及び船内に浸水し、令和元年10月12日21時39分ごろ沈没した。

船長及び乗組員3人は救助され、乗組員8人は死亡した。

<原因>

本事故は、夜間、JIA DEが、京浜港K1錨地に錨泊中、台風第19号が接近して増勢した風及び波を受けて船体が動揺する状況下、波の打ち込みにより上甲板に滞留

した海水(本件滞留水)が貨物倉に浸水し始めたため、操舵不能となったのちに左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉内への浸水が進んで沈没したことにより発生したものと考えられる。

本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたのは、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたこと、並びに貨物倉のハッチカバーにおいてドレン受けの破口及び変形があったことから、貨物倉の風雨密が保持されていなかったことによるものと考えられる。また、甲板上への波の打ち込みは、JIA DE の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長されたものと考えられる。

JIA DE が操舵不能となったのは、船体動揺によって上甲板上の空気抜き管からA重油タンクに混入した水が燃料油と共に発電機原動機の燃料油供給配管系統から発電機原動機に供給されたことから、同原動機のシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起こし、発電機が停止して船内電源を喪失したことによるものと考えられる。

JIA DE は、操舵不能となって左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになったのち、左舷側面に風及び波を受けて右舷方に傾斜し、その角度を中心に船体が動揺するようになり、台風第19号による強風及び激しい波を受けて右舷方への横傾斜が次第に大きくなったことから、復原力が最大となる角度以上に達し、引き続く波の影響で横傾斜角が増加して横傾斜が残存復原力消失角に達したので、右舷方に横転することに至ったものと考えられる。

<安全勧告>

本事故は、夜間、貨物船 JIA DE が、京浜港K1 錨地に錨泊中、台風第19号が接近して増勢した風及び波を受けて船体が動揺する状況下、波の打ち込みにより上甲板に滞留した海水が貨物倉に浸水し始めたため、操舵不能となったのちに左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉内への浸水が進んで沈没したことにより発生したものと考えられる。

本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたのは、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたこと、並びに貨物倉のハッチカバーにおいてドレン受けの破口及び変形があったことから、貨物倉の風雨密が保持されていなかったことによるものと考えられる。また、甲板上への波の打ち込みは、JIA DE の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長されたものと考えられる。

JIA DE が操舵不能となったのは、船体動揺によって上甲板上の空気抜き管からA重油タンクに混入した水が燃料油と共に発電機原動機の燃料油供給配管系統から発電

機原動機に供給されたことから、同原動機のシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起し、発電機が停止して船内電源を喪失したことによるものと考えられる。

このため、運輸安全委員会は、本事故の調査結果を踏まえ、同種事故の再発防止及び被害の軽減を図るため、旗国であるパナマ共和国海事局に対して次のとおり勧告する。

パナマ共和国海事局は、荒天中に乗組員及び船舶の安全を確保するために、パナマ共和国籍船舶の船舶所有者及び船舶管理会社に対して、次の事項を実施するよう指導すること。

- (1) 船長及び乗組員に対して、荒天が予想される際には、貨物倉通風筒の開口部蓋等の暴露甲板における開口部の閉鎖を確実に実施するよう指導すること。
- (2) 船長及び乗組員に対して、荒天時を含むいかなる状況でも十分な乾舷が維持できるよう、船体のコンディションを調整するよう指導すること。
- (3) 船長及び乗組員に対して、燃料油タンクの空気抜き管に水の浸入を防止するための管頭金物等が取り付けられていない場合には、水が混入した燃料油が発電機原動機等の燃料油供給系統に入らないよう、燃料油タンクのドレン排出作業を、荒天時の船体動揺があるときにも行うよう指導すること。
- (4) 船長及び乗組員に対して、非常時の総員退船に関し、携行品の持ち出し、船内から脱出する行動、救命胴衣及び適切な服装の着用並びに海上における生存技術に関する訓練を再度実施するよう指導すること。
- (5) 所有する船舶又は管理する船舶の貨物倉ハッチカバーの風雨密が保持されるよう保守整備を実施すること。

目 次

1	船舶事故調査の経過.....	1
1.1	船舶事故の概要.....	1
1.2	船舶事故調査の概要.....	1
1.2.1	調査組織.....	1
1.2.2	調査の実施時期.....	1
1.2.3	調査の委託.....	1
1.2.4	原因関係者からの意見聴取.....	1
1.2.5	旗国等への意見照会.....	1
2	事実情報.....	2
2.1	事故の経過.....	2
2.1.1	船舶自動識別装置による JIA DE の運航の経過.....	2
2.1.2	VHF 交信記録による音声の情報.....	3
2.1.3	乗組員の口述等による事故の経過.....	5
2.2	人の死亡及び負傷に関する情報.....	9
2.3	船舶の損傷に関する情報.....	10
2.4	乗組員に関する情報.....	10
2.5	船舶等に関する情報.....	11
2.5.1	船舶の主要目.....	11
2.5.2	積載状態等.....	12
2.5.3	船体構造及び運航設備.....	13
2.5.4	貨物倉の風雨密及びハッチカバーに関する規則.....	18
2.6	気象及び海象等に関する情報.....	19
2.6.1	気象警報.....	19
2.6.2	観測値等.....	19
2.6.3	波浪.....	20
2.6.4	乗組員による観測.....	21
2.6.5	本件台風に関する情報.....	22
2.7	船舶の運航管理等に関する情報.....	23
2.7.1	C社の事業内容.....	23
2.7.2	安全管理システム.....	23
2.7.3	寄港国検査 (Port State Control)	27
2.7.4	入渠及び船舶検査.....	27

2. 8	本事故前の操船状況.....	28
2. 9	船体動揺及び甲板上における海水の滞留に関する情報.....	28
2. 1 0	本件配管系統への水の混入に関する情報.....	29
2. 1 1	試験及び研究.....	30
2. 11. 1	本件解析の概要.....	31
2. 11. 2	本船の復原性の推定.....	31
2. 11. 3	沈没に至る状況の推定.....	33
2. 11. 4	沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況.....	39
2. 11. 5	沈没に至る状況に関するまとめ.....	44
2. 1 2	被害の軽減に関する情報.....	45
2. 1 3	油の流出による環境への影響及びその防除に関する情報.....	46
2. 13. 1	油の流出による環境への影響.....	46
2. 13. 2	油流出の防除.....	47
3	分析.....	48
3. 1	事故発生の状況.....	48
3. 1. 1	事故発生に至る経過.....	48
3. 1. 2	沈没の状況.....	48
3. 1. 3	事故発生日時及び場所.....	49
3. 1. 4	死傷者の状況.....	49
3. 1. 5	損傷の状況.....	49
3. 2	事故要因の解析.....	49
3. 2. 1	乗組員の状況.....	49
3. 2. 2	船舶の状況.....	50
3. 2. 3	気象及び海象の状況.....	50
3. 2. 4	安全管理に関する状況.....	51
3. 2. 5	船体の復原力、横転及び沈没に関する解析.....	51
3. 2. 6	事故発生に関する解析.....	53
3. 3	救助及び被害の軽減措置に関する解析.....	54
3. 3. 1	海上における生存技術の状況.....	54
3. 3. 2	総員退船に関する技能が実行できなかった状況.....	54
3. 4	油の流出による環境への影響及びその防除に関する状況.....	55
4	結論.....	55
4. 1	原因.....	55

4.2	その他判明した安全に関する事項.....	56
5	再発防止策.....	56
6	安全勧告.....	57
付図1	事故発生場所概略図.....	59
付図2	一般配置図.....	60
付表1	事故発生場所付近における油汚染の状況.....	61
付表2	事故発生場所付近における油防除作業.....	62
付表3	流出した油による汚染状況（横須賀市横須賀港）.....	63
別添	沈没に係る解析調査（貨物船A沈没事故）報告書	

1 船舶事故調査の経過

1.1 船舶事故の概要

貨物船^{ジア デ}JIA DEは、船長ほか11人が乗り組み、ベトナム社会主義共和国ソندان港に向けて京浜港を出航し、京浜港K1錨地に錨泊中、台風第19号が接近して増勢した風及び波を受け、右舷傾斜して横転及び船内に浸水し、令和元年10月12日21時39分ごろ沈没した。

船長及び乗組員3人は救助され、乗組員8人は死亡した。

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、令和元年10月13日、本事故の調査を担当する主管調査官ほか1人の船舶事故調査官を指名し、後日、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

令和元年10月13日、14日、令和2年2月20日、28日、29日 現場調査及び口述聴取

令和元年10月16～19日、21日、22日 口述聴取及び回答書受領

令和元年10月24～26日、10月28日～11月3日、8日、10～12日、11月21日、12月6日、13日、令和2年1月10日 回答書受領

令和元年11月13日、14日、令和2年7月8日 口述聴取

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・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所に対し、JIA DE の復原性及び沈没に至る状況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

原因関係者からの意見聴取手続きを行った。

1.2.5 旗国等への意見照会

JIA DE の旗国及び実質的利害関係国に対し、意見照会を行った。

2 事実情報

2.1 事故の経過

2.1.1 船舶自動識別装置による JIA DE の運航の経過

‘民間情報会社が受信した JIA DE（以下第6章を除き「本船」という。）の船舶自動識別装置（AIS）*1の情報記録’（以下「AIS記録」という。）によれば、令和元年10月12日13時59分47秒～21時35分49秒の間における本船の運航の経過は、表1のとおりであった。

なお、12日21時35分49秒以降、本船のAIS記録は確認できなかった。

表1 本船のAIS記録（抜粋）

月 日 記録間隔	時 刻 (時:分:秒)	船 位**		対地針路** (°)	船首方位** (°)	対地速力 (ノット(kn))
		北 緯 (°' -")	東 経 (°' -")			
10月12日 双錨泊 開始以降 約1時間毎	13:59:47	35-28-44.0	139-47-36.0	013.6	利用不可	0.4
	14:59:44	35-28-46.0	139-47-37.0	225.1		0.2
	15:59:47	35-28-48.5	139-47-38.0	189.8		0.4
	16:59:39	35-28-49.2	139-47-38.0	120.2		0.5
	18:02:40	35-28-50.0	139-47-38.0	120.2		0.6
スタンバイ 以降 約10分毎	18:50:37	35-28-49.6	139-47-38.0	287.5		0.1
	19:02:39	35-28-50.0	139-47-38.7	354.8		0.5
	19:11:38	35-28-49.7	139-47-38.2	225.6		0.4
	19:20:40	35-28-49.9	139-47-38.5	210.7		0.3
	19:32:37	35-28-50.3	139-47-38.9	133.5		0.4
	19:41:40	35-28-50.2	139-47-38.0	068.5		0.2
	19:50:38	35-28-50.5	139-47-38.7	087.3		0.3
	20:02:41	35-28-50.8	139-47-38.5	235.0		1.0
	20:11:41	35-28-51.5	139-47-39.4	349.4		0.6
	20:20:38	35-28-52.1	139-47-40.1	021.9		1.0
	20:32:41	35-28-52.7	139-47-41.3	209.7		0.8
20:41:39	35-28-53.2	139-47-43.0	337.3		0.5	

*1 「船舶自動識別装置（AIS:Automatic Identification System）」とは、船舶の識別符号、種類、船名、船位、針路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する装置をいう。

受信信号の とおり	20:47:33	35-28-53.5	139-47-43.0	089.0		2.0
	21:07:20	35-28-54.9	139-47-46.4	301.6		2.4
	21:10:18	35-28-55.3	139-47-48.2	157.5		1.4
	21:14:24	35-28-55.5	139-47-48.1	107.7		3.6
	21:23:52	35-28-56.5	139-47-48.8	243.9		0.7
	21:26:49	35-28-56.3	139-47-49.8	110.6		1.4
	21:29:51	35-28-55.7	139-47-50.8	304.1		0.9
	21:32:50	35-28-56.2	139-47-50.4	109.8		1.5
	21:35:49	35-28-56.6	139-47-49.8	120.0		2.5
～	A I S 記録は確認できなかった。					

※船位は、船橋上方に設置されたGPSアンテナの位置であり、本船のアンテナは、船橋上方の甲板上にあり、船首から61m、船尾から18m、左舷から6m及び右舷から7mの位置であった。また、対地針路及び船首方位は真方位（以下同じ。）である。

2.1.2 VHF 交信記録による音声の情報

海上保安庁東京湾海上交通センター（以下「東京マーチス」という。）によるVHF無線電話（以下「VHF」という。）の交信記録によれば、令和元年10月12日20時07分から21時24分の間に7回あった東京マーチス及び本船との音声情報は、表2のとおりであった。

なお、VHFによる交信は、16チャンネル（CH）が呼出し及び応答用、その他のCHが個別通信用として使用され、航行中又は錨泊中の船舶は、16CHの常時聴守が義務付けられている。

表2 VHF 交信記録 （ ）内は日本語仮訳

時刻	送信者	受信者	CH	交信内容等
20:07- 20:09 1回次	本船と東京マーチス との交信		16	概要
			14	本船は、自船の左舷方にいる船舶が走錨して近づいてきていることを東京マーチスに連絡した。
20:10- 20:11 2回次	同上		16	概要 東京マーチスは、本船の錨泊位置を確認した。
20:16- 20:18 3回次	同上		16 66	概要 本船は、自船の左舷方にいる別の船舶が走錨して近づいてきたが、その後離れて行き、安全な距離となったことを連絡した。 東京マーチスは、本船が錨泊地に止まっているかを本船に確認した。

20:23- 20:23 4 回次	同上		16	双方が交信できなかった。
21:05- 21:06 5 回次				
21:07- 21:08 6 回次	東京マーチス	本船	16	JIA DE, JIA DE, 3EMK4, THIS IS TOKYO MARTIS. THIS IS TOKYO MARTIS. (JIA DE、JIA DE、3EMK4 (コールサイン)、こちら東京マーチスです。(復唱)。)
	本船	東京マーチス		TOKYO MARTIS, JIA DE, OVER. (東京マーチス、JIA DE です。)
	東京マーチス	本船		CHANGE TO 6, 9, 69, OVER. (CH6, 9, 69 に変更してください。)
	本船	東京マーチス	69	TOKYO MARTIS, TOKYO MARTIS, MOTOR VESSEL JIA DE CALLING. HOW DO YOU READ ME? OVER. (東京マーチス、(復唱)、JIA DE です。聞こえますか。)
	東京マーチス	本船		JIA DE, THIS IS TOKYO MARTIS. [WARNING.] ACCORDING TO OUR RADAR, YOU SEEM TO BE DRAGGING ANCHOR. [QUESTION]. ARE YOU DRAGGING ANCHOR NOW? OVER. (JIA DE、こちら東京マーチスです。[警告]、レーダーで見ると貴船が走錨しているようです。[質問]、現在、貴船は走錨していないか。)
	本船	東京マーチス		I'M ALL TIME USE ENGINE. I'M ALL TIME USE ENGINE. OVER. (本船は常時機関を使用している。(復唱)。)
	東京マーチス	本船		QUESTION. CAN YOU MANEUVERING? OVER. (質問。貴船は操船できていますか。)
	本船	東京マーチス		MANEUVERING. BUT I'M DROPPING ANCHOR. I'M DROPPING ANCHOR. OVER. (操船できている。しかし、本船は投錨している。(復唱)。)
	東京マーチス	本船		I COPY. AND MANEUVERING I COPY. KEEP WATCH CH 16 AND KEEP SHARP LOOKOUT. BACK TO CH16. OUT. (了解。操船できている、了解。CH16 を常時聴取して見張りを厳としてください。CH16 に戻る。終わり。)
本船	東京マーチス	CH16. OUT. (CH16 に変更する。終わり。)		
21:23- 21:24 7 回次	東京マーチス	本船	16	MOTOR VESSEL JIA DE, JIA DE, CALL SIGN 3EMK4, THIS IS TOKYO MARTIS. (JIA DE、(復唱)、コールサイン 3EMK4、こちら東京マーチスです。)
	本船	東京マーチス		TOKYO MARTIS, JIA DE, OVER. (東京マーチス、JIA DE です。)
	東京マーチス	本船		GO UP TO CH 66 DOUBLE 6. (CH66 としてください。)
	本船	東京マーチス	66	JIA DE CALLING. (JIA DE、応答しています。)
	東京マーチス	本船		THIS IS TOKYO MARTIS. [WARNING.] ACCORDING TO OUR RADAR, YOU SEEM TO BE DRAGGING ANCHOR. [QUESTION.]

			ARE YOU DRAGGING NOW? OVER. (こちら東京マーチスです。[警告]、レーダーで見ると貴船が走錨しているようです。[質問]、現在、貴船は走錨していないか。)
	本船	東京マーチス	NO, DROP ANCHOR, 9 SHACKLE, 9 SHACKLE. SO - (不明瞭) - NOW - (不明瞭) -. I CHECKED NORMAL CONDITION. THANK YOU ADVICE. (いいえ、投錨しており、9節、9節。だから、-、今、-。本船は通常状態です。アドバイスに感謝する。)
	東京マーチス	本船	DROP ANCHOR. BUT USING ENGINE. IS THAT CORRECT? OVER. (投錨している。が、機関を使用している。それに間違いないな?)
	本船	東京マーチス	USE ENGINE ALL TIME ALREADY USING. (すでに常時機関を使用している。)
	東京マーチス	本船	OK. BACK TO CH 16. OUT. (了解。CH16に戻る。終わり。)
	本船	東京マーチス	16. OUT. (CH16に戻る。終わり。)

2.1.3 乗組員の口述等による事故の経過

船長、機関長、航海士（以下「航海士A」という。）、操機手（以下「操機手A」という。）及び本船の船舶代理店（以下「本件代理店」という。）担当者の口述及び回答書、並びに東京マーチスの回答書によれば、次のとおりであった。

(1) 入港から沈没に至るまでの経過

本船は、船長ほか11人（ミャンマー連邦共和国籍2人、ベトナム社会主義共和国籍2人、中華人民共和国籍7人）が乗り組み、令和元年10月9日06時30分ごろ京浜港川崎第1区公共ふ頭2号（以下「公共ふ頭」という。）に着岸し、鋼スクラップ約3,045 t^{*2}を積載してベトナム社会主義共和国ソندان港に向けて航海する予定であったが、台風第19号（アジア名：Hagibis ハギビス、以下「本件台風」という。）が本邦関東地方に接近しているため、一旦東京湾で本件台風の避泊をすることとし、京浜港の港長から京浜港K1錨地（以下「K1錨地」という。）に錨泊が可能であるとの連絡を受けた。

本船は、10日22時00分ごろ公共ふ頭を出航し、23時45分ごろ、K1錨地に右舷錨を投下し、錨鎖7節（錨鎖1節の長さは27.5mである。）を繰り出して錨泊を開始した。

本船は、11日07時30分ごろ～09時58分ごろK1錨地で補油を行

^{*2} 鋼スクラップ3045.000MTのかさ比重を1.000として算出し、かさ比重とは、一定容積内に充填した質量を容積で除した値をいう。

い、A重油約9.303MT（メトリックトン）及びC重油約10.500MTを搭載した。

船長は、12日12時00分ごろ食堂にいた乗組員9人に本件台風接近の注意喚起と今後の対応について説明し、その後船橋当直者1人及び機関室当直者1人にそれぞれ同様の内容を伝えた。

本船は、14時00分ごろ、船長の指示により左舷錨を投下して錨鎖5節半を繰り出し、すでに投下していた右舷錨と約50°の角度をもって双錨泊状態とした。

船長は、19時00分ごろ、本件台風によって増勢する風及び波に備える目的で、乗組員に対してスタンバイ配置を指示し、航海士A、別の航海士（以下「航海士B」という。）、甲板長、甲板手及び甲板員を船橋配置につけ、自らが船橋で操船指揮に当たり、機関長、機関士及び別の操機手（以下「操機手B」という。）を機関室配置につけて主機の運転準備を行わせた。

本船は、船長が舵及び主機を使用し、南東からの風及び波に船首を向けるように船体の姿勢制御を行い、船体が両舷にクリノメータ（船体傾斜計）の指示で約5°の横揺れをしていたが、風及び波に対して船首を向けるように操船したので、その後縦揺れを伴う状態となった。

船長は、20時00分ごろ、風及び波が強まり、横揺れが10°以上になり、ECDIS（電子海図情報表示装置）及びレーダーで船位の確認及び周囲の見張りをしていたところ、本船の左舷方にいた船舶が走錨して本船に接近していることに気付き、VHFで呼び掛けるとともに衝突を回避するよう舵及び主機の操作を行い、走錨した船舶のことを航海士Bから東京マーチスにVHFで通報（交信1回次）させた。

船長は、走錨した船舶が本船の船尾方に通過したのを認め、20時16分ごろ、東京マーチスからのVHFによる呼び掛け（交信3回次）に対し、走錨した船舶が本船から離れていったことを連絡した。

船長は、21時07分ごろ（交信6回次）及び21時23分ごろ（交信7回次）、東京マーチスから本船が走錨していないかとVHFで問い掛けられたので、投錨して主機を使用し、船体の姿勢制御ができている旨を航海士Bから返信させた。この後、本船は、運転中の2号発電機原動機が急に停止して船内電源を喪失し、操舵装置への給電が絶たれて操舵不能となった。

船長は、主機が運転可能であったので、主機を操作して船体の姿勢制御を行い、また、機関室配置の機関長及び機関士は、予備機の1号発電機を手動で始動し、主配電盤で気中遮断器を投入して船内電源喪失から1～2分後に船内電源を復旧した。

機関長及び機関士は、停止した2号発電機原動機の燃料油供給配管系統（以下「本件配管系統」という。）を点検したところ、水が燃料油に混入していることを発見し、本件配管系統の燃料油から混入した水を抜く作業（以下「本件排出作業」という。）を行って2号発電機を運転可能とした。

本船は、その後1号発電機原動機が停止し、機関長及び機関士が2号発電機を始動して船内電源が復旧された。

船長は、非常操舵に切り替えることとし、操船を航海士Bに任せ、甲板手と共に船橋から操舵機室に移動し、非常操舵の準備を行った。

本船は、始動した2号発電機が停止することが2回続き、その都度機関部乗組員が本件排出作業を行って同発電機を始動して船内電源を復旧させ、21時32分ごろ船内電源が連続的に供給されるようになった。

船長は、船内電源の復旧後、甲板手と共に船橋に戻り、本船が船首方から左舷船首方に風及び波を受ける状況下、操船指揮を行った。

本船は、ターポリンシート（繊維の布の両面に合成樹脂を塗布した防水性のある複合シート）が上甲板の貨物倉ハッチカバー上を覆ってロープ類で固縛されていたが、すでに風及び波を受けて端からめくれ上がっており、1番貨物倉、2番貨物倉の順に同シートが飛ばされ、ハッチカバーが直接波に晒さらされていた。

本船は、21時34分ごろ、右舷方に約5°だった横傾斜が次第に大きくなり、右舷傾斜約30°となったところで、船長が転覆の危険を感じて航海士Bに総員退船部署を指示し、ジェネラルアラーム（船内に注意喚起を促す非常警報ベル）が吹鳴された。

船長は、船橋に備え付けてあった救命胴衣3個を航海士A、甲板員及び昇橋してきた司厨長にそれぞれ手渡し、一階層下にある居室に戻り、乗組員の免状、旅券等の書類をかばんに入れて手に抱え、端艇甲板のマスターステーション（総員退船部署発令時の集合場所）に移動した。

本船は、船長、航海士B、機関長、甲板長、操機手A、操機手B及び別の操機手（以下「操機手C」という。）が、救命筏がある端艇甲板左舷側のマスターステーションに集まったところで、右舷傾斜が更に大きくなり、約45°となった。

船長は、救命筏を投下する時間がないと思い、マスターステーションにいた乗組員に海に飛び込んで離船するよう指示し、操機手B、操機手C、自身、操機手A及び機関長が順に本船左舷側から海に飛び込むのを認めた。

航海士Aは、救命胴衣を着用して船橋の左舷ウィングに留まり、本船の右舷傾斜が大きくなるのを見たとき、貨物倉で何かが右舷方に移動することを

感じ、その後本船が急速に横転し、沈没するのと同時に海に飛び込んだ。

東京マーチスのレーダー画像記録によれば、21時39分ごろ本船の船影がレーダー画像から消失した。

本事故の発生日時は、令和元年10月12日21時39分ごろであり、発生場所は、川崎東扇島防波堤東灯台から137°1.0海里（M）付近であった。

（図1、付図1 事故発生場所概略図 参照）

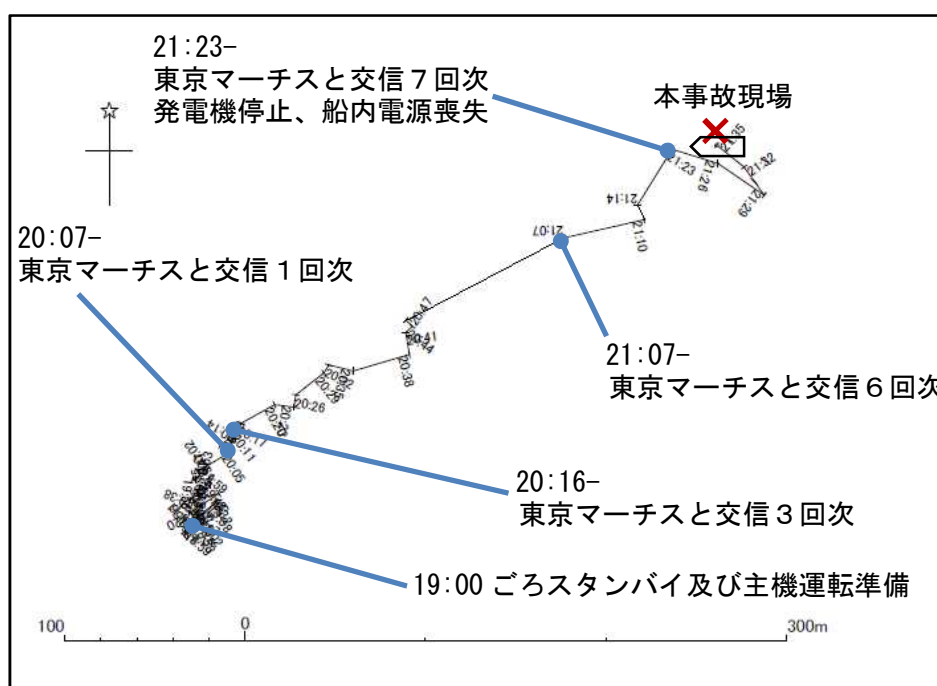


図1 本船の動静図（時刻はJST表示である）

- (2) 沈没から乗組員の捜索、発見、救助及び揚収に至るまでの経過
- サルベージ会社（以下「A社」という。）担当者の口述及び海上保安庁の情報によれば、次のとおりであった。
- ① 海上保安庁は、10月12日23時20分ごろ、神奈川県川崎市東扇島沖約1.3Mで錨泊中の船舶から東京マーチスに対し、「付近海面に人が泳いでいる。」との通報を受け、同庁の航空機、巡視船及び巡視艇を発動し、調査を行った。
 - ② 巡視艇は、10月13日00時20分ごろ、通報があった場所付近に到着した後、乗員が油臭を認めるとともに JIA DE と記載された救命浮環を発見したが、本船の船影を発見できなかった。
 - ③ 巡視船2隻、巡視艇6艇、海上保安庁の回転翼機1機及び特殊救難隊（以下「特救隊」という。）は、01時30分ごろ、本事故現場付近を捜

索し、巡視艇が機関長を、巡視船の搭載艇（以下「搭載艇」という。）が 01時40分ごろ船長及び操機手Aを救助し、更に搭載艇2艇、巡視艇1艇、同庁の測量船（以下「測量船」という。）1隻及び機動防除隊4名並びに川崎市消防局所属消防艇1艇が捜索に加わり、02時55分ごろ搭載艇が漂流していた航海士Aを救助した。

本船の救命筏は、本事故現場付近で発見されたものの、人の姿がなかった。

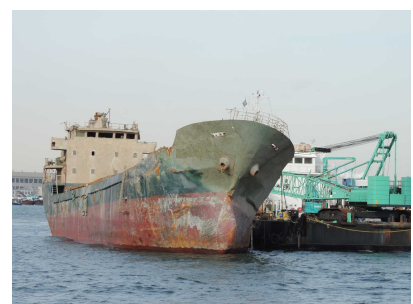
- ④ 海上保安庁は、測量船が03時00分ごろ東扇島南東方沖1.4M付近の海底で本船らしき物体をソナーで確認し、特救隊が05時50分ごろ、潜水捜索を行い、本事故現場付近の沈没船が本船であることを確認し、また、06時30分ごろまでに海上で乗組員2人及び船内で乗組員3人を発見して揚収した。
- ⑤ 本船は、海上保安庁が10月14日まで捜索を行った結果、神奈川県横須賀市沖の海上において乗組員1人が、また船内から乗組員1人が発見されて揚収されたものの、船長及び乗組員11人のうち、残る乗組員1人が行方不明のままであった。
- ⑥ A社は、令和2年2月13～15日、起重機船で本船の引揚げを行った際、行方不明となっていた乗組員1人を船内で発見し、A社から連絡を受けた海上保安庁は、14日、この乗組員1人を船内から揚収した。（図2参照）



起重機船による引揚げ作業



引揚げ中の本船



台船に係留された本船

図2 本船の引揚げ作業

2.2 人の死亡及び負傷に関する情報

船長、本件代理店担当者及び海上保安庁担当者の口述によれば、次のとおりであった。

航海士B、機関士、甲板長、甲板手、操機手B、操機手C、司厨長及び沈没した本船の引揚げ時に船内で発見された甲板員は、病院において司法解剖され、溺水による

死亡と検案された。

機関長及び航海士Aは、水が呼吸器官に入った可能性があったので、それぞれ神奈川県横浜市内の病院に搬送され、機関長が2日間及び航海士Aが4日間それぞれ入院した。

2.3 船舶の損傷に関する情報

海上保安庁の情報によれば、本船は、沈没し、本事故現場付近の水深約28mの海中で船首を南西方に向け、左舷側が上となって右舷方に傾斜した状態で着底していた。

2.4 乗組員に関する情報

(1) 性別、年齢、海技免状等

- ① 船長 男性 54歳 国籍 ミャンマー連邦共和国（以下「ミャンマー」という。）

締約国資格受有者承認証 管理レベル（航海）（パナマ共和国（以下「パナマ」という。）発給）

交付年月日 2019年7月14日

（2021年12月22日まで有効）

船長は、ミャンマー発給の総トン数3,000トン未満の船舶の船長免状を受有していた。

- ② 機関長 男性 33歳 国籍 ベトナム社会主義共和国（以下「ベトナム」という。）

締約国資格受有者承認証 管理レベル（機関）（パナマ発給）

交付年月日 2019年9月15日

（2019年12月15日まで有効）

機関長は、ベトナム発給の機関出力3,000kW未満の船舶の機関長免状を受有していた。

- ③ 航海士A 男性 47歳 国籍 中華人民共和国（以下「中国」という。）

締約国資格受有者承認証 運航レベル（航海）（パナマ発給）

交付年月日 2019年9月22日

（2019年12月22日まで有効）

航海士Aは、中国発給の運航レベル（航海）免状を受有していた。

- ④ 操機手A 男性 27歳 国籍 ミャンマー

締約国資格受有者承認証 SUPPORT（パナマ発給）

交付年月日 2019年9月13日

（2024年8月18日まで有効）

操機手Aは、ミャンマー発給の操機手資格を受有していた。

⑤ 別の乗組員

船長、機関長及び航海士Aの口述によれば、甲板員はベトナム発給の運航レベル（航海）免状を受有し、甲板員を除く別の乗組員はそれぞれ自国が発給した免状又は資格を受有していた。

(2) 主な乗船履歴等

船長、機関長、航海士A及び操機手Aの口述によれば、次のとおりであった。

① 船長

船長は、1985年からミャンマーの海軍に在籍して航海士を務め、その後、海事当局船員訓練センターにおいて海技免状を取得し、2009年から商船の航海士として乗船するようになり、2019年6月本船に乗船して初めて船長職をとった。

また、船長は、過去の航海士としての乗船経験及び荒天時の操船に関する経験により、甲板部乗組員にその技量を認められていた。

本事故当時の健康状態は良好であった。

② 機関長

機関長は、ベトナムの船員養成学校で海技免状を取得し、2007年から商船に乗船し、その後船員養成学校で船舶管理を学び、2017年機関長の海技免状を取得し、2019年9月本船に乗船した。

本事故当時の健康状態は良好であった。

③ 航海士A

航海士Aは、1991年中国の航海学校で海技免状を取得し、これまでに本船と同種の貨物船に乗船した経験があり、2019年5月本船に乗船した。

本事故当時の健康状態は良好であった。

④ 操機手A

操機手Aは、2017年、ミャンマーの海事当局船員訓練センターにおいて資格を取得し、2019年8月本船に乗船した。

本事故当時の健康状態は良好であった。

⑤ 別の乗組員は、本事故当時の健康状態が良好そうに見えた。

2.5 船舶等に関する情報

2.5.1 船舶の主要目

IMO 番号	8989848
船 籍 港	パナマ パナマシティ

船舶所有者	Jia de Marine Shipping Co., Limited (中国香港特別 行政 区) (以下第6章を除き「B社」という。)
船舶管理会社	Realshipping Int'l Marine Co., Limited (中国香港特別行 政区) (以下第6章を除き「C社」という。)
総 ト ン 数	1,925トン
L × B × D	82.65m × 13.00m × 6.60m
満載喫水線 ^{*3}	夏期満載喫水線 (甲板線の上縁から下方へ1,112mm)
船 質	鋼
機 関	ディーゼル機関1基
出 力	750kW
推 進 器	4翼固定ピッチプロペラ1個
建 造 年	2002年

(図3 参照)



図3 本船 (本事故前)

2.5.2 積載状態等

船長及び機関長の口述並びに本件代理店、補油代理店、積荷役会社及び積荷検定会社からの回答書、国際満載喫水線証書によれば、本船の京浜港出航時の貨物積載状態、本事故当日の燃料油等の保有量、喫水等は、表3及び図4のとおりであった。

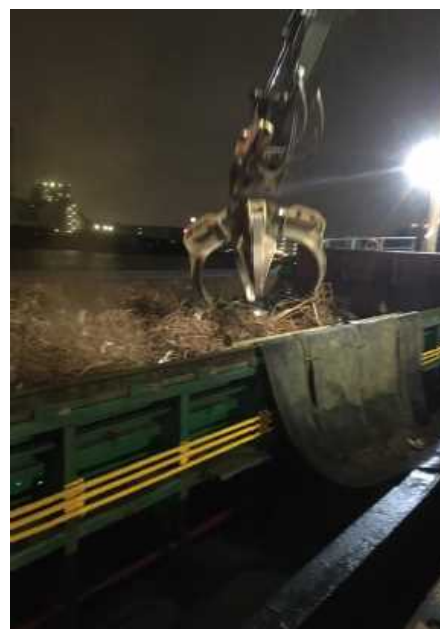
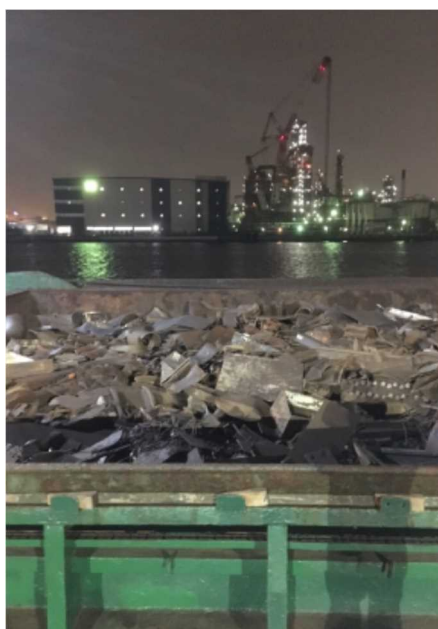
10月11日に行った補油の供給証明書 (Bunker Delivery Receipt) によれば、

^{*3} 「満載喫水線」とは、1966年の満載喫水線に関する国際条約 (LL条約) により規制、算出された船舶の満載時における最小「乾舷」 (海面から上甲板上面までの高さ) の標示をいい、航行中の船舶の適正な予備浮力を確保して安全な運航を行うため十分な乾舷が維持できる限界値をいう。本船の航行海域は、通年、夏期満載喫水線が適用される海域である。

A重油の性状は、水分含有量が0.05%と記されていた。

表3 貨物、燃料油等の保有量、喫水等の状況

積載物	重量(t)	K 1 錨地錨泊中 (補油後)	
鋼スクラップ (1番貨物倉) ※	1,348.880	喫水 (船首/船尾)	約 5.30m/約 5.80m
鋼スクラップ (2番貨物倉) ※	1,696.120		平均約 5.55m
A重油 (概算値)	17.903		乾舷 (船体中央部)
C重油 (概算値)	61.852		約 1.050m
潤滑油 (概算値)	2.58	横傾斜	なし
清水 (概算値)	67.0	※夏期満載喫水は、5.488mであった。	



※鋼スクラップは、各貨物倉に重機で積載され、押し込まれて水平に均す作業が行われる。

図4 鋼スクラップの積載の様子

2.5.3 船体構造及び運航設備

現場調査、船長、航海士A、機関長、操機手A、本件代理店担当者、A社担当者及び海上保安庁担当者の口述、積荷役会社からの回答書並びに一般配置図及び貨物倉概略図によれば、次のとおりであった。

(1) 船体構造及び設備

本船は、国際航海に従事する船尾船橋二層甲板型の一般貨物船であり、船首側から順に1番及び2番貨物倉を有し、船首に船首楼を、船尾に船尾楼甲板をそれぞれ設け、船尾楼甲板上の甲板室上部に船橋があり、上甲板両舷舷側には高さ約1mのブルワークが設置され、その下部の船首船尾方向に放水

口があった。

本船は、本事故当時、船体に異状がなかった。

なお、本船は、GMDSS^{*4}に関する設備を搭載していたものの、本事故の際、海上保安庁等で遭難通信が受信されていなかった。また、本事故後、EPIRB^{*5}等の機材は発見されたという情報がなかった。

(図5、付図2 一般配置図 参照)

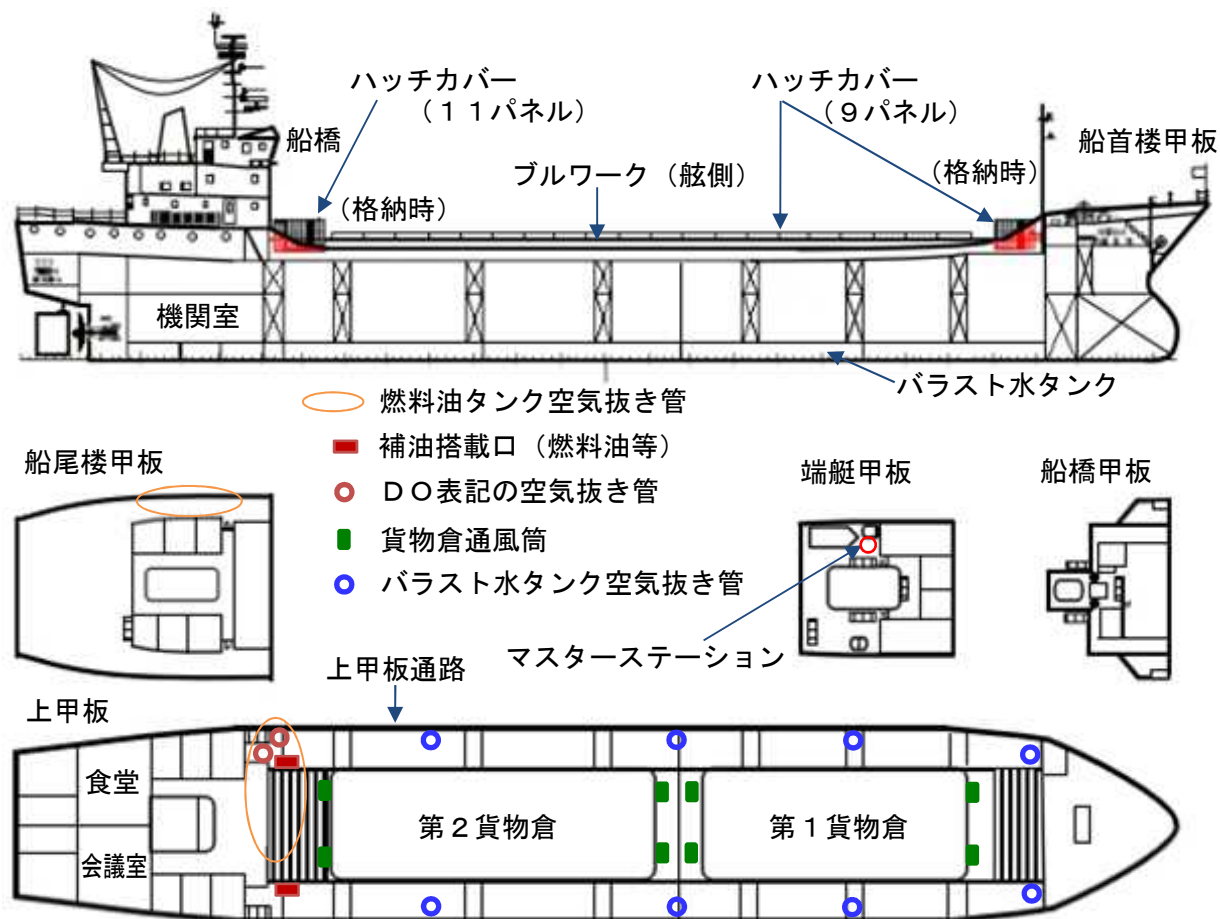


図5 一般配置図 (概要)

(2) 主機、発電機、主配電盤及びその他の機器

機関室は船底部の船底甲板に配置され、主機が同室の中央に、発電機2台

^{*4} 「GMDSS: Global Maritime Distress and Safety System」とは、海上における遭難及び安全に関する世界的な制度のことであり、国際航海に従事する旅客船及び総トン数300トン以上の貨物船に、遭難通信、非常時の安定した通信を確保するとともに、航行警報・気象警報などの海上安全情報を自動で伝達できる通信システムのことをいう。

^{*5} 「EPIRB: Emergency Position Indicating Radio Beacon」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をいい、船舶が沈没したときに水圧センサが働いて自動的に浮揚し、遭難信号を発信するものをいう。

が主機の両舷に、主配電盤が第二甲板左舷船尾部にそれぞれ設置されていた。

主機、発電機、主配電盤及びその他の機器は、京浜港出航時、通常運航上の異状がなかった。

(3) 貨物倉

本船は、2つの貨物倉を有し、その容積が第1貨物倉2,000 m³及び第2貨物倉2,286 m³であり、貨物倉天井の船首側及び船尾側の両舷にそれぞれ2個の通風筒があり、合計8個の通風筒が設置されていた。

貨物倉通風筒の開口部は、その断面形状が1辺の長さが約200 mmの正方形であり、本船が引き揚げられたとき、蓋の止め金具が掛かっておらず、蝶ナットが緩んでおり、開の状態となっているものが少なくとも4個あった。

(図6 参照)



図6 貨物倉及び通風筒

ハッチカバーは、シングルプル式ハッチカバーが採用され、第1貨物倉が9個の、第2貨物倉が11個のそれぞれ分割されたパネル（以下「本件パネル」という。）で構成されており、本件パネルの寸法が長さ（船首船尾方向）約2.1 m×幅（右舷左舷方向）約8.65 m×厚さ0.3～0.4 mであった。

ハッチカバーは、本件パネルの下面に口型形状の幅約150 mmのラバーパッキングが周囲端部に取り付けられ、閉鎖時、同パッキングがコーミングに当たり、コーミングに設置されたクランプ（押さえ金物）によって下方に押さえ付けられ、コーミングに密着されて風雨密（いかなる海洋状態においても船内に浸水しないことをいう。）を保持する仕組みとなっていた。

ハッチカバーは、本件パネルの約4分の1が反って変形しており、ハッチカバー閉鎖時、コーミングの間との当たり面の一部に約5 mmの隙間があった。

本事故現場から引揚げられた本件パネルはラバーパッキンが取り付けられていなかったことが確認されているが、運航時のラバーパッキンの状態を明らかにすることはできなかった。

また、本件パネルは、各接合部に約5mmの隙間を設けてあり、その下方の右舷左舷方向に、本件パネル間に浸入した水を受けて貨物倉への浸水を防ぐWater receiver railing（以下「ドレン受け」という。）が設置されていたが、ドレン受けが発錆によって部分的に破口した状態であった。

（図7 参照）

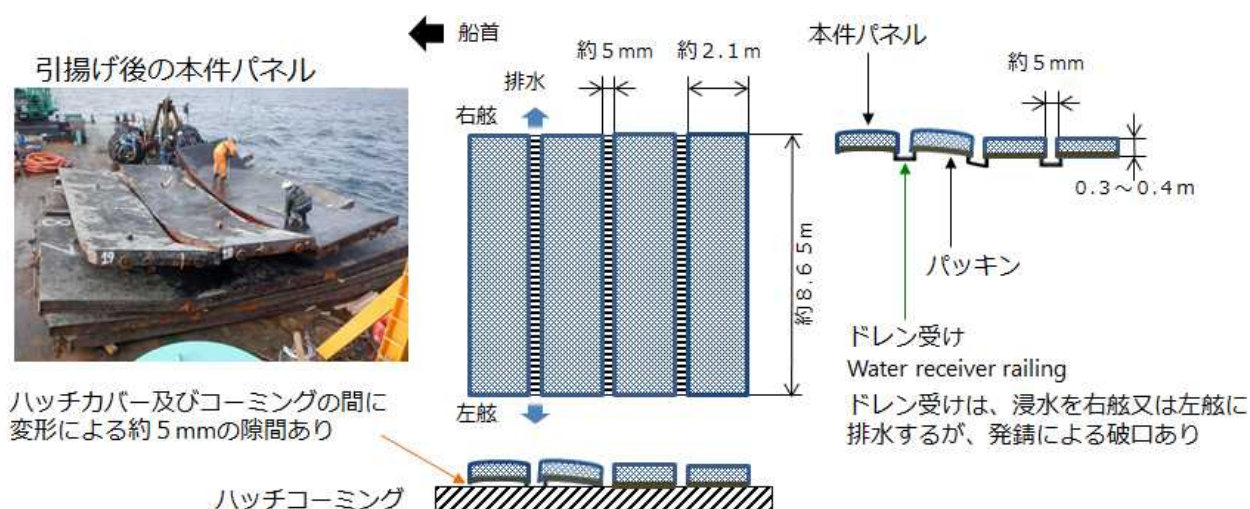


図7 本件パネルの構造及び状態

ハッチカバーは、閉鎖時、ターポリンシートで覆い、ロープ、鋼製バツテン（シートの押さえに使用する要具）及び木製くさびで固縛して風雨密を保持する方法がとられていた。

このターポリンシートは、船長が令和元年6月に乗船する以前から使用され、本船が10月10日京浜港を出航する際にも同様にハッチカバー上を覆っており、本事故後、引きちぎられた同シート及び固縛用ロープの残骸が上甲板通路に残っていた。

(4) 燃料油配管系統

本件配管系統を含む燃料油配管系統の概略は、図8-1のとおりであった。

A重油は、船底甲板から上甲板近くまでの高さがあるA重油タンクに保管され、こし器を通り、発電機原動機及び出入港等のスタンバイ状態における主機に使用されていた。

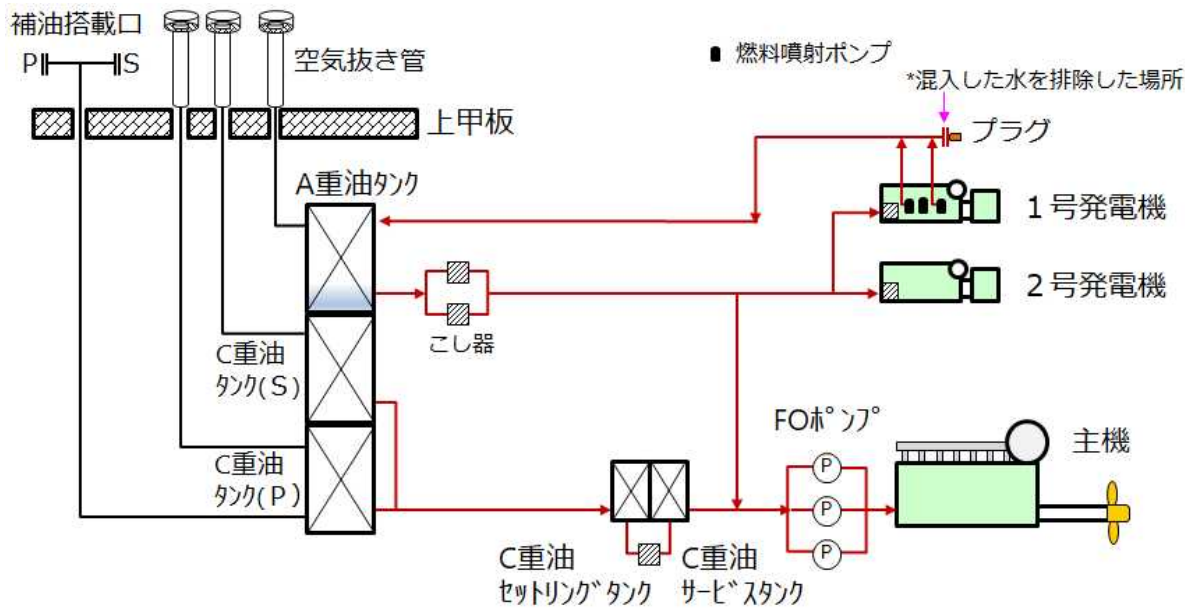


図 8 - 1 燃料油配管系統概略図

A重油タンク及びC重油タンクの空気抜き管は、船尾楼甲板両舷及び上甲板の甲板室船首側周辺において、それぞれのタンクの上方位置に設置され、頂部にある傘部を上下させて開放又は閉鎖を行い、止めボルト3か所で位置を固定するようになっており、水の流入を自動で防ぐ構造及び配管となっていなかった。また、「DO」と表記されたA重油タンクのものと思われる高さ約0.7mの空気抜き管2本は、上甲板船尾部左舷側にあった。(図8-2参照)

別の燃料油タンクは、機関室下部の二重底タンクにあったものの、同タンク内に保管されていた燃料油の種類及びその状態が不明であり、本事故当時に使用されていなかった。

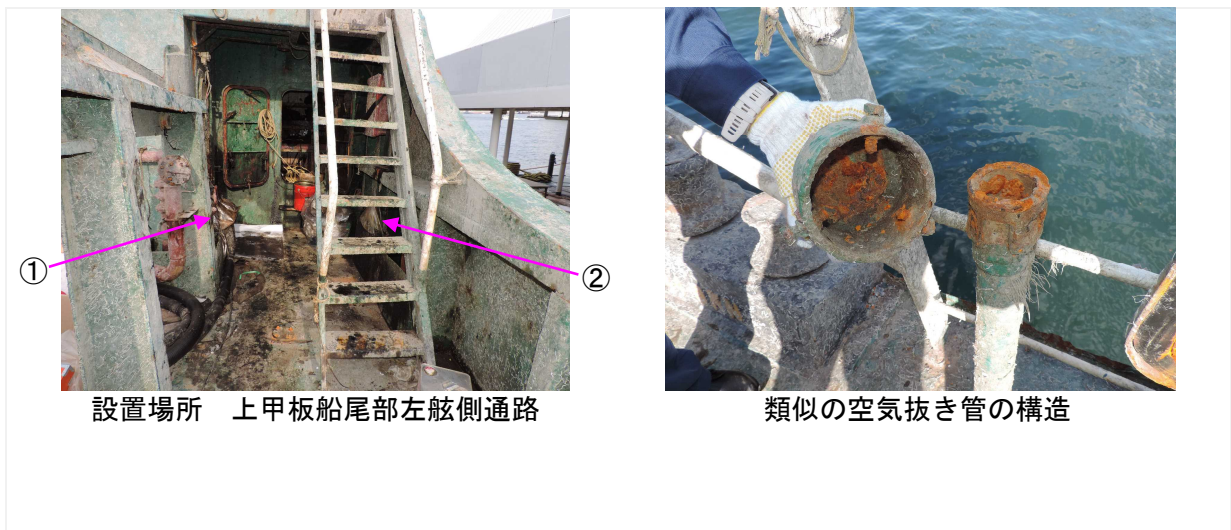




図8-2 燃料油タンク空気抜き管

(5) バラスト水タンク

バラスト水タンクは、船底部に船首から1番、2番、3番及び4番の順に両舷に分かれた合計8個のタンクがあり、それぞれのタンクから1本の空気抜き管が上甲板に導かれて設置され、現場調査の際、傘部にターポリンシートの破片が挿入された状態であり、本事故当時、海水がバラスト水タンクに吸い込まれた痕跡であった。(図9参照)



図9 バラスト水タンク空気抜き管の状態

2.5.4 貨物倉の風雨密及びハッチカバーに関する規則

LL条約附属書I第II章第16規則には、貨物倉の風雨密及びハッチカバーについて、次のとおり規定されている。

第16規則 鋼その他これと同等の材料の風雨密のハッチ・カバーによって閉鎖されるハッチ

(1) (略)すべてのハッチは、鋼又は他の同等な材料のハッチ・カバーを備えなければならない。(略)ハッチ・カバーは風雨密でなければならない。かつ、ガスケット及びクランプ装置を備えなければならない。その配置は、いかなる海面状態においても風雨密を維持することができることを確保するものでなければならない。このため、風雨密性の試験は、最初の検査の際に行うものとし、また、更新及び年次検査の際に又は一層頻繁に行うべきものとすることができる。

(2)～(7) (略)

2.6 気象及び海象等に関する情報

2.6.1 気象警報

気象庁によれば、10月11日から12日にかけて、横浜市及び川崎市に発表された気象警報は、表4のとおりであった。

表4 気象警報

発表日時		警報	備考
10時11日	10時33分	波浪警報	13日03時37分解除
10月12日	06時23分	暴風警報	
	15時30分	大雨特別警報	13日03時37分警報から注意報 11時58分解除

2.6.2 観測値等

(1) 気象庁の気象データによれば、本事故現場の西南西方約14kmに位置する横浜地方気象台及び西北西方約8kmに位置する東京航空地方気象台羽田観測所における10月12日の気象観測値は、次の表5、6のとおりであった。

表5 横浜地方気象台における観測値

時刻	天気	風向	風速 m/s	気圧 hPa	降水量 mm	気温 ℃	視程 km
20時00分	雨	南東	16.8	969.9	0.5	23.7	2.00
21時00分	雨	南	20.2	968.3	0.5	23.5	2.52
22時00分	雨	南西	9.6	978.7	0.5	23.7	4.36

表6 羽田観測所における観測値

時刻	風向	平均風速 m/s	最大瞬間風速 m/s	降水量 mm	気温 ℃	備考
05時50分	北東	—	15.4	—	—	最大瞬間風速が 15m/sを越えた
15時20分	東南東	16.3	—	—	—	平均風速が 15m/sを越えた
18時00分	東南東	14.6	18.5	1.0	24.3	
18時30分	南東	18.0	24.2	1.5	24.3	
19時00分	南東	15.8	22.1	1.0	24.3	
19時30分	南東	14.9	23.8	0.0	24.0	
20時00分	南東	18.0	24.7	0.5	23.8	
20時30分	南南東	23.1	32.9	1.5	23.5	
21時00分	南南西	32.3	42.7	0.5	23.3	
21時30分	南南西	28.9	39.6	1.0	23.8	
22時00分	南西	15.9	23.7	1.5	23.4	

(2) 潮汐及び水温

海上保安庁の情報によれば、本事故発生時の横浜市横浜新港における潮汐は下げ潮の末期で、実際に観測された潮高の値（最低水面上の値）は、21時00分が184cm、21時30分が153cm、22時00分が155cmであった。

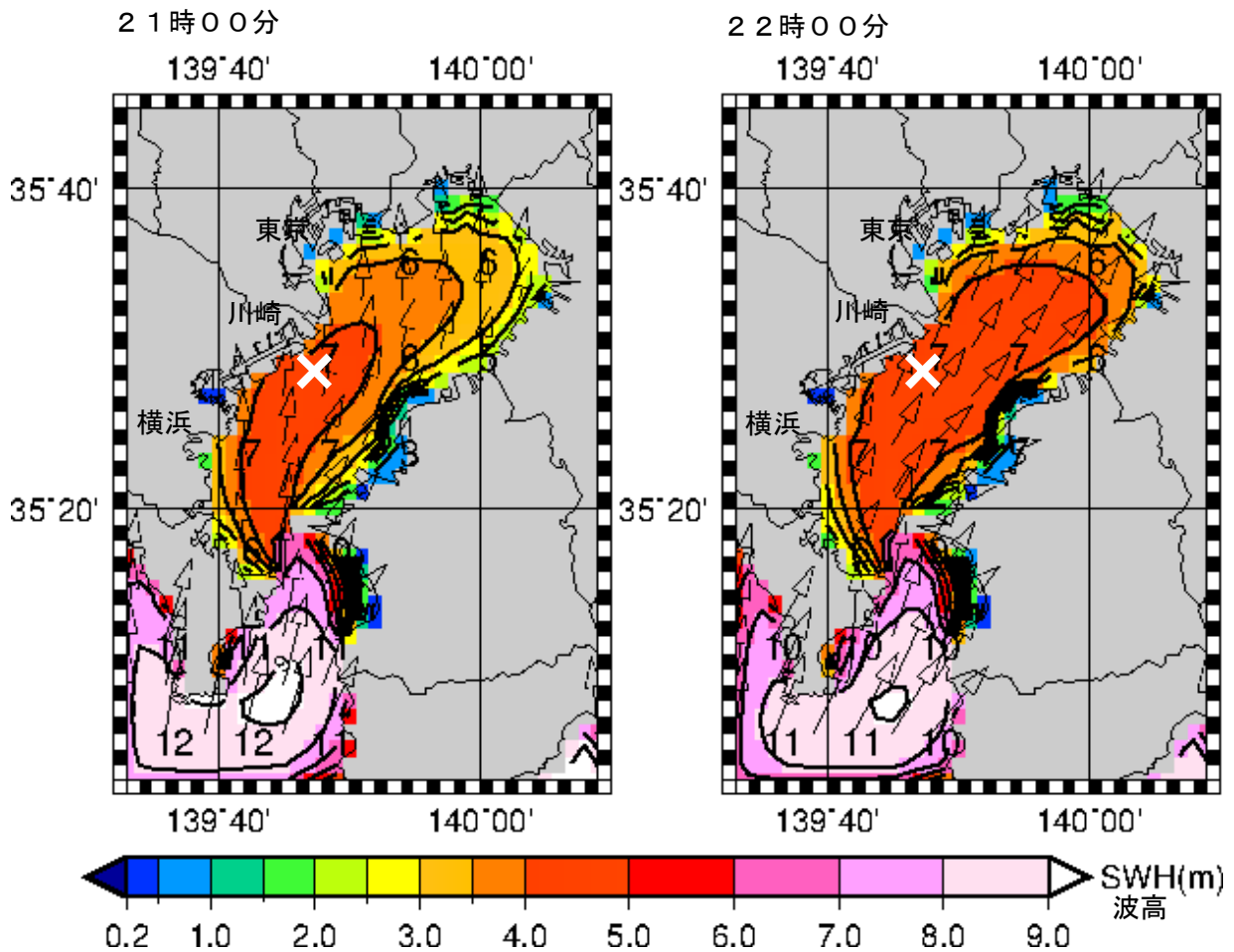
海上保安庁の情報によれば、22時00分ごろ本事故現場に近い千葉県浦安市沖で観測した水温は24.2℃であった。

2.6.3 波浪

気象庁が浅海波浪モデル（水平解像度2kmの高解像度で、湾内等のごく狭い海域のみを解析するものであり、その結果は推定値である。）を使用して推定した東京湾における10月12日18時00分～22時00分の波浪及び風の状況（以下「本件波浪状況」という。）は、表7及び図10のとおりであり、21時から22時にかけて、波高4.0～5.0mの波が東京湾に拡がり、西から東に吹く風の成分が大きくなる時期であった。

表7 18時00分～22時00分の東京湾における本件波浪状況

時刻	有義波高 (m)	周期 (sec)	波向 (°)	風速 (m/s)	
				西から東に吹く風	南から北に吹く風
18時00分	5.2032	7.1245	104.1	-13.56	9.92
19時00分	3.7393	6.7464	121.0	-19.60	16.50
20時00分	4.0420	6.7119	155.7	-15.07	24.51
21時00分	4.2060	7.0981	190.3	6.62	26.91
22時00分	4.6685	7.2101	212.7	23.41	20.62



図中の数字：周期

×：本事故現場

図10 東京湾における波浪状況

2.6.4 乗組員による観測

船長の口述によれば、10月12日本事故当時、天気は雨で、風向は南、風力は6～7、視界は不良、波高は3.0～4.5mであった。

船長は、本件台風に関する気象情報を、ファクシミリ、NAVTEX RECEIVER（海上安全情報を自動受信する装置）、携帯電話のインターネット情報を利用して収集し、

京浜港係留中、本件代理店から5日分の気象予報図を入手していた。

2.6.5 本件台風に関する情報

気象庁の情報によれば、本件台風の経路、勢力等は、次のとおりであった。

(1) 本件台風の状況

本件台風は、10月6日に南鳥島近海で発生した後、12日19時00分ごろ、「大型で強い」勢力を保ったまま伊豆半島に上陸して中心の気圧955hPa、中心の最大風速40m/s、約35km/hの速さで北北東進し、関東地方を通過して13日に日本の東方沖で温帯低気圧となった。(図11参照)

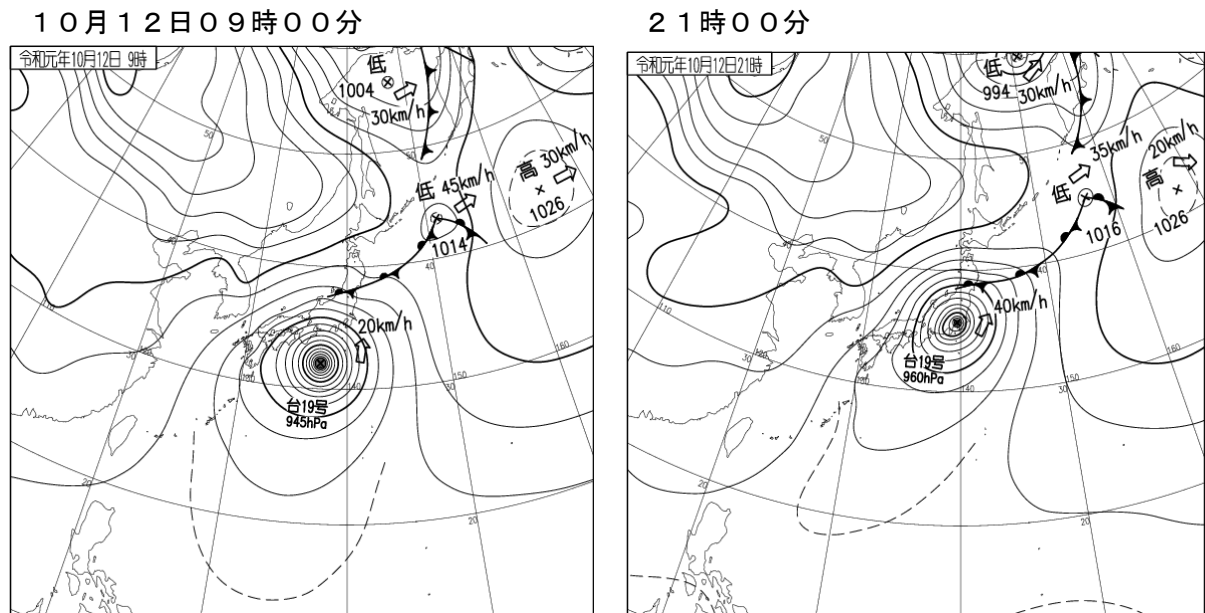
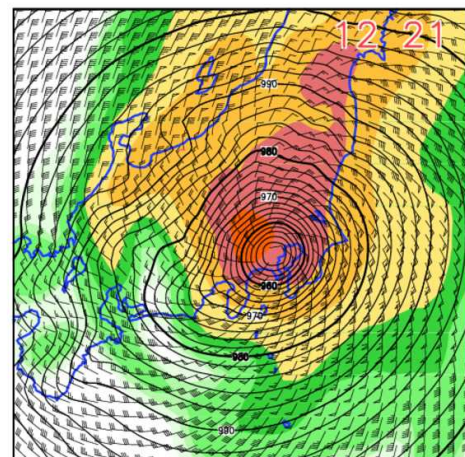


図11 10月12日の地上天気図 出典元：気象庁ホームページより

(2) 本件台風の経路

気象庁のホームページに掲載された本件台風の経路は、図12のとおりであり、本船が錨泊していた京浜港が、本件台風の進行方向の右半円（危険半円）にあった。



気圧：黒の実線 風向・風速：羽根 1本 10m/s

図 1 2 本件台風の経路（気圧及び風の状況） 出典元：気象庁ホームページより

2. 7 船舶の運航管理等に関する情報

2. 7. 1 C社の事業内容

船長、機関長及び航海士Aの口述並びに本件代理店の回答書によれば、C社は、B社が所有する本船を用船し、運航及び管理業務を行い、日本（京浜港、鹿児島港、新潟港、清水港等）～大韓民国（以下「韓国」という。）（釜山港等）～中国（青島港等）～ベトナム（ソンドン港等）等の間で、鋼又は各種金属が混合したスクラップ、鋼材等を運ぶ不定期航路に就航させていた。

船長は、ふだんC社青島事務所から寄港地を含む運航に関する指示を受け、令和元年10月の京浜港寄港予定を韓国昌原市鎮海区の港に寄港した9月に知らされていた。

本船の乗組員は、C社が中国人船員を雇用し、C社と契約したミャンマー及びベトナムの船員派遣会社が自国の船員の派遣を行い、それぞれ配乗されていた。

2. 7. 2 安全管理システム

船長の口述及びC社の安全管理マニュアル（Safety Management Manual、以下「SMM」という。）によれば、C社は、安全管理システム（Safety Management System、以下「SMS」という。）を導入し、船舶管理、船舶運航等の指針、手順書等を定めて運用していた。

SMSに定められている重大な操船、船体及び設備の保守整備並びに船員の訓練に関する関連事項を以下に抜粋し、（）内に仮訳を示す。

(1) 非常時における操船

七 Shipboard Operations (船舶運航)

1. Development of Plans for Shipboard Operations (船舶の運航計画立案)

Shipboard Operations are divided into 2 parts of Critical and Special Operations so that the pivotal operation concerning with safety and pollution prevention are become the focus of attention when we establish our plans for shipboard operations.

The Company has established the document of <Procedure of developing Plans for Shipboard Operation (PPSO)> exactly identifying Critical Shipboard Operation and Special Shipboard Operation, which is guide for establishment plan and procedure for ship's operations.

(船上での操船は、重大な操船及び特殊操船からなり、船舶運航計画を立案するとき、安全と汚染防止に関する重要な操船が着目される。

C社は、手順書‘PPSO’を定め、重大な操船と特殊操船を定義し、船舶運航の計画立案及び手続きを提示している。)

Critical Shipboard Operation 重大な操船

Critical Shipboard Operation are those where an error may immediately cause an accident or a situation which could threaten people, the environment or the ship;

(重大な操船は、エラーが人、環境又は船舶を脅かす事故又は状況が急に生じる可能性がある場合のものである。)

本船の船長は、SMSに基づき、台風等に対する荒天対策として、次のことを行うこととしていた。

- ① 事前に、操舵装置、航海計器、GMDSS、主機、補機及び発電機の確認及びテスト並びにすべての配管系統及びタンクの確認を行う。主機は、運転準備を行い、事前に試運転を行う。
 - ② すべての水密扉の閉鎖、錨の格納、貨物倉ハッチの閉鎖の状況を確認する。錨泊時は状況に応じて双錨泊とする。
 - ③ すべての可動式甲板設備の固縛を確保する。
 - ④ 応急部署に係る非常設備、乗組員の救命胴衣の確認及び使用準備を行う。
- (2) 貨物倉を含む船体及び設備の保守整備
- + *Maintenance of Ship & Equipment* 船体及び設備の保守整備
1. *Maintenance, Repair And Survey* 保守整備、修理及び検査

The company have established document of <Ship & Equipment Maintenance Procedure (SEMP)> to ensure ship can be maintained, repaired and surveyed safely and duly to meet ship's seaworthiness in conformity with the provisions of the relevant rules and regulations of the classification, administration of flag state and port state.

(C社は、手順書‘SEMP’を定め、旗国及び寄港国の関連ルール、船級による規則並びに行政指導に、管理船舶の設備が適合するよう、安全かつ公式に保守整備、修理及び検査を確実に実施する。)

Technical department is in charge of management and monitoring for ship's maintenance and repairing. All technical superintendent (原文ママ) must be familiar with not only relevant rules and regulations of the classification, administration of flag state and port state control but also ship and equipment condition. According to SEMP, the superintendent (原文ママ) should be requested to provide adequate technical support and technical feedback for ship's maintenance work. The master is liability to lead crew to strictly perform the regulation of SEMP.

(C社技術部門は管理船舶の保守整備並びに修理に関する管理及び監視を担当し、業務に精通した管理者は手順書‘SEMP’に基づき、管理船舶の保守整備に関する適切な技術サポート及び技術提供を求められ、船長はこの手順書を確実に実行するよう乗組員を指導する責任がある。)

The technical department should establish an annual plan for ship maintenance and organize performance after approved by the General Manager according to the rules or regulations of relevant international convention, flag & port state and the classification, as well as ship condition and survey status. Company have established document of <Ship's Repairing and Accepting Procedure (SRAP)>.

(C社技術部門は、管理船舶の状態と船検と同じく、関連する国際条約、旗国、寄港国及び船級のルール及び規則に従い、統括管理者の承認を受けて年次計画の策定と実行をしなければならず、C社はこのことを手順書‘SRAP’に定めている。)

The Company has established <Ship's Precautionary Inspection, Maintenance Period and Distribution (SPIMPD)> according to requirement of ship's equipments (原文ママ) manual and condition. Ensuring ship's maintenance to be carried out as planed, annual maintenance plan should be drawn up by ship and perform after approved by company as per requirement of <Ship and Equipment Maintenance Procedure>. The superintendent should timely inspect its fulfillment.

(C社は、機器の取扱説明書にある基準及び状態に従い、手順書‘SPIMPD’を定めている。管理船舶の保守整備が計画のとおり実行されるよう、年間保

守整備計画は、手順書‘SEMP’の要求事項毎に管理船舶が策定し、C社に承認された後に実行されなければならない。管理者は、適時その適合状況を検査しなければならない。)

本船の船長は、SMSに基づく貨物倉及び荷役設備の保守整備について、航海士Bを責任者とし、次のことを乗組員に指導して実行させていた。

- ① 貨物の積み荷役及び揚げ荷役における前後の点検
- ② 貨物倉の整備（1か月毎、3か月毎、6か月毎及び1年毎）

乗組員は、ハッチカバーを含む貨物倉について、日々の船体整備でハッチコーミング等の錆打ち、掃除及び塗装並びにハッチカバー可動装置のグリスアップを行い、航海士Bは、毎月、貨物倉、ハッチカバー、付属するラバーパッキン等の状態を定期的に点検していた。

(3) 乗組員の訓練

六 Resources and Personnel 人的資源

3. Conversance of Responsibility 責任の精通

As per the requirement of STCW78/95, the company has to ensure all crew employed to be familiar with their own responsibilities as well as ship's arrangement, equipment, operation procedure and particulars;

(STCW条約の要求に従い、C社は、雇用船員が、船舶の配置、設備、操作手順及び特性と同じく、個々の責任にも習熟させなければならない。)

5. Training 訓練

The company has established <Training Procedure for Personnel Ashore and on board (TPPAB)>, which is continuously indicated necessary requirement of SMS and ensure the training shall be provided to all personnel ashore and on board.

(C社は、手順書‘TPPAB’を定め、SMSの要求事項を継続的に示し、訓練が陸上及び船上の要員に提供されなければならない。)

本船の船長は、乗組員に対し、操練等の機会を通じて定期的に応急部署に関する訓練を行い、退船時の救命胴衣やイマーシヨンスーツ^{*6}の着用、海上における生存技術、非常用消火ポンプ、消火ホースの取扱い等を習得させるよう訓練を行っていた。また、英語の不得手な乗組員には、指導内容が理解できた乗組員から母国語で説明させた。

^{*6} 「イマーシヨンスーツ (Immersion Suits)」とは、船舶が沈没等の緊急事態に至ったときに冬季又は低水温の海へ脱出し、救助されるまでの間に人命を保つために着用する防寒・防水救命衣をいう。

2.7.3 寄港国検査 (Port State Control)

船長の口述及び寄港国検査データを保有する東京エムオウユウ事務局が公開するウェブサイトによれば、本船は、寄港地で寄港国検査（以下「PSC」という。）を頻繁に受けた履歴があり、2018年及び2019年に合計4回の拘留処分を受け、それぞれのPSCにおいて指摘された欠陥の概要が、次の(1)～(4)に示すとおりであった。また、本船は、2019年8月、寄港地で貨物倉の検査を受け、貨物倉に関するコメントを受けていた。

(1) 2018年1月（於：ロシア連邦ナホトカ港）

- ① 防火扉及び防火隔壁
- ② ISMコード関連事項

(2) 2018年3月（於：韓国蔚山^{ウルサン}港）

- ① 消火ポンプ及び消防主管
- ② 自己閉鎖防火扉
- ③ 防火設備

(3) 2019年4月（於：新潟港）

- ① 火災検知装置
- ② 防火操練
- ③ 非常用消火ポンプ

(4) 2019年6月（於：中国威海^{ウェイハイ}港）

- ① 船体構造
- ② 灯火
- ③ 浸水警報装置
- ④ ISMコード関連事項

本船は、2019年8月、中国青島港に寄港したとき、PSCを受け、貨物倉の検査を受けた結果、ハッチカバーの風雨密を保持する方法として、ターポリンシートを使用することが一時的に認められた。

2.7.4 入渠及び船舶検査

船長によれば、本船は、令和元年8月、中国青島港で入渠して上架（船体を水から揚げる作業）し、船体、操舵装置、主機等の船舶検査の受検及び保守整備を行い、C社担当者が、訪船して修繕工事及び検査工事の監督を行った。しかしながら、C社は、船長に修繕工事及び検査工事の内容を事前に知らせておらず、また、変形のあった貨物倉ハッチカバーの調査を行ったものの、修理を行っていなかった。

2.8 本事故前の操船状況

船長の回答書及びAIS記録によれば、本船は、船長が本事故前に船首を風及び波に向けるように舵及び主機を操作していたものの、船内電源が喪失し、操舵不能となって船体の姿勢制御が困難となり、東南東の方向に圧流され、本事故発生前、船体が振れ回り、北西方向に圧流され、船首方位が南西方～西方に向き、南南西～南西からの風及び波を左舷側面に受けるようになった。

船長は、過去に荒天時における操船を経験していたものの、本事故当時、船橋において感じた最大瞬間風速が約50m/sを超えており、本件台風が非常に強い風及び波であったと本事故後に思った。

(表8 参照)

表8 船首方位及び風向の対比

時刻	本船の船首方位	風向 (羽田観測所)
18時00分	南東	南東
18時30分	南東	南東
19時00分	南東	南東
19時30分	南—南西	南東
20時00分	南東—南—南西	南南東
20時30分	南東—南—南西	南南西
21時00分	南西	南南西
21時30分	南西	南西
21時39分ごろ 本事故時	南西—西	南南西—南西

2.9 船体動揺及び甲板上における海水の滞留に関する情報

船長、機関長、航海士A及び操機手Aの口述によれば、本船は、次のとおりであった。

- (1) 10月12日18時00分ごろ、船首方から波高が1.0～1.5mの波を受け、約5°の横揺れをしており、波の打ち込みが船首方から上甲板にあったものの、海水がブルワークの放水口から排出される状態であった。
- (2) 19時00分ごろ、(1)の状態よりも風及び波が強くなって波高が2.0～3.0mとなり、約5°の横揺れに加えて縦揺れをするようになった。‘波が船首方から上甲板に打ち込んで、第2貨物倉ハッチ付近の両舷通路において4分の1から満水の状態となって滞留した海水’ (以下「本件滞留水」という。)の排水が、ブルワークの放水口から追いつかない状態となった。

- (3) 20時00分ごろ、(2)の状態よりも風及び波が強くなって波高が3.0～4.5mとなり、10°から20°まで横揺れして波に揉まれる状態となった。

波が、船首方に加えて両舷から上甲板に激しく打ち込み、本件滞留水が貨物倉ハッチカバー位置まで達して両舷通路が満水状態となり、更に貨物倉ハッチカバー上を洗い始めて0.2～0.5m程度の波しぶきが覆い、これらの状態が本事故発生時まで続いた。

- (4) 21時23分ごろ、船内電源喪失により操舵不能となって東南東方に圧流される中で船首を風及び波に正対する操船が困難となり、本件台風が通過したのちの吹き返しによって風向が変わり始めた強風及び激しい波の打ち込みを、左舷船首方から左舷側面及び上甲板に受け、21時34分ごろ、船体が右舷方に約5°傾いて横揺れで約20°まで傾斜し、そのまま次第に傾斜が大きくなって復原することなく、更に約30°まで傾斜した。

(図13 参照)

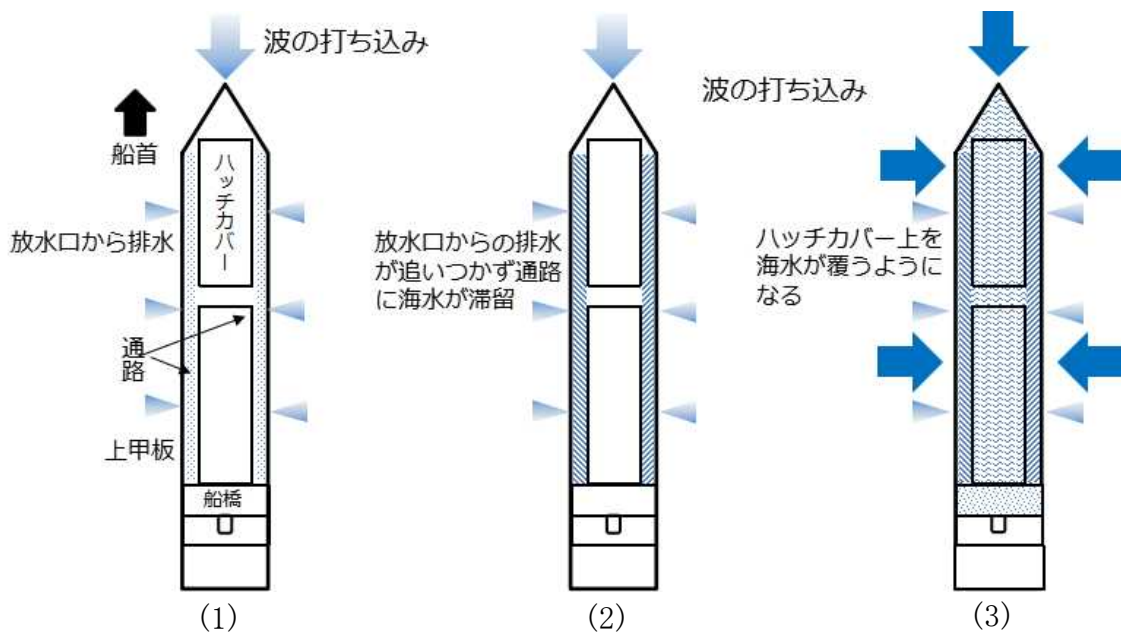


図13 波の打ち込みと本件滞留水

2.10 本件配管系統への水の混入に関する情報

機関長及び操機手Aの口述によれば、次のとおりであった。

(1) 燃料油タンクのドレン排出作業

機関部乗組員は、機関室当直における定常作業として、燃料油タンク付きドレン弁を操作して同タンク底部の燃料油を少量排出し、水の混入の有無を確認する作業（以下「ドレン排出作業」という。）を、入直したとき及び2時間後に、それぞれ行っていた。

操機手Aは、10月12日の機関室当直で12時00分ごろ及び14時00分ごろに機関室巡視を行ったとき、C重油セットリングタンク、C重油サービスタンク及びA重油タンクの順にドレン排出作業を行い、燃料油に水が混入していないことを確認し、また、16時00分ごろ次直の操機手CがA重油タンクでドレン排出作業を行っているのを見た。

(2) 本件配管系統及び燃料油タンクからの水の排除

機関長及び機関士は、本事故前、発電機原動機が最初に突然停止した際、同原動機の本件配管系統に異状があると思い、燃料噴射ポンプの燃料油出口共通管のプラグを外したところ、本件配管系統内の燃料油に水が混入していることを確認し、このプラグ穴から1回の発電機原動機復旧作業につきバケツ2杯程度の水及び水混じりのA重油を排出した。更に機関士及び操機手Cは、燃料油こし器及びA重油タンク付きドレン弁からA重油に混入した水等の排出を行った。

機関長及び機関士は、発電機原動機が停止する毎に本件排出作業を行い、同原動機を3回始動した後、連続的に船内電源が供給できた。

なお、本件配管系統から排出された水等の総量は不明であった。

(3) 機関当直における燃料油タンクの状態の確認

STCW条約^{*7}第8章第4-2部「機関当直の維持に当たり遵守すべき原則」によれば、燃料油タンクの状態の監視について、次のとおり記載されている。

‘当直の引継ぎ’

58.4 予備タンク、セットリングタンク、デイリータンクその他の燃料貯蔵タンクの状態及び量

2.1.1 試験及び研究

本事故における本船の復原性及び沈没に至る状況を調査する目的の解析調査（以下「本件解析」という。）を、国立研究開発法人海上技術安全研究所に委託した。

本件解析は、本船が、本事故当時、波の打ち込みを受けて上甲板に本件滞留水を生じ、海水が貨物倉に浸水し、左舷船首方から激しい波の打ち込みと強風を受け、右舷傾斜して横転し、沈没したことを想定しており、気象及び海象、船体の姿勢制御等の情報を基に、復原力、風による横傾斜モーメント及び傾斜角を求めた。

その解析の内容及び結果は、以下のとおりである。

（別添「沈没に係る解析調査（貨物船A沈没事故）報告書」（以下「別添解析資料」

^{*7} 「STCW条約」とは、1978年の船員の訓練及び資格証明並びに当直の基準に関する国際条約（The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978）をいう。

という。) 参照)

2.11.1 本件解析の概要

(1) 事故発生時の復原性能の推定

本船の復原性関係資料が入手できなかったため、類似の貨物船の復原性関係資料から、本事故当時、海水が上甲板両舷通路に滞留した場合及び貨物倉に海水が浸水した場合の復原性能を推定した。

(2) 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況の検討

(1)の結果を基に、本船が左舷船首方から風を受けて右舷に傾斜し、その状態から波を受けて横揺れをするようになり、更に右舷傾斜を生じた際の復原性能を推定し、沈没に至るまでの浸水状態及び横傾斜の状況を検証した。

2.11.2 本船の復原性の推定

(1) 重心高さの推定

本船の復原性能を推定する際、重心高さ (KG) ^{*8}は、類似の貨物船の復原性関係資料から本船のKGを定め、本件解析の推定に幅を持たせるよう軽荷状態のKG (以下「KG_L」という。)に4.49m及び4.82mの2通りを定めた。

(2) 本事故当日の復原性の推定

本船のK1錨地における本事故当日の積載物の重量及びバラスト水の搭載重量は表9に、本事故当日の船体コンディションは表10に示すとおりであり、この船体コンディションにおける復原力曲線^{*9}を2つのKG_Lの初期状態としてそれぞれ示す。なお、本事故当日、バラスト水タンクのうち6つのタンクに水が残留していたので、横傾斜に伴うバラスト水の重心位置の変化として自由水影響を考慮して解析を行った。

^{*8} 「重心高さ (KG)」とは、船底外板上面から船体の重心までの高さをいう。

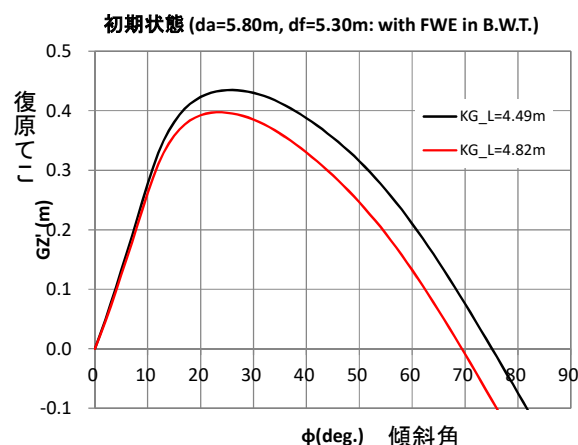
^{*9} 「復原力曲線」とは、船体横傾斜角に対する復原てこGZ (横傾斜 ϕ を元に戻そうとする偶力を排水量で除した値)をグラフ化したものをいう。

表9 本事故当日の搭載重量及びバラスト水の搭載重量

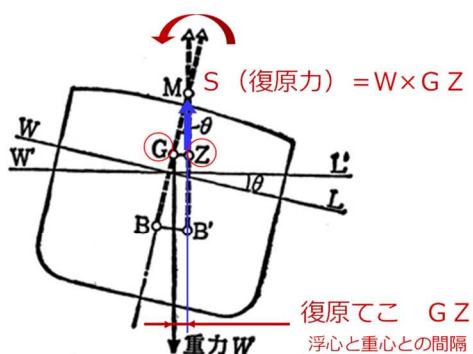
積載物	重量 (t)	比重又は密度	バラスト水タンク (BWT)	重量 (t)
鋼スクラップ (1番貨物倉)	1,348.9	1.000 (かさ比重)	1番BWT 左舷	0.0
			右舷	1.6
鋼スクラップ (2番貨物倉)	1,696.1		2番BWT 左舷	10.7
			右舷	0.0
A重油	17.9	0.880	3番BWT 左舷	3.0
C重油	61.9	0.980	右舷	9.2
潤滑油	2.6	0.860	4番BWT 左舷	0.1
清水	67.0	1.000	右舷	0.2
バラスト水	24.8	1.025	計	24.8
不明重量	100.0			
計	3319.2	-		

表10 本事故当日の船体コンディション及び復原力曲線 (初期状態)

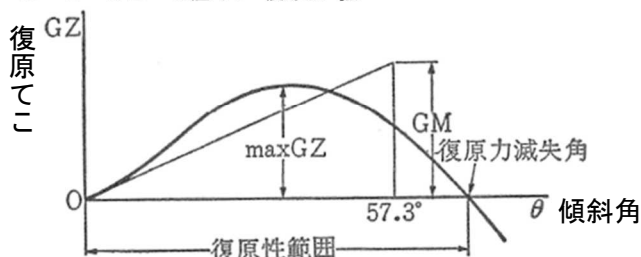
KG_L m	4.49	4.82
船首喫水 df m	5.30	
船尾喫水 da m	5.80	
平均喫水 dm m	5.55	
排水量W t	4424.8	
重心高さG m	3.877	3.960
メタセンタ高さ*10 GoM m	GM1 1.44	GM2 1.35
横傾斜角 °	0	



*10 「メタセンタ高さ」とは、船体重心（重心高さ）Gと船舶が傾斜したときの浮力中心を通る浮力作用線と船体中心線との交点であるメタセンタMとの距離（GM）をいい、本件解析では、自由水影響を考慮したメタセンタ高さ（GoM）を表している。



G : 重心 B : 浮心 θ : 傾斜角rad W : 重力 (船の重さ=排水量 t)
M : メタセンタ (直立時と傾斜時の浮力の作用線の交点)
GZ : 偶力にて、復原てこ m
S : 船の傾斜時の重力と浮力が作る偶力 t-m
 $S = W \cdot GZ$ S値 大=復原力 強



GZは、船の傾斜角θの関数であり、その変化の状態を表したGZ-θ曲線を復原力曲線といい、復原力の判定にもちいる。GZは、傾斜が増すにつれて次第に大きくなり、最大値に達した後、次第に小さくなって0（ゼロ）となる。

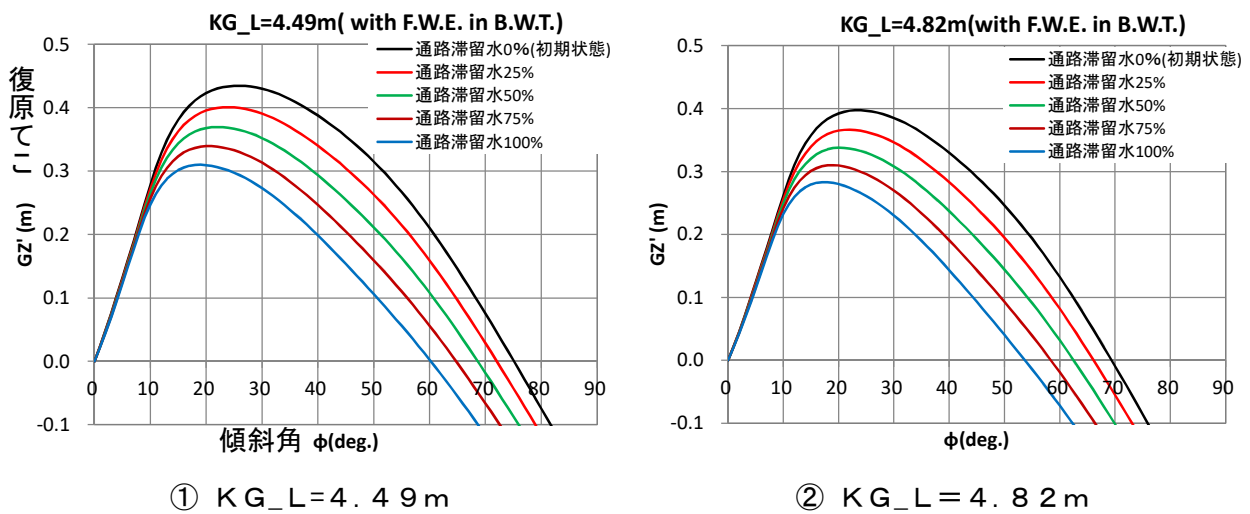
※参考 「航海造船学 二訂版」野原威男、庄司邦昭、海文堂発行より抜粋

2.11.3 沈没に至る状況の推定

本件解析では、本船の上甲板に海水が打ち込んで本件滞留水が生じ、貨物倉に浸水した経過を踏まえ、風及び波を受けて横傾斜モーメントが発生した場合の残存復原力を解析した。本件滞留水の量は、一般配置図から上甲板両舷通路の容積を推定し、船尾トリムを考慮して算出したものを、貨物倉への浸水の影響は、貨物倉にスクラップを積載していたものの、貨物倉内における自由水の影響を考慮したものを解析に用いた。

(1) 本件滞留水の影響

本件滞留水が上甲板両舷通路にあった場合の復原力曲線等の解析結果は、図14のとおりである。本件滞留水によって重心が上昇し、メタセンタ高さや復原力が低下している。ただし、本船の復原力は、本件滞留水の影響が大きいとは言えず、本件滞留水の割合が100%満水状態であってもメタセンタ高さが初期状態（GM1 = 1.44 m、GM2 = 1.35 m）から約7%低下（GM1 = 1.34 m、GM2 = 1.25 m）する程度で、海水が上甲板両舷通路に打ち込んで滞留するだけでは十分な残存復原力があつたと推定される。



状態	GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ トリム (m)	本件滞留水割合
初期状態	1.44	1.35	5.80	5.30	5.55	0.50	0%
想定状態1	1.42	1.33	5.88	5.34	5.61	0.54	25%
想定状態2	1.39	1.31	5.91	5.41	5.66	0.50	50%
想定状態3	1.37	1.28	5.95	5.49	5.72	0.45	75%
想定状態4	1.34	1.25	5.98	5.57	5.78	0.41	100%

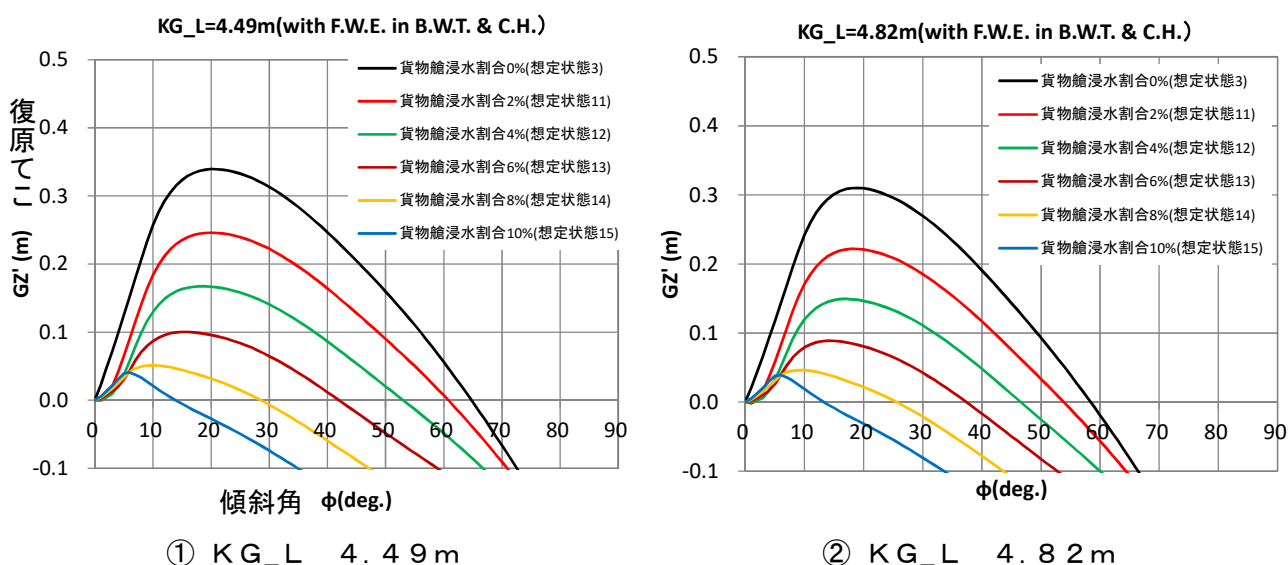
図14 復原力曲線（本件滞留水の影響）

(2) 貨物倉への浸水の影響

本船は、本事故当時、本件滞留水に加えて貨物倉にも浸水したと想定し、貨物倉の容量に対して浸水割合が2%（浸水重量40.8t）～10%（203.8t）の浸水があったとして解析を行った復原力曲線等が図15のとおりである。なお、本件滞留水には、本事故当時の横揺れや船体傾斜に伴い、舷外への流出（傾斜舷側）があったことを考慮し、本件滞留水割合75%の状態を解析に引用した。

貨物倉に浸水すると復原力GZのピークが格段に低下し、復原性が全体に悪化して残存復原力が低下する。例えば、KG_L=4.82mの場合、貨物倉容積の10%の浸水量があると、傾斜角約14°でGZがほぼゼロとなり、復原力が失われて容易に横転する状態となっている。

貨物倉への浸水を想定した場合、大きな自由水影響によりメタセンタ高さは貨物倉の浸水がない場合に比べ大幅に減少する。例えば、想定条件11（KG_L=4.49mの場合、貨物倉浸水割合2%）では、メタセンタ高さ（GM1）は0.07mとなり、貨物倉への浸水がなかった想定状態3のメタセンタ高さ（1.37m）の5%程度となる。



状態	W (t)	GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)	本件滞留水割合+貨物倉浸水割合
想定状態3	4582.1	1.37	1.28	5.95	5.49	5.72	0.45	75% + 0%
想定状態11	4669.5	0.07	0.00	6.01	5.62	5.82	0.39	75% + 2%
想定状態12	4756.8	0.16	0.10	6.06	5.76	5.91	0.30	75% + 4%
想定状態13	4844.2	0.24	0.20	6.11	5.91	6.01	0.20	75% + 6%
想定状態14	4831.5	0.33	0.30	6.16	6.05	6.11	0.10	75% + 8%
想定条件15	5018.9	0.40	0.39	6.20	6.20	6.20	0.01	75% + 10%

※想定状態4～10の解析結果は省略

図15 復原力曲線と船体の状態（貨物倉への浸水の影響）

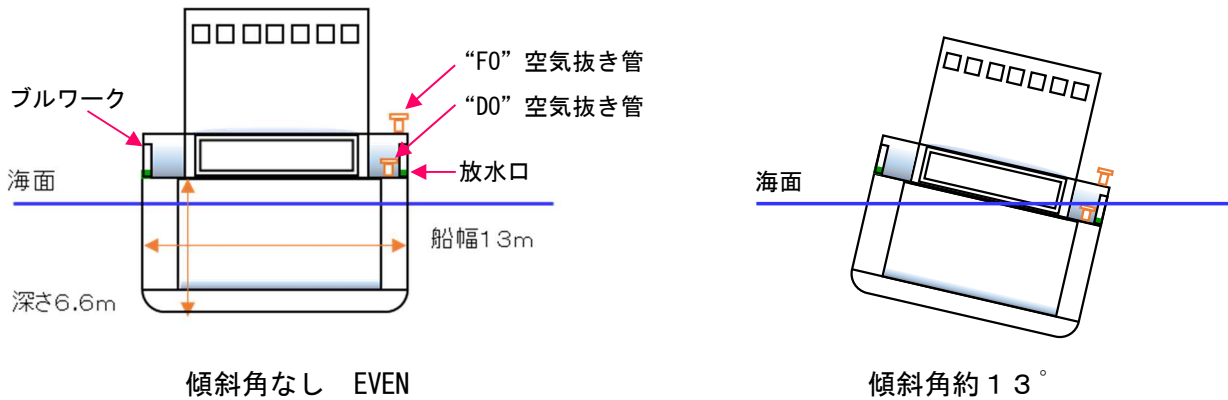
(3) 船体の傾斜角と燃料油タンク空気抜き管等の状況

本船は、図15の下表に示す船体コンディションにおいて、船体傾斜が生じたとき、ブルワークの放水口及び頂部並びに燃料油タンク空気抜き管のある上甲板及び船尾楼甲板が水没する傾斜角が表11のとおりであった。

貨物倉の浸水量が増加するに従い没水角は小さくなり、貨物倉の浸水割合が8%の場合（想定状態14）は、放水口の没水角は5.1°、ブルワーク頂部の没水角は12.6°、船首楼甲板左舷の没水角は26.6°となり、貨物倉への浸水がない状態（想定状態3）に比べ没水角が3°程度小さくなっている。

表11 船体各所が水没する傾斜角（°）（抜粋）

状態（平均喫水）	ブルワーク		船尾楼甲板左舷
	放水口	頂部	
想定状態3（5.72m） 本件滞留水割合75%	7.8°	15.5°	29.6°
想定状態11（5.82m） 本件滞留水割合75%+貨物倉浸水割合2%	7.0°	14.7°	28.8°
想定状態14（6.05m） 本件滞留水割合75%+貨物倉浸水割合8%	5.1°	12.6°	26.6°



(4) 風による横傾斜モーメント及び傾斜角

2.9に記載した本船の船体動揺は、本件台風によって増勢した風及び波の影響を受けて発生したものであるが、ここで図15の下表に示す本件滞留水割合75%の状態の船体コンディションにおいて、表12のとおり風速、風向及び船首方位を変化させ、船体に作用した風による横傾斜モーメント及び傾斜角を解析した。

風による横傾斜モーメント K_A は、先行研究における喫水線上の船体形状

から藤原の式^{*11}に基づき推定し、推定した風による横傾斜モーメントと排水量W及びメタセンタ高さGMから傾斜角 ϕ_{wind} を求めた。なお、速力を0としたので、相対風速は風速と同一である。

表12 解析条件 船体コンディション、風向、風速及び船首方位

・船体コンディション 本件滞留水の割合：75% 総トン数、GM1、GM2、喫水：図14の下表のとおり ・風向、風速及び船首方位					
風速 (m/s)	風向 (°)	船首方位 (°)	速力 (kn)	相対風速 (m/s)	相対風向 (°)
30.0	202.5 南南西	225.0 南西	0	30.0	22.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	
30.0		270.0 西		30.0	67.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	

① 風による横傾斜モーメント K_A

風による横傾斜モーメント K_A の推定結果は、想定状態11、12及び14の場合を表13のとおり示す。

C_K は風による傾斜モーメント係数であり藤原の式を基に推定し、表中の D_w は傾斜モーメントから算出した傾斜偶力てこ($D_w=K_A/W$)である。

想定状態3、11、12及び14の復原力と風による傾斜偶力てこは、図16のとおりであり、図中の記号「DW(225, 30)」という表記は、船首方位225°、風速30m/sの場合の傾斜偶力てこを示している。

前述したように貨物倉への浸水が増加するに従い、復原力GZも傾斜偶力てこ D_w も減少するが、復原力の減少の方がより顕著である。そのため、図16において実線で示した復原力曲線GZの横軸に平行な傾斜偶力てこ D_w より上方の部分に対応する残存復原力は、貨物倉への浸水が増加するに伴い大きく減少している。

貨物倉浸水割合8%の状態(想定状態14)では、船首方位270°で風速40m/sの場合(傾斜偶力てこ：緑一点鎖線)、軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の状態(黒実線)であっても、有効な復原力がほとんどなくなっている。

(図16 参照)

^{*11} 藤原敏文、上野道雄、池田良穂：成分分離型モデルと利用した新しい風圧力推定法，日本船舶海洋工学会論文集，Vol.2，pp.243-255、平成17年10月

表 1 3 風による横傾斜モーメントの推定 (貨物倉への浸水状態)

風速 m/s	風向 °	船首 方位 °	想定状態 1 1 本件滞留水割合 7 5 % + 貨物倉浸水割合 2 %			想定状態 1 2 本件滞留水割合 7 5 % + 貨物倉浸水割合 4 %			想定状態 1 4 本件滞留水割合 7 5 % + 貨物倉浸水割合 8 %		
			C_K	K_A tf*m	D_w m	C_K	K_A tf*m	D_w m	C_K	K_A tf*m	D_w m
30.0	202.5	225.0 南西	0.763	51.32	0.011	0.774	49.42	0.010	0.796	45.53	0.009
35.0				69.85	0.015		67.26	0.014		61.97	0.012
40.0				91.23	0.020		87.86	0.018		80.94	0.016
30.0	南南西	270.0 西	1.946	130.98	0.028	1.987	126.94	0.027	2.072	118.55	0.024
35.0				178.27	0.038		172.78	0.036		161.37	0.033
40.0				232.85	0.050		225.68	0.047		210.76	0.043

※想定条件 3 (本件滞留水割合 7 5 % 貨物倉に浸水なし) のデータは省略

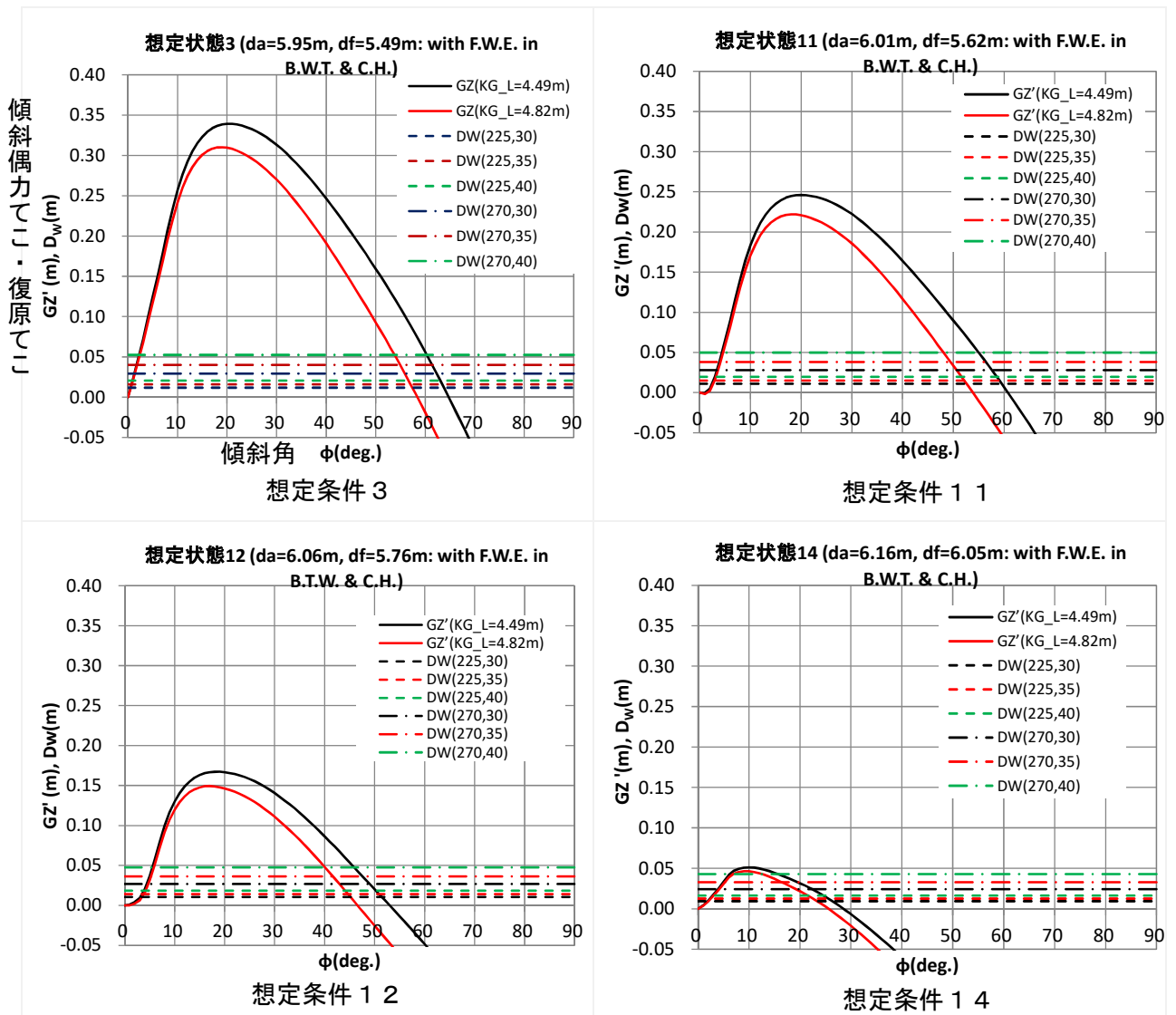


図 1 6 復原力と風による傾斜偶力てこ

② 風による傾斜角 ϕ_{wind}

風による傾斜角の推定結果は、想定状態 3 と想定状態 11～15 の場合を表 14 に、貨物倉の浸水状況と風による傾斜角の状況を図 17 に示す。表中の塗りつぶした箇所は、風による傾斜角が、ブルワークの放水口が水没する傾斜角を超えた状態を表す。

相対風向が横風に近くなる船首方位 270° の場合の風による横傾斜角は、船首方位が 225.5° の場合の $1.4 \sim 2.5$ 倍程度大きくなり、風による横傾斜角が 5° 以上となるのは、船首方位が 270° で貨物倉への浸水割合が 4% 以上となる状態に限られる。

また、滞留水量は、ブルワークの放水口が没水すると本件滞留水の排水が妨げられるので、解析を行った状況（滞留水割合 75% ）より増加すると考えられる。

表 14 風による傾斜角の推定（本件滞留水割合 75% + 貨物倉への浸水）

船首方位 $^\circ$	KG_L = 4.49 m						KG_L = 4.82 m					
	225.0			270.0			225.0			270.0		
風速 m/s	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
想定条件 3	0.5	0.7	0.9	1.3	1.7	2.2	0.6	0.8	1.0	1.4	1.9	2.4
想定条件 11	2.4	2.7	3.0	3.4	3.9	4.4	2.6	2.9	3.2	3.6	4.1	4.6
想定条件 12	3.1	3.4	3.8	4.4	5.0	5.5	3.4	3.8	4.1	4.7	5.2	5.8
想定条件 13	2.4	3.1	3.7	4.6	5.3	6.1	2.8	3.5	4.1	4.9	5.6	6.4
想定条件 14	1.9	2.3	2.9	3.9	4.9	6.2	2.0	2.5	3.1	4.1	5.2	6.9
想定条件 15	1.4	1.9	2.3	3.2	4.1	6.0	1.5	1.9	2.4	3.2	4.2	—

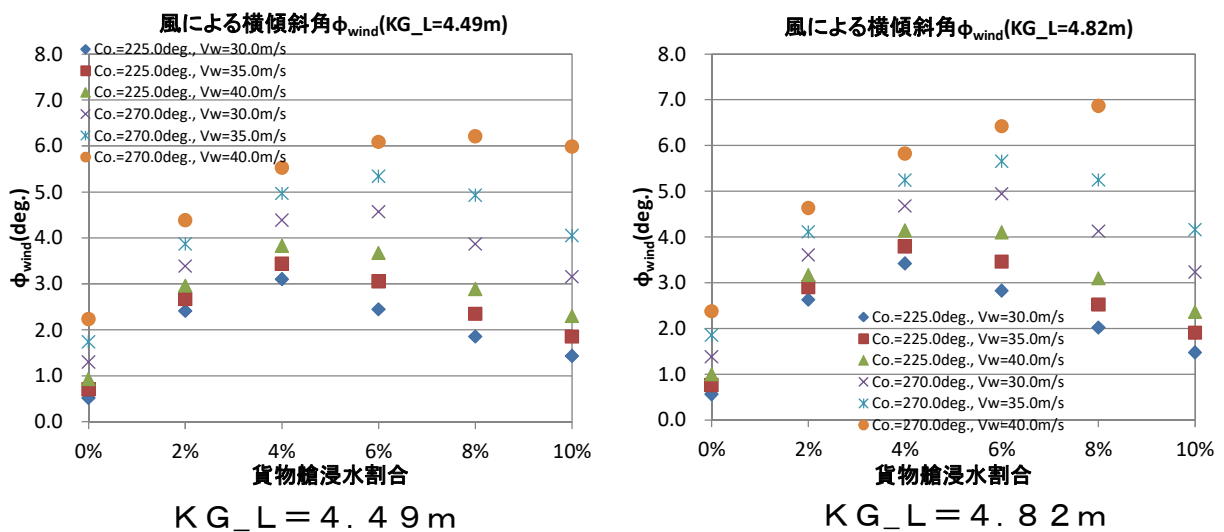


図 17 貨物倉への浸水状況と風による傾斜角

2.11.4 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況

(1) 事故シナリオの想定

本事故の発生状況は、風による傾斜偶力を考慮した残存復原力から事故発生時の船体傾斜の進展状況を検討し、右舷側に大傾斜して横転する状況について考察すると、次の事故シナリオが想定される。

- a 本船は、上甲板両舷通路に平均75%の割合で滞留水が発生した状態で波を受けて10°～20°の横揺れをしていた。
- b 21時30分ごろ、船首方位の変化に伴い、平均風速約30m/sの風により右舷側に約5°傾斜し、その角度を中心に10°～20°の横揺れをするようになった。
- c 21時34分ごろ、風上側（左舷側）に最大限横揺れした状態で突風（風速40m/s）を受けて、風下側（右舷側）に揺れ戻り始めた。
- d 右舷方への横傾斜角は、ブルワーク頂部の没水角を超え、本件滞留水が本船の周囲の海水（以下「船外水」という。）と同様となり、その前の状態よりも大きく、復原力が最大となる角度以上の約30°に達した。
- e 復原力曲線の傾きが負となる傾斜角で不安定な状態^{*12}となり、また、没水したブルワークが抵抗となって復原しにくい状況に陥ったので、引き続き受けた波の影響で横傾斜角が増し、横傾斜が平均風速の風による傾斜偶力^{てこ}を考慮した残存復原力消失角に対応する約45°に達して右舷方に横転した。

(2) 事故シナリオに基づく解析

事故シナリオに基づく解析は、事故シナリオに本事故発生時の具体的な数値を当てはめて行い、事故発生状況の検討を行った。

この解析では、軽荷状態の重心高さKG_L=4.82mの場合で、本件滞留水の割合が75%、貨物倉への浸水割合が8%の状態（以下「本件船体状態」という。）を例に取り上げて次のとおり行った。

① 復原力曲線

本船は、ブルワーク頂部が没水すると実質的には全ての船外水となると見なし、復原力が本件滞留水のない貨物倉のみに浸水した状態に遷移すると考えられる。

図18は、本件船体状態の復原力曲線であり、表11に示すとおり、ブルワークの上端没水角（ ϕ_B ）は12.6°である。本件滞留水が船外水と

^{*12} 渡辺恵弘：非対称横揺の不安定性に関する一考察、西部造船会々報、第34号、pp.59-71、昭和42年7月

なることを踏まえると、横傾斜角を ϕ とした場合、 $0 \leq \phi \leq \phi_B$ では想定状態14（本件滞留水割合75%）の復原力、 $\phi_B \leq \phi$ では‘本件滞留水の割合が0%で貨物倉への浸水割合が8%の状態’（以下「想定状態24」という、別添解析資料 参照）の復原力となる。

図18の赤点線は $0 \leq \phi \leq \phi_B$ における想定状態24の復原力曲線、緑点線は $\phi_B \leq \phi$ における想定状態14（本件滞留水割合75%）の復原力曲線を示している。

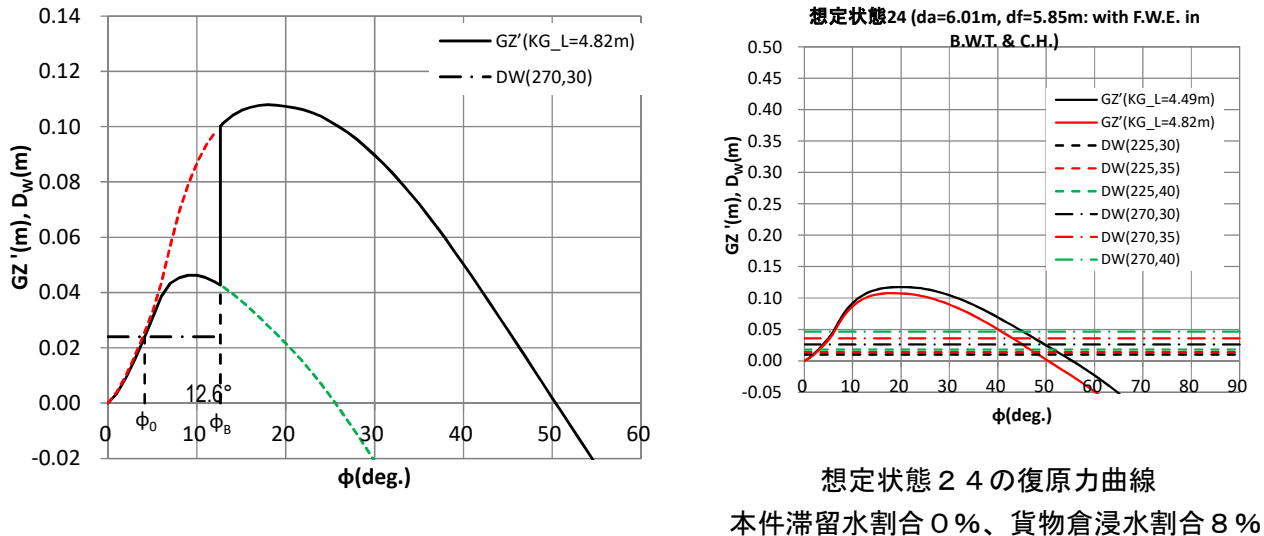


図18 事故発生時の復原力曲線及び風による傾斜偶力てこ

復原力曲線 想定状態14、想定状態24：KG_L=4.82m

風による傾斜偶力てこ 船首方位：270°、風速：30m/s；想定状態14

② 風による傾斜角と横揺れ振幅

表14に示した事故発生時の風による傾斜角の推定結果は、図18に示した復原力GZと風による傾斜偶力てこD_wが一致する ϕ_0 に対応する角度である。図19には、想定状態14で軽荷状態の重心高さKG_L=4.82mの場合の復原力GZ（実線）と船首方位270°及び風速30m/sの風による傾斜偶力てこDW(270,30)（一点鎖線）を示しているので、 ϕ_0 が表14に示すとおり4.1°の右舷方への傾斜を表している。

風により ϕ_0 だけ横傾斜（定常傾斜）した状態で波により横揺れする場合、復原力曲線の性状によっては、左舷方への横揺れと右舷方への横揺れで振幅が異なる非対称横揺れとなる。このような場合の横揺れ振幅は、船舶検査心得にある式^{*13}を用いて横揺れ中心を ϕ_0 として解析できる。

*13 運輸省海上技術安全局監修、船舶安全法関係規則研究会編：船舶検査心得準拠 船舶安全法関係規則解釈集、p.507、成山堂書店、平成12年2月

図19の ϕ_{lp} は左舷側の最大傾斜角、 ϕ_{ls} は右舷側の最大傾斜角、 ϕ_a は想定している波による横揺れ振幅である。

図18の状態です事故シナリオbのとおり、 ϕ_a として $10^\circ \sim 20^\circ$ の横揺れの中央値 15° を取り上げて解析を行うと、図19のとおり、左舷側の最大傾斜角 ϕ_{lp} は 11.1° 、右舷側の最大傾斜角 ϕ_{ls} は 18.9° となる。

ただし、横傾斜角がブルワーク上端没水角の 12.6° (ϕ_B)を超えた場合、復原力が本件滞留水のない貨物倉のみに浸水した状態(想定状態24)に遷移すると共に、風による傾斜偶力も想定状態24の傾斜偶力に遷移すると仮定している。

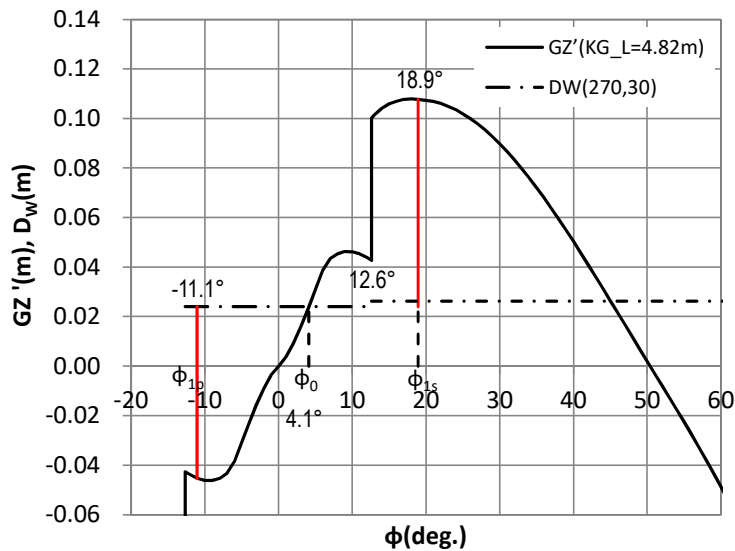


図19 定常傾斜状態の横揺れの計算

想定状態14、想定状態24：KG_L=4.82m、
横揺れ中心 ϕ_0 ：4.1度、波による横揺れ振幅： 15°

③ 右舷側への最大横傾斜角の計算

事故シナリオc及びdのとおり、波上側(左舷側)に最大限横揺れした状態($\phi = \phi_{lp}$)で突風(風速40m/s)を受け、風下側(右舷側)に揺れ戻ったときの右舷側への最大横傾斜角を ϕ_e とすると、 ϕ_e は、船舶復原性規則のC係数基準^{*14}と同様のエネルギーバランスの考え方にに基づき、図20を使用して求めることができる。

*14 「船舶復原性規則のC係数基準」とは、復原性能を判定する手法のことで、船舶が標準の定常風を横方向から受け、かつ、横波によって横揺れし、風上に最も傾斜した際に突風を受けた状況で傾斜エネルギーと動復原力の比較を行なうものをいう。

船首方位 270° で風速 40m/s の風による傾斜偶力 $D_w(270, 40)$ を突風による傾斜偶力 D_{wg} とすると、突風が準静的に作用した場合の横傾斜角 ϕ_2 は 6.9° (表 14) であり、左舷側への最大傾斜角として②で解析した値 ($\phi_{1p} = -11.1\text{deg.}$) を用いて更に解析を行うと、右舷側への最大傾斜角 ϕ_ℓ が 29.2° となる。なお、横傾斜角がブルワーク頂部没水角の 12.6° (ϕ_B) を超えた場合の復原力曲線の遷移は、前述と同様である。

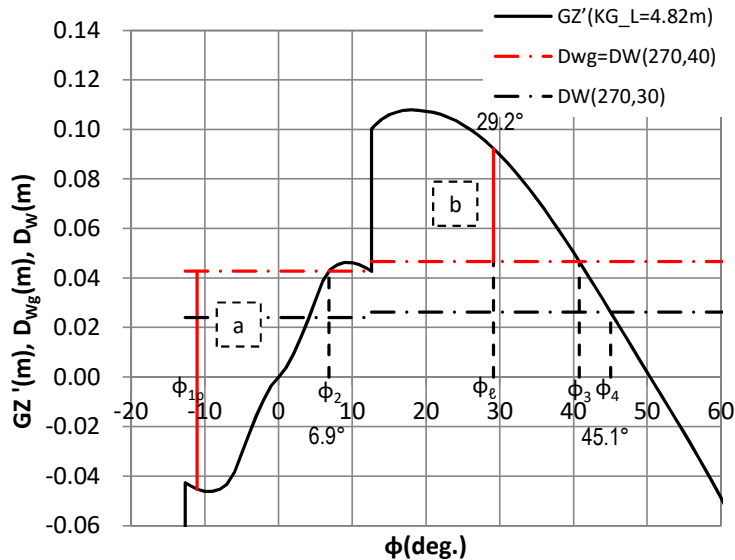


図 20 エネルギーバランスの計算

想定状態 14、想定状態 24 : $KG_L = 4.82\text{m}$ 、

船首方位 : 270° 、風速 : 40m/s 、左舷側最大横傾斜角 $\phi_{1p} : -11.1^\circ$

④ 右舷側への最大横傾斜角と復原力の最大値が生じる傾斜角の比較

③の解析の結果、本件船体状態及び船首方位が 270° の場合、平均風速 30m/s の風を受け、波により両振幅が 30° の横揺れしている状態で左舷側に最大限横揺れした状態において、風速 40m/s の突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角は 29.2° となる。

一方、図 20 に示すとおり、この状態での復原力の最大値が生じる傾斜角は約 18° であり、右舷側への最大傾斜角 29.2° では復原力曲線の傾斜が負となる。そのため、本船は、突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角では不安定な状態となり、また、没水したブルワークが抵抗となって復原しにくい状況に陥るので、事故シナリオ e のとおり、引き続き受ける波の影響で横傾斜角が増すことが想定される。

その結果、図 20 に示した状態で平均風速 30m/s の風を受けた場合の

残存復原力消失角は、 ϕ_4 に対応し、 45.1° となる。

(3) 事故シナリオに基づく解析のまとめ

軽荷状態の重心高さ2通り（4.49m及び4.82m）、貨物倉への浸水割合6通り（0～10%、2%刻み）、船首方位 270° の組合せで前述した2.11.4(2)①～③の解析を行った結果は、表15、16に示すとおりである。それぞれの表において、突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角が、復原力の最大値が生じる傾斜角を超える状態のセルを塗りつぶして表示している。

表15 エネルギーバランス計算結果（KG_L=4.49m、船首方位 270° ）

貨物倉の 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_l (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (deg.)	b (deg.)	c (deg.)
0%	1.3	-13.7	2.2	15.5	18.3	25.5	71.3	73.0	3.11	17.00	5.47
2%	3.4	-13.4	4.4	14.7	19.0	26.0	69.6	71.6	2.27	12.26	5.41
4%	4.4	-13.1	5.5	14.0	20.1	25.5	65.9	68.2	1.74	8.10	4.65
6%	4.6	-12.5	6.1	13.3	22.0	23.5	58.6	61.9	1.34	4.45	3.31
8%	3.9	-11.4	6.2	12.6	26.8	20.5	45.2	49.7	1.01	1.69	1.67
10%	3.2	-8.2	6.0	11.9	-	11.0	27.2	33.2	0.66	0.14	0.22

表16 エネルギーバランス計算結果（KG_L=4.82m、船首方位 270° ）

貨物倉の 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_l (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (deg.)	b (deg.)	c (deg.)
0%	1.4	-13.6	2.4	15.5	18.5	23.5	65.5	67.2	2.94	13.75	4.68
2%	3.6	-13.3	4.6	14.7	19.4	24.0	63.6	65.7	2.13	9.65	4.52
4%	4.7	-12.9	5.8	14.0	20.7	23.5	59.7	62.3	1.64	6.21	3.79
6%	4.9	-12.3	6.4	13.3	22.9	22.0	52.1	55.8	1.27	3.33	2.63
8%	4.1	-11.1	6.9	12.6	29.2	18.0	40.8	45.1	0.96	1.24	1.30
10%	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

これらの表の結果から、本件解析を行った範囲では、次の結果を得ることができた。

- ① 突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角が復原力の最大値が生じる傾斜角を超えるのは、貨物倉への浸水割合が6%以上となる状態に限られること。
- ② そのうち、(1)に示す想定した事故シナリオに対応する残存復原力消失角が 45° 程度となるのは、貨物倉への浸水割合が8%であること。

- ③ 船首方位 270° 及び貨物倉への浸水割合が 10% の状態では、本船は、左舷側に最大限横揺れした状態で一気に横転する($KG_L = 4.49\text{ m}$ 、表15)、又は突風が単独で作用した場合に釣り合い状態がなく横転する($KG_L = 4.82\text{ m}$ 、表16)こと。

2.11.5 沈没に至る状況に関するまとめ

本件解析による沈没に至る状況は、本件解析の結果から次のとおりであった。

- (1) 2.11.3(1)によれば、本船は、本事故当時、上甲板に打ち込んだ海水が本件滞留水となり、復原力が低下するものの、その影響が大きいものでなく、船体が $10^\circ \sim 20^\circ$ 程度の横揺れする傾斜角では復原力が確保できていた。
- (2) 2.11.3(2)によれば、本件滞留水が貨物倉に浸水したことを想定した場合、復原力が大きく低下し、本件滞留水よりも影響が大きかった。

本船は、図15に示すとおり、貨物倉容積の 8% の浸水があった場合、復原力のピークがある傾斜角の約 10° を超えると波によって横転しやすい状況となり、傾斜角が $25.5^\circ \sim 28.5^\circ$ ともなれば復原力がほぼゼロとなり、本件台風による突風を受けたような場合、僅かなモーメントが作用することで横転が避けられない状態となった。

- (3) 本船は、本件滞留水割合 75% の場合、約 7.8° の横傾斜でブルワークの放水口が、約 15.5° の横傾斜でブルワークの頂部が海面に水没することとなり、ブルワークの放水口が水没すると本件滞留水の排水が妨げられ、頂部が水没すると船体が復原しにくい状態となる。

また、ブルワークは、貨物倉に浸水がある場合、更に小さい傾斜角で水没することとなる。

- (4) 2.11.3(4)①によれば、風による横傾斜モーメントは、風速が大きくなるほど増加し、貨物倉への浸水量が増加するほど復原力が低下する。図16において、想定条件11及び12において風速 30 m/s の風を受けた場合、まだ復原力が確保されているものの、想定条件14(本件滞留水割合 $75\% +$ 貨物倉浸水割合 8%)で同じ風速の風を受けた場合、復原性範囲が、傾斜偶力てこ $DW(270, 30)$ の線上において、 $KG_L = 4.49\text{ m}$ では約 19° 、 $KG_L = 4.82\text{ m}$ では約 15° となり、これらの範囲を超えると僅かなモーメントが作用することで横転が避けられない状態となる。

また、想定状態15(本件滞留水割合 $75\% +$ 貨物倉浸水割合 10%)では、船首方位 270° の場合、復原力曲線が風による傾斜偶力てこ D_w の下に位置して復原力が不安定な状態となっており、風速 40 m/s の風を受けるといつでも転覆する状態となっている。

2.11.3(4)②によれば、風による傾斜角は、貨物倉への浸水量が多くなるほど影響を受けて傾斜角が大きくなる。本船は、本事故時、想定条件11～13において、船首方位が西方約270°を向き、風向が南南西、風速が約30m/sの風を左舷側から受けていたことを想定した場合、傾斜角がKG_L4.49mでは3.4°～4.6°、KG_L4.82mでは3.6°～4.9°の右舷方に傾斜する状態となっていた。

また、本船は、想定条件13～15の状態でも最大瞬間風速40m/sを超える強風を左舷側から受けたとき、傾斜角が6°を超えるようになり、ブルワークの放水口が没水する状態となっていた。

- (5) 2.11.4では、2.1.3及び2.8にある本事故の状況から事故シナリオを示し、解析を行った結果、本船が、本事故時、右舷方に傾斜し、その後右舷傾斜が大きくなって横転するまでの過程を推定することができた。

2.1.2 被害の軽減に関する情報

船長、機関長、航海士A及び操機手A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) 救助された乗組員の服装及び救命胴衣の着用

- ① 船長は、半袖シャツ及び長ズボンで、救命胴衣を着用していなかった。
- ② 機関長は、海に飛び込む前、身に付けていた衣服を脱ぎ、泳ぎやすい半袖シャツ及び半ズボンとなって救命胴衣を着用していた。
- ③ 航海士Aは、作業用の長袖シャツ及び長ズボンで救命胴衣を着用していた。
- ④ 操機手Aは、長袖シャツ及び長ズボンで救命胴衣を着用していた。

(2) 海上で救助を待つ間の行動

- ① 船長は、海軍に在籍していたとき潜水ダイバーの職務に就き、泳ぐことが苦手ではなく、海上における生存技術に関する知識を有していた。

船長及び操機手Aは、本事故後、救命浮環を腕で抱え込んで、離れないように海上を漂流し、泳がず体力を消耗しないように努め、大きな波を受けたとき、その都度息を止め、海水が口に入ったら呼吸器官に吸い込まず胃に飲み込むようにした。

船長は、必ず生きるという強い意志を持ち続け、操機手Aが足の痛みや疲れを申し出たときに身体を抱えて励まし、救助に来た搭載艇に発見されたとき、救命胴衣灯を点灯して知らせた。

- ② 機関長は、適宜泳いで救助を待ち、巡視艇が見えてからその方向に泳いだ。
- ③ 航海士Aは、泳がず体力を消耗しないように努め、必ず生きるという強い意志を持ち続け、搭載艇が見えてからその方向に泳いだ。

(3) 乗組員の退船状況

船長及び乗組員は、本事故時、イマーシヨンスーツを着用しておらず、海上保安庁等の捜索によって、船内から揚収された乗組員のうち、3人が救命胴衣を着用していなかった。（表17参照）

航海士Aは、総員退船部署が発令された際、マスターステーションに集合せず、担当する携行品の双方向無線電話（非常時に通信を行う無線電話機）を持ち出さなかった。

表17 死亡した乗組員が発見された状況

	人数	救命胴衣の着用
海上で発見された乗組員	3人 甲板長、操機手B、操機手C	着用 3人
船内で発見された乗組員	5人 航海士B、機関士、甲板手、甲板員、司厨長	着用 1人 未着用 3人 確認不可 1人

2.13 油の流出による環境への影響及びその防除に関する情報

神奈川県庁及び千葉県庁の港湾及び漁業の担当者の口述、国土交通省関東地方整備局、九州地方整備局、横須賀市港湾局及びC社と契約していた保険会社（以下「D社」という。）の回答書、並びに海上保安庁の情報によれば、本船は、本事故後、搭載していた燃料油等が本事故現場付近で流出し、海上保安庁等による流出油防除措置が実施された。

2.13.1 油の流出による環境への影響

本船から流出した浮流油は、10月13日18時30分ごろ、東京湾中央付近のほか千葉県木更津市沿岸及び横須賀沖で確認された。

(1) 海上保安庁

海上保安庁をはじめ、本船関係者（サーベイヤー等）、関係行政機関、漁業協同組合等の関係者は、10月18日、本船の沈没海難に係る連絡調整会議を開催し、事案の概要、対応状況等について情報共有を図り、以後の油防除作業等について役割を確認した。

なお、10月18日06時35分ごろの流出油の状況は次のとおりであった。

- ① 京浜港東扇島南東沖で油の湧出点があり、浮流油が長さ約1,700m、幅約20mのすじ状となっていたこと
- ② 横須賀市の米軍基地施設の岸壁及び海岸に面した公園3か所で漂着油及

び漂着ゴミに油の付着

③ 千葉県富津市富津海岸で漂着ゴミに油の付着

(2) 神奈川県

県内の漁業関連の油汚染状況は、11月14日現在、横須賀市走水海岸でワカメ養殖施設の一部及び海苔養殖施設の海苔網、ロープ等に、三浦市金田湾でワカメの養殖筏に、それぞれ油の付着が確認されたものの、水産物への直接被害がなかった。

(3) 千葉県

県内の漁業関連の油汚染状況は、11月13日現在、富津海岸付近で海苔養殖施設の枠及び浮きに油の付着があり、海苔網を設置する時期が延期され、アサリ等が生息する砂浜に油が付着したゴミの漂着が確認されたものの、水産物への直接被害がなかった。

(付表1 事故発生場所付近における油汚染の状況、付表3 流出した油による汚染状況(横須賀市横須賀港) 参照)

2.13.2 油流出の防除

(1) 燃料油タンク等からの油止め

海上保安庁は、10月14日、15日、潜水士が燃料油、潤滑油、ビルジのタンクの空気抜き管等からの流出油を防ぐ応急措置を行い、別のサルベージ会社は、10月17日、潜水ダイバーが同空気抜き管及び潤滑油の搭載口をビニール等で包んで閉塞する流出油防止処置を行った。

この処置以降、本船から継続していた湧出油は、燃料油タンク等からではなく、機関室の残存油ではないかとみられた。

(2) 流出油の回収及び拡散

① 東京湾中央付近等で浮流油が確認された後、巡視船艇、地方整備局所属船及びD社が手配した作業船は、次の油防除作業を実施した。

a 海上保安庁

巡視船艇は、10月13日、油防除資材(オイルスキミングネット)を使用した油回収を行い、10月14～18日、放水拡散及び航走拡散を行った。

b 国土交通省関東地方整備局及び九州地方整備局

清掃兼油回収船は、10月13～18日、吸着マット等による油回収及び放水銃を使用した攪拌作業を、浚渫兼油回収船は、14日、福岡県北九州港を出港し、18日、ジェット噴射による流出油の拡散を行った。

(付表2 事故発生場所付近における油防除作業)

c 神奈川県及び千葉県

両県の港湾及び漁業の関係行政機関、漁業協同組合等は、海に面した公園施設及び海岸付近の浮遊油を油吸着材で除去し、油が付着した漂着ゴミを回収した。（付表3 流出した油による汚染状況（横須賀市横須賀港））

- ② A社は、11月29日から12月9日の間、本船の燃料油タンク等からの油抜き作業を行い、同作業完了後、大量の油流出のおそれなくなった。

3 分析

3.1 事故発生の状況

3.1.1 事故発生に至る経過

2.1.3、2.6.2、2.6.3、2.6.5、2.8及び2.9から、本船は、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) K1錨地に錨泊中、10月12日19時00分ごろ、船長が、乗組員をスタンバイ配置につけ、本件台風が接近して増勢した風及び波によって横揺れ及び縦揺れをする状況下、舵及び主機を使用して操船指揮を行い、船首を風及び波が来る方向に向けるように船体の姿勢制御を行った。
- (2) 20時00分ごろ、(1)よりも強い風及び波を受け、横揺れが大きくなった。
- (3) 21時00分ごろ南南西方から(2)よりも強い風及び波を受け、21時23分ごろ、突然2号発電機原動機が停止して船内電源を喪失し、操舵不能となって東南東の方向に圧流され、船長が主機のみを使用して船体の姿勢制御を行った。
- (4) 機関長及び機関士が、1号発電機を始動して船内電源を復旧したものの、発電機原動機の停止が3回続き、その後船内電源を復旧した。
- (5) 21時30分ごろ、南西方からの風及び波を左舷船首に受けて船体が振れ回り、北西の方向に圧流され、その後、右舷傾斜して右舷方に横転し、沈没した。

3.1.2 沈没の状況

2.1.3及び2.9から、本船は、本事故当時、上甲板に打ち込んだ海水が本件滞留水となって貨物倉に浸水が始まった状態で、10°から20°の横揺れ及び縦揺

れをしており、21時34分ごろ左舷船首方から風及び波を受けて右舷方に約5°傾き、その角度を中心に横揺れをするようになって約20°まで傾斜し、次第に右舷傾斜が大きくなって復原せず、更に約30°まで傾斜してそのまま横転し、船内に浸水が進み、沈没したものと考えられる。

3.1.3 事故発生日時及び場所

2.1及び2.3から、本事故の発生日時は、令和元年10月12日21時39分ごろであり、発生場所は、川崎東扇島防波堤東灯台から137°1.0M付近であったものと推定される。

3.1.4 死傷者の状況

2.1.3及び2.2から、航海士B、機関士、甲板長、甲板手、甲板員、操機手B、操機手C及び司厨長は溺水により死亡したものと推定される。

3.1.5 損傷の状況

2.3から、本船は、沈没し、左舷側が上となって右舷方に傾斜した状態で着底したものと推定される。

3.2 事故要因の解析

3.2.1 乗組員の状況

2.4から、次のとおりであった。

(1) 船長

適法で有効な海技免状を有していた。船長は、本船で初めて船長職をとったものの、過去の航海士としての乗船経験及び荒天時の操船に関する経験により、甲板部乗組員にその技量を認められていたものと考えられる。

健康状態は良好であったものと考えられる。

(2) 機関長

適法で有効な海技免状を有していた。

健康状態は良好であったものと考えられる。

(3) 航海士A

適法で有効な海技免状を有していた。

健康状態は良好であったものと考えられる。

(4) 操機手A

適法で有効な資格を有していた。

健康状態は良好であったものと考えられる。

- (5) (1)～(4)を除く乗組員
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

2.1.3、2.5.2、2.5.3、2.10、2.11.3及び2.11.5から、本船は、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 船体、機関及び機器類に通常運航上の不具合又は故障がなかったものの、貨物倉ハッチカバーのパネルの変形及びドレン受けの腐食による破口があったことから、ハッチカバー自体の風雨密が保持されていなかった。なお、本事故時、遭難通信は発信されなかった。
- (2) 京浜港で鋼スクラップを積載し、K1錨地で補油を行い、喫水が深くなって乾舷が約1mとなり、また、本件台風の接近により増勢した波が上甲板に打ち込み、本件滞留水が生じたことから、更に乾舷が小さくなった。
- (3) 貨物倉が次の状態であったことから、本件滞留水が生じた際、貨物倉内部に浸水し、一層乾舷が小さくなった。
 - ① 貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたこと。
 - ② 本件パネル間の接合部にあるドレン受けに破口が、本件パネルの約4分の1が変形してコーミングとの間に隙間があり、風雨密が保持されていなかったこと。
- (4) 機関部乗組員が、10月12日16時00分ごろ、本事故発生前に定常作業として、A重油タンクのドレン排出作業を行い、A重油に水の混入がないことを確認していたので、水が同時刻以降にA重油タンクに混入した。
- (5) 本事故当時、船体コンディションによって 13° ～ 16° を超える左舷方への横傾斜、又は約0.7m以上の高さの本件滞留水があったとき、A重油タンクの空気抜き管が水没し、海水が同タンクに浸入した可能性がある。
- (6) A重油タンク底部に溜まった水が、燃料と共に本件配管系統から発電機原動機に供給されたことから、同原動機がシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起こし、発電機が停止して船内電源を喪失した。

3.2.3 気象及び海象の状況

2.6及び2.9から、次のとおりであった。

- (1) 横浜市及び川崎市には、本事故当時、波浪警報、暴風警報及び大雨特別警報が発表され、継続されていたものと認められる。
- (2) 本船が錨泊していたK1錨地付近は、10月12日20時00分ごろから沈没するまでの間、天気は雨、風は平均風速 $18.0\sim 32.3\text{m/s}$ 、最大瞬

間風速約42.7m/sの南東から南南西の風が吹き、本事故前の21時00分ごろ、風が南から北へ吹く要素が最大で、東から西に変化する時期となっており、気温が約24℃で、水温が約24℃であり、視程が不良であったものと考えられる。

- (3) 波は、本事故当時、南南東から波高4.0～5.0m、周期約7秒であったものと考えられる。

3.2.4 安全管理に関する状況

2.1.3、2.5.2、2.5.3、2.7.2、2.7.3、2.9、3.1.1 及び 3.2.2 から、C社はSMMを定め、手順書を策定して運用をしていたものの、次のとおりであった。

(1) SMSにおける重大な操船の実施

① 船長は、SMSに基づき、本件台風接近に備えた荒天対策として、暴露甲板の開口部の閉鎖等が重要であることを認識しており、乗組員に指導をしていたものの、それらのことが本事故前に確実に行われず、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたものと考えられる。

② 本船は、C社からの指示どおり、京浜港で積み荷役を行った上で、補油を行い、乾舷が小さくなり、本事故当時、本件滞留水が発生したことから、船長が、更に乾舷が小さくなって復原力が減少した状況でSMSによる重大な操船を行わざるを得なかったものと考えられる。

(2) 貨物倉の風雨密

① C社担当者は、検船の際、貨物倉ハッチカバーが変形していたことを確認していたものの、ハッチカバー上をターポリンシートで覆って風雨密を保持することを認めており、また、このことがPSCにおいても一時的に認められていたことから、貨物倉が規則に基づく風雨密を保持していなかった可能性があると考えられる。

② C社は、管理船舶の保守整備、検査等を関連規則等に適合するように行うことをSMMに定めていたものの、①のとおりハッチカバーにターポリンシートの使用を認めていたことから、ハッチカバーの修理を行わなかった可能性があると考えられる。

3.2.5 船体の復原力、横転及び沈没に関する解析

2.1.3、2.5.3、2.6.2、2.6.3、2.8、2.9、2.11.2～2.11.5、3.1.1、3.1.2、3.2.2 及び 3.2.3 から、本船は、本事故当時、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 10月12日19時00分ごろ、東南東～南東の風及び波高2.0～3.0 mの波を受け、約5°の横揺れに加えて縦揺れを伴う状態で、船体の姿勢制御を行っていたものの、本件滞留水の排水がブルワークの放水口から追いつかない状態となり、貨物倉が3.2.2(3)の状態であったことから、貨物倉内部への浸水が始まった。

本船は、上甲板の本件滞留水のみであれば復原力が確保できていたものの、貨物倉に浸水が始まっていたことから、復原力が徐々に低下するようになった。

本件滞留水が上甲板両舷通路にある状態で、本件滞留水割合が75%及び乾舷が約0.9 mまで小さくなった場合、約8°の傾斜角でブルワークの放水口が、約16°の傾斜角でブルワークの頂部が海面に水没した状態となった。

ブルワークが水没する傾斜角は、本件滞留水及び貨物倉への浸水が多くなるほど小さくなり、放水口が水没すると本件滞留水の排水が妨げられ、頂部が水没すると船体が傾斜したときに復原しにくくなる。

- (2) 20時00分ごろ、風が(1)の状況よりも強くなり、波高3.0～4.0 mの波を受け、横揺れが10°～20°となり、波が、船首及び両舷から上甲板に激しく打ち込んで本件滞留水となるとともに、貨物倉ハッチカバー上を0.2～0.5 m程度覆い始め、この状況が本事故発生時刻まで続き、更に貨物倉へ浸水が進み、一層復原力が低下した。また、甲板上への波の打ち込みは、本船の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長された。

- (3) 21時00分ごろ、(2)の状況よりも強くなった南南西方から平均風速で約30 m/s、最大瞬間風速で40 m/s を超える風及び波高4.0～5.0 mの波の打ち込みを受けるようになり、21時23分ごろ操舵不能となって船体の姿勢制御が困難となり、東南東方に圧流される中で船首を風及び波に正対する操船が困難となり、左舷船首方から風及び波の打ち込みを受けた。

- (4) 21時34分ごろ、本件台風が通過した後の吹き返しによって風向が変わり始めた風及び一段と増勢した波を、左舷船首方から左舷側面に受けるようになって横傾斜モーメントが作用し、船体が右舷に約5°傾き、その角度を中心に横揺れをするようになって約20°まで右舷傾斜し、貨物倉への浸水が続き、一層右舷傾斜が大きくなって船体が復原せず、約30°まで右舷傾斜した。

このとき、水没したブルワークが抵抗となっていたことから、復原しにくい状況に陥り、引き続き、増勢した波高4.0～5.0 mの波を受けた。

- (5) 本件滞留水及び貨物倉への浸水によってメタセンタ高さGMが初期状態よりも小さくなるとともに、復原力が低下していたことから、約30°から45°まで右舷傾斜した後に横転し、貨物倉への浸水が進み、沈没した。
- (6) 本船は、左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになったのち、左舷側面に風及び波を受けて右舷方に傾斜し、その角度を中心に船体が動揺するようになり、台風による平均風速約30m/s、最大瞬間風速40m/sを超えるような強風及び激しい波を受けて右舷方への横傾斜が次第に大きくなったことから、復原力が最大となる角度(約30°)以上に達したのち、引き続く波の影響で横傾斜角が増加し、横傾斜が残存復原力消失角(約45°)に達して右舷方に横転することに至った。

3.2.6 事故発生に関する解析

2.1.3、2.5.2～2.5.4、2.6.1～2.6.3、2.7.2、2.8、2.9、2.10、2.11.2～2.11.5、3.1.1～3.1.3及び3.2.2～3.2.5から、次のとおりであったものと考えられる。

- (1) 本船は、夜間、K1錨地に錨泊中、本件台風が接近して増勢した風及び波を受けて横揺れ及び縦揺れをする状況下、10月12日19時00分ごろ、船長が、乗組員をスタンバイ配置につけ、舵及び主機を使用して操船を行い、船首を風及び波が来る方向に向けるよう船体の姿勢制御が行なわれた。

このとき、本船は、上甲板に打ち込んだ海水が、本件滞留水となって乾舷が小さくなるとともに、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたことから、貨物倉への浸水が始まった。

本船は、上甲板の本件滞留水のみであれば復原力が確保できていたものの、貨物倉に浸水し始めたことから、復原力が徐々に低下していた。

- (2) 本船は、20時00分ごろ、(1)よりも強い風及び波高3.0～4.0mの波を受け、船体が大きく横傾斜した際、ブルワークが水没するようになり、上甲板に打ち込んだ海水が本件滞留水となるとともに貨物倉ハッチカバーを覆い、ハッチカバーの風雨密が保持されていなかったことから、更に貨物倉への浸水が進み、一層復原力が低下した。また、甲板上への波の打ち込みは、本船の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長された。
- (3) 本船は、21時00分ごろ、(2)の状況よりも強くなった南南西方から平均風速30m/s、最大瞬間風速40m/sを超える風及び波高4.0～5.0mの波を受け、21時23分ごろ、発電機原動機が停止して船内電源を喪失し、操舵不能となり、船体の姿勢制御が困難な状態となったことで東南東方に圧

流される中で船首を風及び波に正対する操船が困難となり、左舷船首方から風及び波の打ち込みを受けるようになった。

- (4) 本船は、乗組員が船内電源を復旧したものの、船首を風及び波に向けることが困難で、21時34分ごろ、本件台風が通過した後の吹き返しによって風向が変わり始めた風及び一段と増勢した波を、左舷船首方から左舷側面に受けるようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、更に右舷傾斜が大きくなって右舷ブルワークが水没しており、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉への浸水が進んで沈没した。
- (5) 本船は、左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになったのち、左舷側面に風及び波を受けて右舷方に傾斜し、その角度を中心に船体が動揺するようになり、台風による強風及び激しい波を受けて右舷方への横傾斜が次第に大きくなったことから、復原力が最大となる角度以上に達し、引き続く波の影響で横傾斜角が増加して横傾斜が残存復原力消失角に達したため、右舷方に横転することに至った。
- (6) 本船は、荒天で船体動揺がある状況下、A重油タンクに混入した水が燃料と共に本件配管系統から発電機原動機に供給されたことから、同原動機がシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起こし、発電機が停止して船内電源を喪失した。

3.3 救助及び被害の軽減措置に関する解析

3.3.1 海上における生存技術の状況

2.1.3及び2.1.2から、生存した船長及び乗組員は、海上で漂流中、次の行動をとったものと考えられる。

- (1) 泳ぐことをせず、体力を消耗させないようにしたこと。
- (2) 海水が口に入ったとき、呼吸器官に吸い込まず胃に飲み込んだこと。
- (3) 救命浮環を腕で抱えることで顔が下に向き、波が直接顔に当たらなかったこと。
- (4) 生き残る強い意志を持ち、漂流した乗組員同士で相手を励ましたこと。
- (5) 救助者に発見された際、救命胴衣灯を効果的に使用して存在を知らせたこと。

3.3.2 総員退船に関する技能が実行できなかった状況

2.1.3及び2.1.2から、本事故発生時、次の状況があったものと考えられる。

- (1) 乗組員数人が船外に脱出せず、救命胴衣を着用していなかった。

- (2) 総員退船部署が発令されたにもかかわらず、マスターステーションに集合せず、携行品である双方向無線電話を持ち出さなかった。
- (3) 総員退船部署が発令された際、着衣を脱いで海に飛び込み、救助されるまでの間に低体温症となる可能性があった。

3.4 油の流出による環境への影響及びその防除に関する状況

2.1.3 及び 2.1.3 から、次のとおりであった。

- (1) 本船は、本事故発生後、油が流出し、浮流油が本事故発生場所付近に、油及び油が付着したゴミの漂着が神奈川県及び千葉県の海岸等にあり、前者は巡視船、巡視艇、清掃兼油回収船及び浚渫兼油回収船によって回収又は拡散され、後者は地方自治体によって回収されたものと推定される。
- (2) 本船は、海上保安庁等によって燃料油タンク等の空気抜き管の閉塞作業が行われ、流出油が限定的となり、後日、燃料油タンク等からの油抜き作業及び起重機船による本船の引揚げ作業が行われたことから、油の流出がなくなったものと認められる。

4 結 論

4.1 原因

本事故は、夜間、本船が、K1 錨地に錨泊中、本件台風が接近して増勢した風及び波を受けて船体が動揺する状況下、本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたため、操舵不能となったのちに左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉内への浸水が進んで沈没したことにより発生したものと考えられる。

本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたのは、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたこと、並びに貨物倉のハッチカバーにおいてドレン受けの破口及び変形があったことから、貨物倉の風雨密が保持されていなかったことによるものと考えられる。また、甲板上への波の打ち込みは、本船の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長されたものと考えられる。

本船が操舵不能となったのは、船体動揺によって上甲板上の空気抜き管からA重油タンクに混入した水が燃料油と共に本件配管系統から発電機原動機に供給されたことから、同原動機のシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起こし、発電機が停止して船内電源を喪失したことによるものと考えられる。

本船は、操舵不能となって左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになったのち、左舷側面に風及び波を受けて右舷方に傾斜し、その角度を中心に船体が動揺するようになり、本件台風による強風及び激しい波を受けて右舷方への横傾斜が次第に大きくなったことから、復原力が最大となる角度以上に達し、引き続く波の影響で横傾斜角が増加して横傾斜が残存復原力消失角に達したもので、右舷方に横転することに至ったものと考えられる。

4.2 その他判明した安全に関する事項

本船は、次の措置をとることで、同種事故の再発防止及び被害の軽減を図ることができた可能性があると考えられる。

- (1) 貨物をほぼ満載した状態で補油を行い、本件滞留水を生じたとき、乾舷が小さくなって海水が舷外に排水されにくくなっていたことから、貨物の積載量及び補油の時期を考慮すること。
- (2) 船体動揺によって燃料油タンクに混入した水が、本件配管系統から発電機原動機に供給されたことから、乗組員は、荒天時、定常作業に加えて適宜ドレン排出作業を行うこと。

また、海水が、燃料油タンクの空気抜き管から浸入したものと考えられることから、同空気抜き管を管頭金物又は水落とし管のような自動的に水の浸入を防ぐ配管構造とすることが望ましい。

- (3) 乗組員に対し、総員退船部署に備えた、携行品の持ち出し、船内から脱出する行動、救命胴衣及びイマーションスーツの着用、厚着等の海上における生存技術に関する再訓練を行うこと。

5 再発防止策

本事故は、夜間、本船が、K 1 錨地に錨泊中、本件台風が接近して増勢した風及び波を受けて船体が動揺する状況下、本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたため、操舵不能となったのちに左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉内への浸水が進んで沈没したことにより発生したものと考えられる。

したがって、同種事故の再発防止等を図るため、次の措置を講じることが必要である。

- (1) 船長は、荒天が予想される際、貨物倉通風筒の開口部蓋等の暴露甲板における開口部の閉鎖を乗組員に確実に実施させること。
- (2) 船長は、荒天時を含むいかなる状況でも十分な乾舷が維持できるよう、船体コンディションの調整を乗組員に実行させ、船舶管理会社に連絡をとって貨物積載量及び補油時期を調整すること。
- (3) 船長は、水が混入した燃料油が発電機原動機等の燃料油供給系統に入らないよう、燃料油タンクのドレン排出作業を、定常作業のみならず荒天時の船体動揺があるときにも行うよう乗組員に指導すること。
- (4) 船長は、非常時の総員退船に関して、携行品の持ち出し、船内から脱出する行動、救命胴衣及び適切な服装の着用並びに海上における生存技術に関する再訓練を乗組員に指導すること。
- (5) 船長は、自船に沈没等のおそれがある場合、速やかに海上保安庁等に通報する措置をとること。
- (6) 船舶管理会社又は船舶所有者は、管理船舶の貨物倉ハッチカバー自体が風雨密を保持するようドレン受けを含む保守整備を実施すること。また、燃料油タンクの空気抜き管から水が浸入しないよう、空気抜き配管に管頭金物又は水落とし配管を設置することが望ましい。

本事故の調査結果を踏まえ、同種事故の再発防止に寄与できるよう、関係者に対し、本報告書を周知することにつき、海事局、外航船舶代理店業協会、旗国（パナマ）海事当局及び実質的利害関係国（中国、ミャンマー及びベトナム）海事当局等に協力を要請する。

6 安全勧告

本事故は、夜間、貨物船 JIA DE が、京浜港K1 錨地に錨泊中、台風第19号が接近して増勢した風及び波を受けて船体が動揺する状況下、波の打ち込みにより上甲板に滞留した海水（以下「本件滞留水」という。）が貨物倉に浸水し始めたため、操舵不能となったのちに左舷船首方から左舷側面に一段と増勢した風及び波の打ち込みを受けるようになり、船体が右舷に大きく傾斜して貨物倉への浸水が続き、復原力が低下していたことによって横転し、貨物倉内への浸水が進んで沈没したことにより発生したものと考えられる。

本件滞留水が貨物倉に浸水し始めたのは、貨物倉通風筒の開口部蓋が開の状態となっていたこと、並びに貨物倉のハッチカバーにおいてドレン受けの破口及び変形があ

ったことから、貨物倉の風雨密が保持されていなかったことによるものと考えられる。また、甲板上への波の打ち込みは、JIA DE の乾舷が貨物倉への浸水及び本件滞留水によって小さくなったことから、更に助長されたものと考えられる。

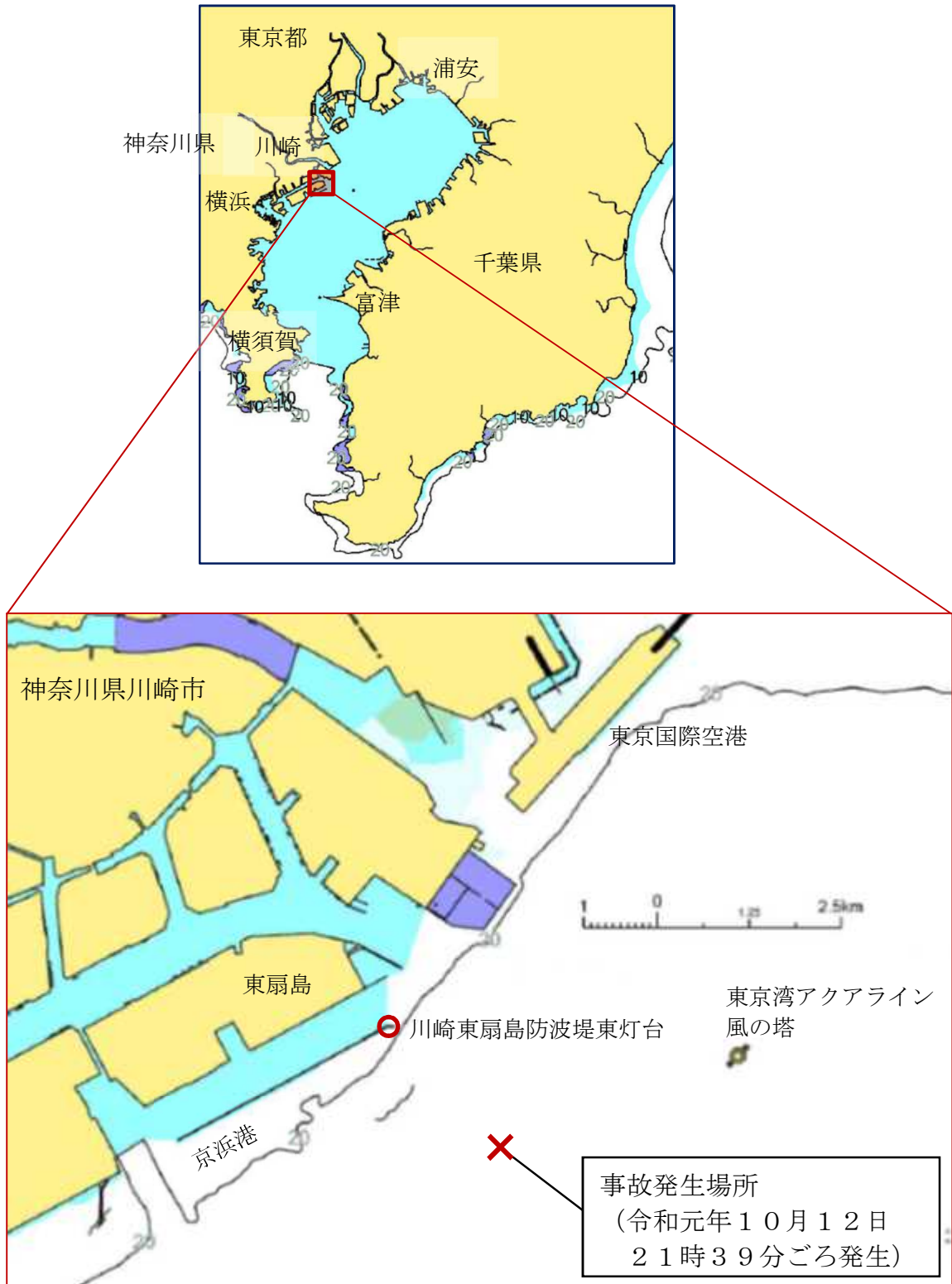
JIA DE が操舵不能となったのは、船体動揺によって上甲板上の空気抜き管からA重油タンクに混入した水が燃料油と共に発電機原動機の燃料油供給配管系統から発電機原動機に供給されたことから、同原動機のシリンダ内で燃焼不良又は不着火を起こし、発電機が停止して船内電源を喪失したことによるものと考えられる。

このため、運輸安全委員会は、本事故の調査結果を踏まえ、同種事故の再発防止及び被害の軽減を図るため、旗国であるパナマ共和国海事局に対して次のとおり勧告する。

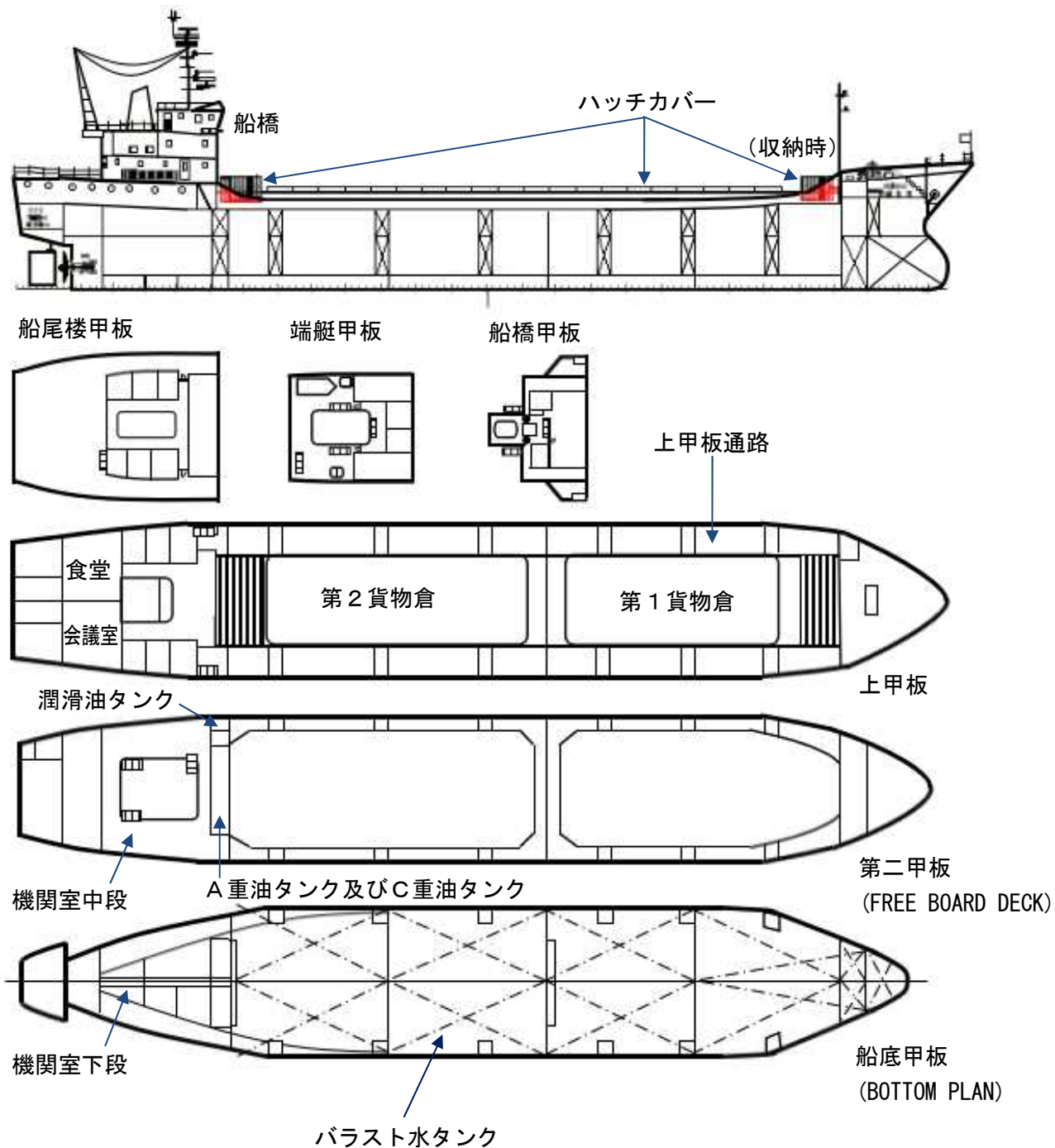
パナマ共和国海事局は、荒天中に乗組員及び船舶の安全を確保するために、パナマ共和国籍船舶の船舶所有者及び船舶管理会社に対して、次の事項を実施するよう指導すること。

- (1) 船長及び乗組員に対して、荒天が予想される際には、貨物倉通風筒の開口部蓋等の暴露甲板における開口部の閉鎖を確実に実施するよう指導すること。
- (2) 船長及び乗組員に対して、荒天時を含むいかなる状況でも十分な乾舷が維持できるよう、船体のコンディションを調整するよう指導すること。
- (3) 船長及び乗組員に対して、燃料油タンクの空気抜き管に水の浸入を防止するための管頭金物等が取り付けられていない場合には、水が混入した燃料油が発電機原動機等の燃料油供給系統に入らないよう、燃料油タンクのドレン排出作業を、荒天時の船体動揺があるときにも行うよう指導すること。
- (4) 船長及び乗組員に対して、非常時の総員退船に関し、携行品の持ち出し、船内から脱出する行動、救命胴衣及び適切な服装の着用並びに海上における生存技術に関する訓練を再度実施するよう指導すること。
- (5) 所有する船舶又は管理する船舶の貨物倉ハッチカバーの風雨密が保持されるよう保守整備を実施すること。

付図1 事故発生場所概略図



付図2 一般配置図



付表1 事故発生場所付近における油汚染の状況

貨物船JIA DE沈没海難連絡会資料（第三管区海上保安本部）（抜粋）

資料提供：海上保安庁

本事故発生場所付近の状況

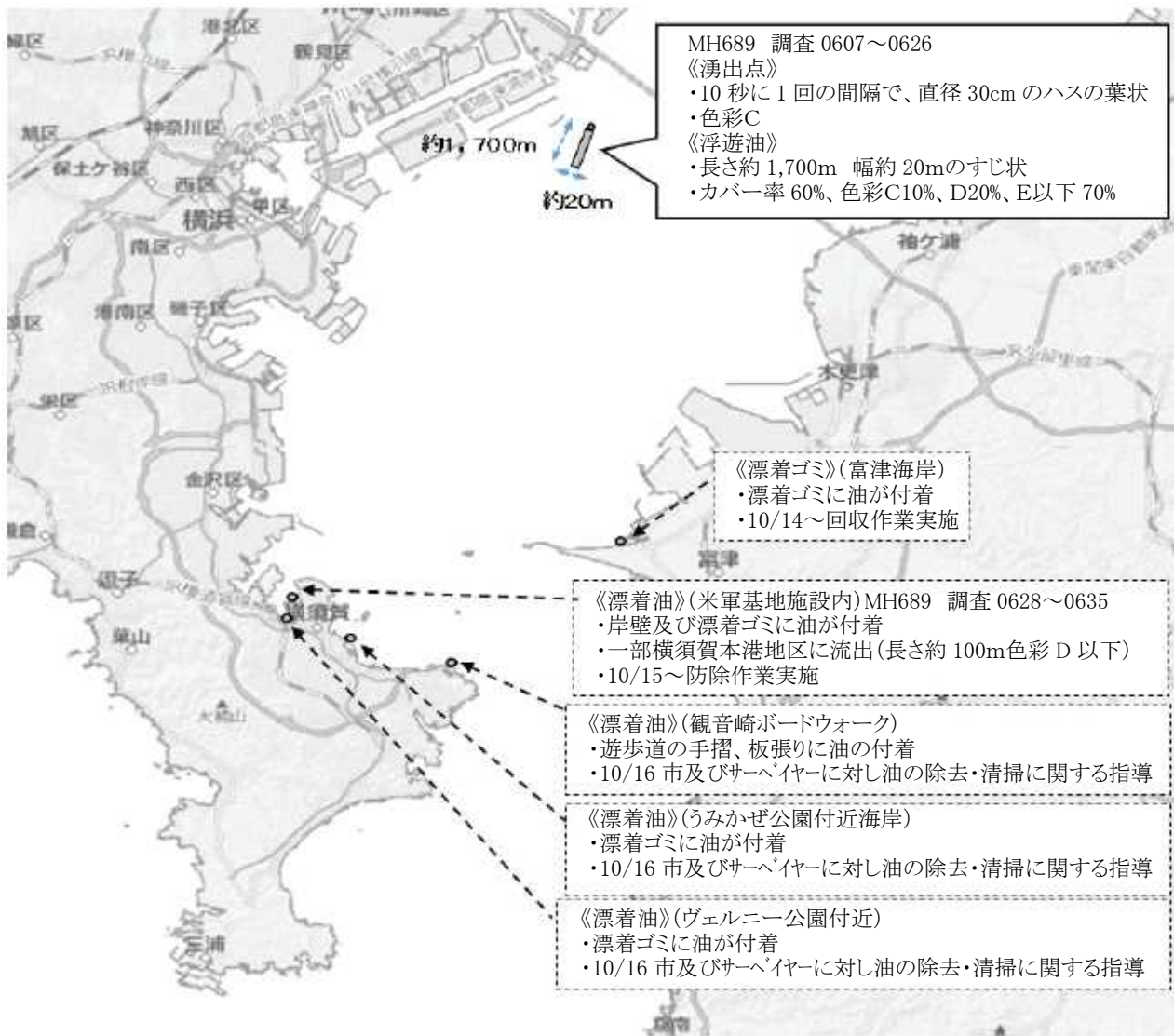
10月13日09時00分ごろ



10月18日06時35分ごろ

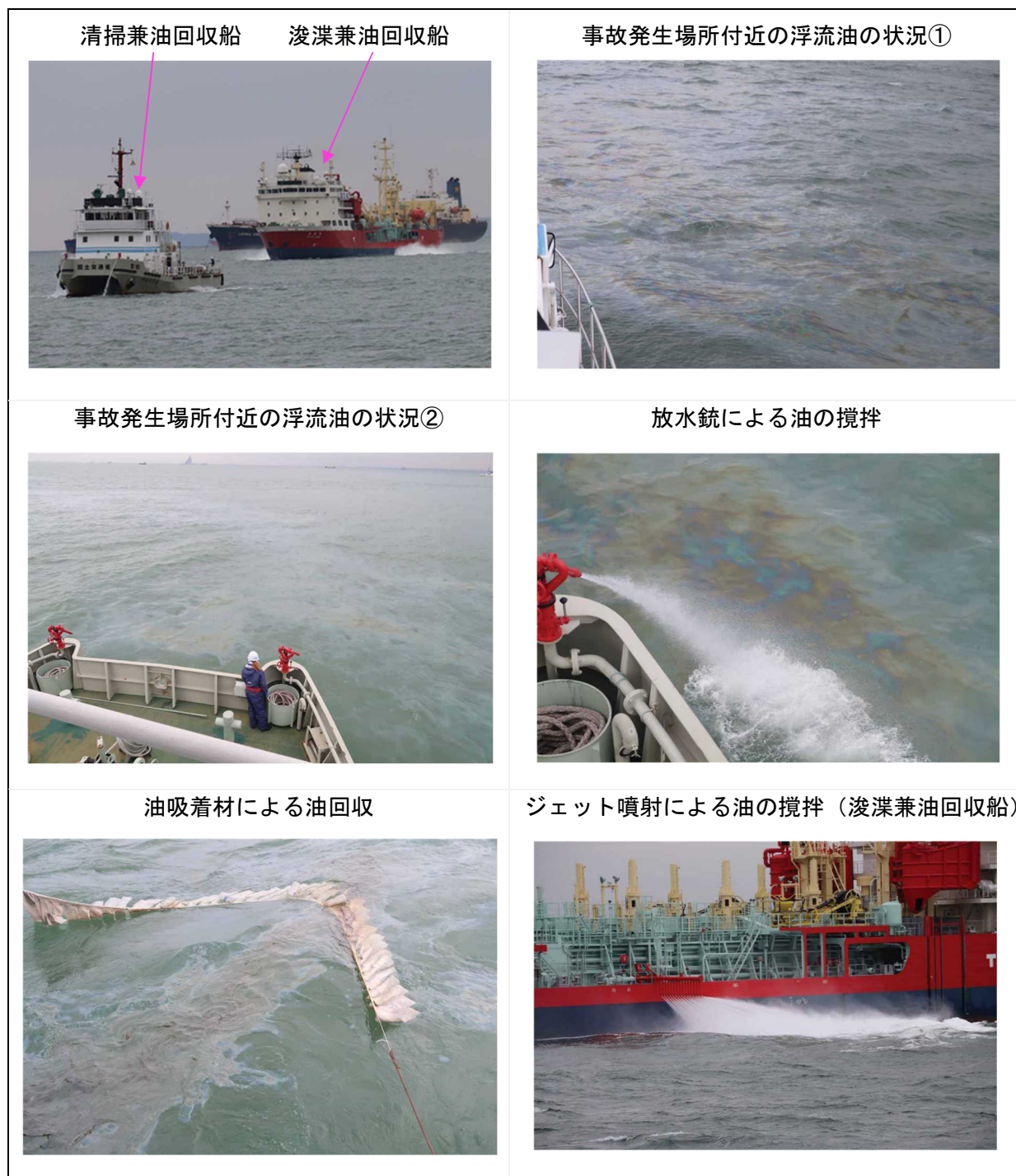


海上浮流油の状況 10月18日06時35分ごろ



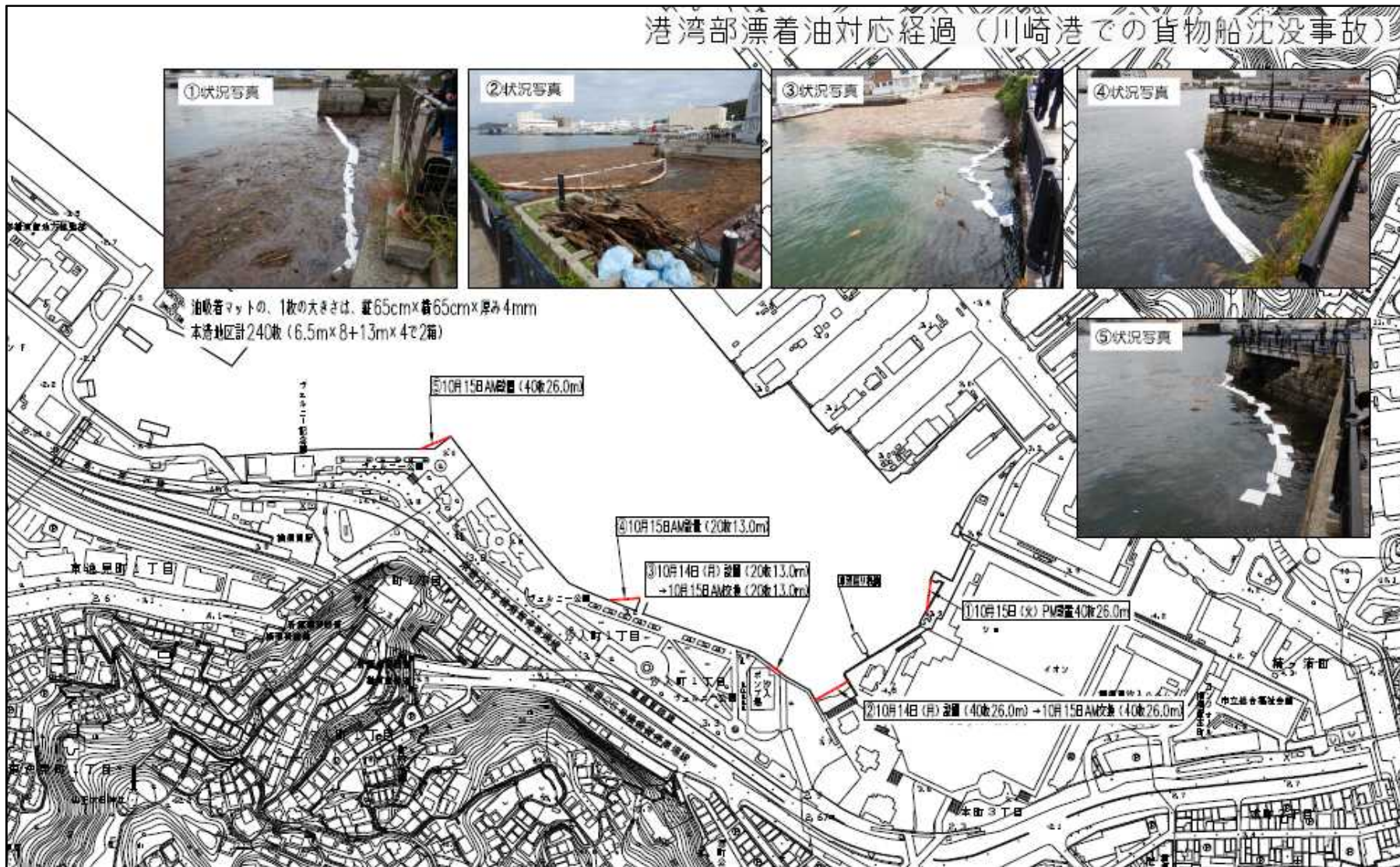
付表2 事故発生場所付近における油防除作業

写真提供：関東地方整備局及び九州地方整備局



付表3 流出した油による汚染状況（横須賀市横須賀港）

資料提供：横須賀市港湾部



NMRI

National Maritime Research Institute, MPAT

運輸安全委員会 請負研究

沈没に係る解析調査 (貨物船 A 沈没事故) 報告書

令和 2 年 3 月

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

目 次

はしがき.....	1
1. 事故発生時の復原性能の推定.....	2
1.1 事故発生直前の復原性能の推定.....	2
1.1.1 使用した船型データ.....	2
1.1.2 上甲板両舷通路に滞留水がない状態（初期状態）の復原性能の推定.....	2
1.1.3 上甲板通路への打ち込み滞留水の影響.....	4
1.2 事故発生時の復原性能の推定.....	7
2. 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況の検討.....	11
2.1 事故発生時の風による横傾斜角の推定.....	11
2.1.1 風による傾斜モーメントの計算.....	11
2.1.2 風による横傾斜角.....	16
2.2 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況.....	17
2.2.1 事故シナリオの想定.....	17
2.2.2 事故シナリオに基づく計算.....	19
付録1 上甲板両舷通路の打ち込み滞留水がない場合の検討.....	24
付録2 風による傾斜モーメント係数 C_k の推定.....	34

はしがき

本報告書は海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所（以下、「当所」と記す。）が実施した請負研究「沈没に係る解析調査（貨物船 A 沈没事故）」の結果をとりまとめたものである。

解析調査の内容は以下の通りである。

(1)事故発生時の復原性能の推定

貨物船 A の復原性関係資料が入手できないため、調査官から指示された類似の貨物船の復原性関係資料から、上甲板両舷通路に滞留した海水量を変化させた事故発生直前の復原性能を推定した。また、上甲板両舷通路への滞留水に加え貨物艙に海水が浸水した場合の復原性能を推定した。

(2)沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況の検討

(1)の結果を基に、貨物船 A が左舷船首方から風浪を受けて横揺れし、その状態から風を受け更に右舷傾斜を生じた際の復原性能を推定し、貨物船 A が沈没に至るまでの浸水状態及び横傾斜の状況を推定した。

(3)報告書の作成

調査研究を円滑に進めるため、実施に際しては、運輸安全委員会と綿密な連絡を保った。本解析調査は、主として以下の者が担当した。

流体性能評価系 田口晴邦

詳細について質問等がある場合、田口（taguchi@m.mpa.go.jp）に連絡されたい。

1. 事故発生時の復原性能の推定

調査官から指示された事故発生直前における

- ① 搭載物の重量及び搭載位置
- ② 燃料及び清水の搭載量
- ③ 上甲板に滞留した海水の滞留範囲及び高さ
- ④ 貨物艙に浸入した海水の浸水範囲及び水深
- ⑤ 風及び風浪

に関するデータに基づき事故発生時の復原性能を推定した。その際、A 船（総トン数：1,925 トン、長さ：82.65m、幅：13.00m、深さ：6.60m）（以下、「本船」と言う。）の詳細な船型データが入手できなかったため、調査官が選定した類似船（総トン数：1,915 トン、長さ：86.15m、幅：12.80m、深さ：6.70m）の船型データを用いて解析を行った。また、類似船の軽荷状態の重心高さ（KG_L）は2種類仮定されていた（KG_L=4.49m, 4.82m）ため、本解析調査では、両方の値を用いて復原性能の推定を行った。

1.1 事故発生直前の復原性能の推定

1.1.1 使用した船型データ

本船では、事故発生前に貨物の載荷トン数を決定するための喫水検査が行われ、排水量が算定されている。類似船の船型データを用いて喫水検査に対応する排水量を計算したところ、垂線間長（L_{pp}）を類似船の値（79.80m）から本船の値（74.50m）に修正することで、計算した排水量が喫水検査で算定された排水量とほぼ一致することを確認した。そこで本解析調査では、垂線間長さのみ修正した類似船の船型データを用いて復原性能他の検討を行うこととした。

1.1.2 上甲板両舷通路に滞留水がない状態（初期状態）の復原性能の推定

事故当日錨泊時の本船の喫水（船首 5.30m、船尾 5.80m）と搭載物に関する提供データに基づき、上甲板両舷通路に打ち込み水の滞留が発生する前の状態（初期状態）の復原性能を推定した。

1) 重量重心の設定

初期状態の排水量及び重心位置（前後方向・上下方向）は以下のようにして設定した。

- ①排水量（W）及び全体の重心の前後位置（mid-G）は、事故当日の喫水から排水量計算を行い設定した。その際、重心の前後位置は浮心の前後位置と一致しているとして取り扱った。
- ②軽荷状態の排水量（1105.7t）は、喫水から算定された排水量（4424.8t）から表 1、表 2 に記載した①～⑦の搭載物の重量（合計 3319.1t）を差し引いた値とし、軽荷状態の重心高さ KG_L は 4.49m と 4.82m の 2 通り設定した。
- ③搭載物①～⑥の重心高さはそれぞれの物件の嵩（体積）を貨物艙やタンクの底面の面積で除した値の 1/2 とした。また、⑦不明重量の重心高さは、軽荷状態の重心高さと同じと仮定した。
- ④全体の重心高さ（KG）は通常の重量重心計算と同様に上下方向の重量モーメントの合計を排水量で除した値とした。

初期状態の重量重心計算表を表 1 及び表 2 に示す。表 1 が軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の場合、表 2 が KG_L=4.82m の場合の重量重心計算表である。排水量 W=4424.8t、重心の前後位置 mid-G=-0.29m（船尾側）は共通で、重心高さ KG だけが、3.88m（表 1：KG_L=4.49m）と 3.97m（表 2：KG_L=4.82m）で異なっている。また、表 3 に喫水検査時に確認されたバラスト水の搭載重量をタンクごとに示す。事故当日は 6 つのタンクにバラスト水が残留していた。

表1 初期状態の重量重心計算表 (KG_L=4.49m)

	W (tf)	mid-G (m)	重量モーメント (tf-m)	KG (m)	重量モーメント (tf-m)
軽荷状態	1105.7			4.49	4964.5
搭載物					
①積荷					
No.1貨物艙	1348.9			3.80	5126.6
No.2貨物艙	1696.1			3.62	6137.9
②A重油	17.9			5.67	101.5
③C重油	61.9			3.54	218.8
④潤滑油	2.6			1.78	4.6
⑤清水	67.0			2.28	153.0
⑥バラスト水	24.8			0.05	1.2
⑦不明重量	100.0			4.49	449.0
小計	3319.1				12192.6
合計	4424.8	-0.29	-1261.1	3.88	17157.1

表2 初期状態の重量重心計算表 (KG_L=4.82m)

	W (tf)	mid-G (m)	重量モーメント (tf-m)	KG (m)	重量モーメント (tf-m)
軽荷状態	1105.7			4.82	5329.3
搭載物					
①積荷					
No.1貨物艙	1348.9			3.80	5126.6
No.2貨物艙	1696.1			3.62	6137.9
②A重油	17.9			5.67	101.5
③C重油	61.9			3.54	218.8
④潤滑油	2.6			1.78	4.6
⑤清水	67.0			2.28	153.0
⑥バラスト水	24.8			0.05	1.2
⑦不明重量	100.0			4.82	482.0
小計	3319.1				12225.6
合計	4424.8	-0.29	-1261.1	3.97	17555.0

表3 バラスト水の搭載重量 (単位 : tf)

No.1 B.W.T.(P)	0.0
No.1 B.W.T.(S)	1.6
No.2 B.W.T.(P)	10.7
No.2 B.W.T.(S)	0.0
No.3 B.W.T.(P)	3.0
No.3 B.W.T.(S)	9.2
No.4 B.W.T.(P)	0.1
No.4 B.W.T.(S)	0.2
合計	24.8

2) 復原力計算結果

表1, 表2に示した重量重心で初期状態の本船の復原力を計算した結果を図1に示す。また, 自由水影響を考慮したメタセンタ高さ (GM), 喫水 (da: 船尾喫水, df: 船首喫水, dm: 中央喫水) 及びトリム (τ : 船尾トリム正) の計算結果を表4にまとめて示す。GM1は軽荷状態の重心高さ KG_Lを4.49mと仮定した場合 (表1) のメタセンタ高さ, GM2はKG_L=4.82mと仮定した場合 (表2) のメタセンタ高さである。

軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49mの場合, 本船の初期状態のメタセンタ高さ GM1は1.44mであり, 復原力の最大値 (GZ_{max}) は約0.44m, 復原力の最大値が生じる横傾斜角 (ϕ_{max}) は約26度となる。なお, 今回の計算では各種タンクの容積について情報がなかったことから, バラスト水以外の燃料油他に関する自由水影響は考慮していない。一方, 表3に示したバラスト水に関しては, タンク容積に対する搭載量が少ないため, 見かけの重心上昇として取り扱えば横傾斜角が大きな範囲では自由水影響を過大評価する可能性がある¹⁾。そこで, 一般配置図から各バラストタンクの平面形状と高さを読み取り, 平面形状を長さ及び面積を実際のタンクと一致させた相当矩形平面で近似したタンクを想定して, 横傾斜に伴うバラスト水の重心位置の変化として自由水影響を考慮した¹⁾。

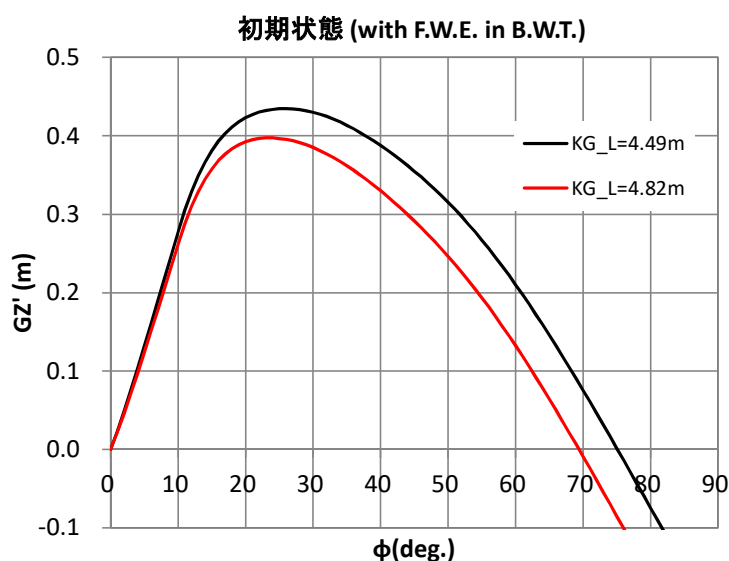


図1 復原力曲線 (初期状態)

表4 メタセンタ高さ, 喫水及びトリムの計算結果 (初期状態)

GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
1.44	1.35	5.80	5.30	5.55	0.50

1.1.3 上甲板通路への打ち込み滞留水の影響

事故時には上甲板への打ち込み水が両舷通路 (長さ: 54.85m, 幅: 2.46m, ブルワーク高さ 1.0m) に滞留し, 最終的には通路が満水になるような状況が生じたとのことである。そこで, 上甲板通路に滞留した打ち込み水の水量 (通路容積に対する滞留水量の割合) を変化させて復原性能を推定し, その影響を調べた。

ここでは, 通路容積は調査官から提供された資料に基づき船尾部構造物他を控除した実容積とし, 滞留水は舷弧を無視した上甲板上に初期状態のトリム (船尾トリム 0.50m: 表4) に応じて滞留するとして, 設定した上甲板への打ち込み水の通路への滞留割合に対して, 滞留水の重量 (W_s' : 片舷), 重心位置 (C_{SL} : 前後位置, C_{SV} : 上下位置) を求めた (表5)。表5で滞留水の重量 W_s' は喫水検査時の海水の比重 ($\gamma=1.019$) を用いて計算した。また, 前後方向の重心位置 C_{SL} は通路後端の Fr.23 を基準とし, 上下位置 C_{SV} は上甲板高さを基準として示している。

表5 上甲板通路への打ち込み滞留水（片舷）

滞留割合	滞留水重量 W_s' (tf)	前後重心 C_{SL} (m)	上下重心 C_{SV} (m)
25%	26.2	19.29	0.129
50%	52.4	23.36	0.218
75%	78.7	24.71	0.316
100%	104.9	25.39	0.416

表6 計算状態（上甲板両舷通路への打ち込み滞留水の影響）

	W (tf)	mid-G (m)	KG1 (m)	KG2 (m)	備考
初期状態	4424.8	-0.285	3.877	3.967	
想定状態1	4477.3	-0.344	3.911	4.000	通路25%滞留
想定状態2	4529.7	-0.307	3.946	4.033	通路50%滞留
想定状態3	4582.1	-0.271	3.982	4.069	通路75%滞留
想定状態4	4634.6	-0.236	4.020	4.105	通路100%滞留

表6に、上甲板通路への打ち込み滞留水の影響を調べるために復原性能の計算を行った状態の排水量（W）、重心位置（mid-G：前後位置，KG：上下位置）をまとめた。KG1は軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合の重心の上下位置（重心高さ）であり，KG2は $KG_L=4.82m$ の場合の重心高さである。表中には参考のため，初期状態（打ち込み滞留水なし）の値も示している。

各状態の復原力計算結果を図2（ $KG_L=4.49m$ ）及び図3（ $KG_L=4.82m$ ）に示す。また，メタセンタ高さ（GM），喫水（ d_a ：船尾喫水， d_f ：船首喫水， d_m ：中央喫水）及びトリム（ τ ：船尾トリム正）の計算結果を表7にまとめて示す。表4と同様に，GM1は軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合のメタセンタ高さ，GM2は $KG_L=4.82m$ の場合のメタセンタ高さである。また，これらの図表には，1.1.2節と同様にバラストタンクの自由水影響を考慮した計算結果を示している。

一方，本解析調査では，連続した海水打ち込みが発生した事故時の状況を準静的に解析することとしたため，上甲板通路への打ち込み滞留水の船体傾斜に伴う舷外への流出（傾斜舷側）やハッチカバー上への流出（反対舷側）及び自由水影響を無視することとした。図2，図3及び表7に示した計算結果は，打ち込み滞留水を重量・形状とも変化しない固体貨物として初期状態の船体に搭載したとして取り扱ったものとなっている。

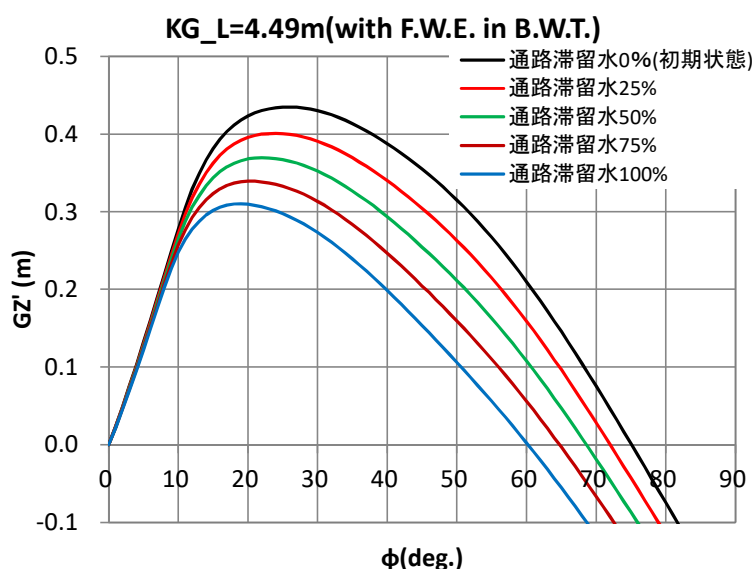


図2 復原力曲線（上甲板両舷通路への打ち込み滞留水の影響： $KG_L=4.49m$ ）

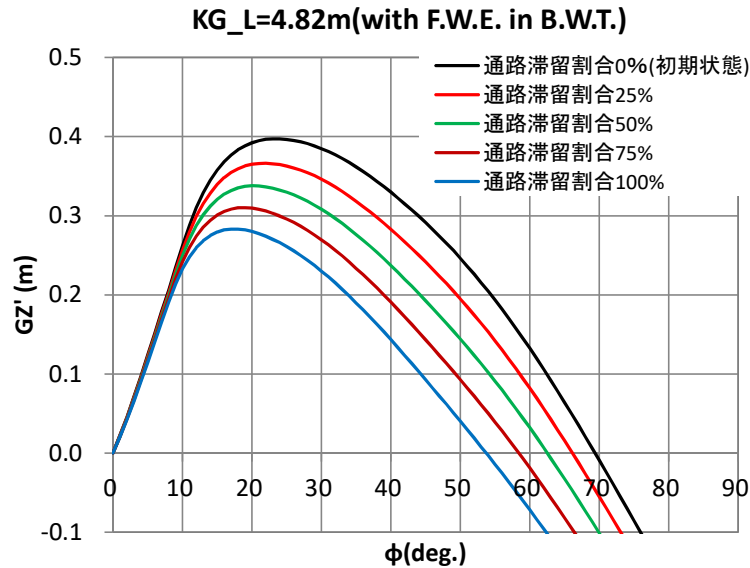


図3 復原力曲線（上甲板両舷通路への打ち込み滞留水の影響：KG_L=4.82m）

表7 メタセンタ高さ、喫水及びトリムの計算結果（上甲板両舷通路への打ち込み滞留水の影響）

	GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
初期状態	1.44	1.35	5.80	5.30	5.55	0.50
想定状態1	1.42	1.33	5.88	5.34	5.61	0.54
想定状態2	1.39	1.31	5.91	5.41	5.66	0.50
想定状態3	1.37	1.28	5.95	5.49	5.72	0.45
想定状態4	1.34	1.25	5.98	5.57	5.78	0.41

図2、図3及び表6、表7から、上甲板両舷通路に打ち込み水が滞留すると、重心が上昇するとともに、滞留水量が増加に伴い重心の前後位置が船体中央寄りに移動することで船尾トリムが小さくなり、メタセンタ高さや復原力が小さくなることから分かる。しかしながら、通路が満水になるような状況（想定状態4）であっても、滞留水量は210tf程度（初期状態の排水量の5%程度）であり、メタセンタ高さは初期状態（GM1=1.44m, GM2=1.35m）から7%程度小さくGM1=1.34m, GM2=1.25mとなるだけである。

表8 放水口、ブルワーク上端及び空気抜き管の没水角の計算結果（単位：deg.）
（上甲板両舷通路への打ち込み滞留水の影響）

	放水口		空気抜き管		
	Fr.34	Fr.34	左舷①	左舷②	右舷
初期状態	9.2	17.0	29.6	31.3	29.4
想定状態1	8.6	16.4	28.9	30.5	28.7
想定状態2	8.2	15.9	28.4	30.1	28.3
想定状態3	7.8	15.5	27.0	29.6	27.8
想定状態4	7.4	15.1	27.5	29.2	27.3

表8に各状態におけるFr.34位置の放水口、ブルワーク上端と船尾楼甲板の燃料タンクの空気抜き管（左舷2カ所、右舷1カ所）の没水角の計算結果を示す。表7に示したように計算を行った状態は全て船尾トリムであるので、放水口、ブルワーク上端ともFr.34位置で直立時の水面からの高さが最も低くなる。

表8から、上甲板両舷通路に打ち込み滞留水がない状態（初期状態）では、放水口の没水角は9.2度、ブルワーク上端の没水角は17.0度で空気抜き管の没水角は29.4度～31.3度であること、通路への滞留水量が増加するに

従い没水角は小さくなり、通路が満水になるような状況（想定状態4）では、放水口の没水角は7.4度、ブルワーク上端の没水角は15.1度、空気抜き管の没水角は27.3度～29.2度となり、打ち込み滞留水がない状態（初期状態）に比べ没水角は約2度小さくなる事が分かる。

なお、放水口没水角以上横傾斜した場合は、通路への打ち込み滞留水の内、船外の水面より下方部分は放水口から逆流した海水（船外水）と同じとみなされる²⁾が、今回の計算では考慮していない。また、本船の場合、両舷通路が船尾楼の前方で連結されているため、傾斜舷と反対側の通路の滞留水は傾斜舷側に流下する。そのため、ブルワーク上端が没水すると、実質的には全ての通路滞留水は船外水と見なして復原力は滞留水がない状態（初期状態）に戻る²⁾として取り扱うことが適当と考えられる。

1.2 事故発生時の復原性能の推定

事故発生時には貨物艙内への浸水が生じた可能性があるとのことである。そこで、上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が75%となるような状況（想定状態3）で更に貨物艙内に浸水が生じたとして、貨物艙内の浸水量を変化させて事故発生時の復原性能を推定し、その影響を調べた。なお、付録1に上甲板両舷通路に打ち込み滞留水がない状況（初期状態）で貨物艙浸水が生じた場合の復原性能の推定結果を示す。

ここでは、貨物艙への浸水は底面（二重底上面）に想定状態3のトリム（船尾トリム0.45m：表7）に応じて滞留するとして、貨物艙への浸水割合に対して、浸水重量（ W_H' ）、重心位置（ C_{HL} ：前後位置、 C_{HV} ：上下位置）を求めた（表9、表10）。表9、表10で貨物艙への浸水重量 W_H' は喫水検査時の海水の比重（ $\gamma=1.019$ ）を用いて計算した。また、前後方向の重心位置 C_{HL} は各貨物艙の後部隔壁（No.1貨物艙：Fr.74、No.2貨物艙：Fr.28）を基準とし、上下位置 C_{HV} は二重底上面を基準として示している。

表9 想定した貨物艙への浸水（No.1貨物艙）

浸水割合 (%)	浸水重量 W_H' (tf)	前後重心 C_{HL} (m)	上下重心 C_{HV} (m)
2%	40.8	10.61	0.086
4%	81.5	11.61	0.163
6%	122.3	11.94	0.242
8%	163.0	12.10	0.322
10%	203.8	12.20	0.402

表10 想定した貨物艙への浸水（No.2貨物艙）

浸水割合 (%)	浸水重量 W_H' (tf)	前後重心 C_{HL} (m)	上下重心 C_{HV} (m)
2%	46.6	10.96	0.076
4%	93.2	12.36	0.140
6%	139.8	12.82	0.206
8%	186.4	13.05	0.274
10%	232.9	13.19	0.341

なお、調査官によると、貨物艙への浸水経路としては、各貨物艙に4ヵ所（船首側と船尾側の左右舷）設置されていた通風筒（0.2m×0.2m正方形断面）とハッチカバーの隙間及び同カバーパネルの接合部にあるドレン受けの破孔部が想定されるとのことであり、通風筒からは事故当日19時頃から事故発生時刻まで約160分間、ハッチカバーの隙間及び同カバードレン受けからは20時頃から事故発生時刻まで約100分間浸水が継続していたと想定されるとのことである。

表 11 計算状態（貨物艙への浸水の影響）

	W (tf)	mid-G (m)	KG1 (m)	KG2 (m)	備考
想定状態3	4582.1	-0.271	3.982	4.069	通路75%
想定状態11	4669.5	-0.233	3.929	4.003	通路75%+貨物艙2%
想定状態12	4756.8	-0.152	3.882	3.941	通路75%+貨物艙4%
想定状態13	4844.2	-0.073	3.838	3.882	通路75%+貨物艙6%
想定状態14	4931.5	0.002	3.799	3.827	通路75%+貨物艙8%
想定状態15	5018.9	0.075	3.763	3.776	通路75%+貨物艙10%

表 11 に貨物艙への浸水の影響を調べるために復原性能の計算を行った状態の排水量 (W)、重心位置 (mid-G : 前後位置, KG : 上下位置) をまとめて示す。KG1 は軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の場合の重心の上下位置 (重心高さ) であり, KG2 は KG_L=4.82m の場合の重心高さである。表中には参考のため, 貨物艙への浸水がない状態 (想定状態 3) の値も示している。

計算を行った浸水割合 2% から 10% 程度の水量では, 貨物艙への浸水を見かけの重心上昇として取り扱うと横傾斜角が大きな範囲では自由水影響を過大評価する可能性がある。そのため, 貨物艙に侵入した海水については, 残留していたバラスト水と同様に横傾斜に伴う形状変化を正確に取り扱う (自由水による傾斜モーメントとして取り扱う) 必要があると考え, 一般配置図から各貨物艙の平面形状と高さを読み取り, 平面形状を長さ及び面積を実際の貨物艙と一致させた相当矩形平面で近似した貨物艙を想定して, 横傾斜に伴う貨物艙浸水の重心位置の変化として自由水影響を考慮した。

各状態の復原力計算結果を図 4 及び図 5 に示す。貨物艙内の浸水量が増加すると, 全般的に復原力が低下するとともに, 復原力の特性を示す復原力消失角 (ϕ_v) や復原力範囲 (ϕ_R) が小さくなり, 復原力の最大値 (GZ_{max}) や GZ_{max} が生じる横傾斜角 (ϕ_{max}) も小さくなっていることが分かる。例えば, 軽荷状態の重心高さ KG_L=4.82m の場合, 図 5 で緑線で示した浸水割合 4% (想定状態 12: No.1 貨物艙浸水重量 81.5tf, No.2 貨物艙浸水重量 93.2tf) では, 復原力消失角 ϕ_v は約 47 度で, 復原力の最大値 GZ_{max} は約 0.15m, 復原力の最大値が生じる横傾斜角 ϕ_{max} は約 17 度となっており, 黒線で示した貨物艙への浸水がない場合 (想定状態 3 : $\phi_v \doteq 58 \text{ deg.}$, $GZ_{max} \doteq 0.31\text{m}$, $\phi_{max} \doteq 19\text{deg.}$) に比べて, 復原力消失角は約 2 割, 復原力の最大値は約 5 割, 復原力の最大値が生じる横傾斜角は約 1 割小さくなる。

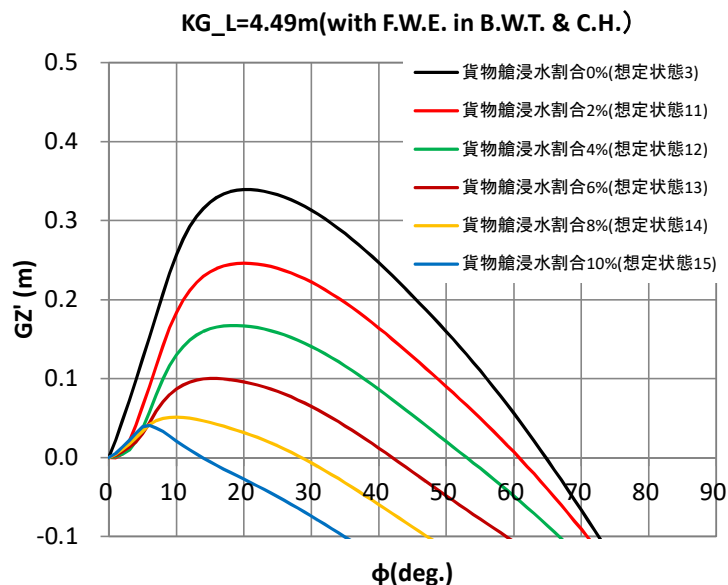


図 4 復原力曲線 (貨物艙への浸水の影響 : KG_L=4.49m, 通路滞留割合 75%)

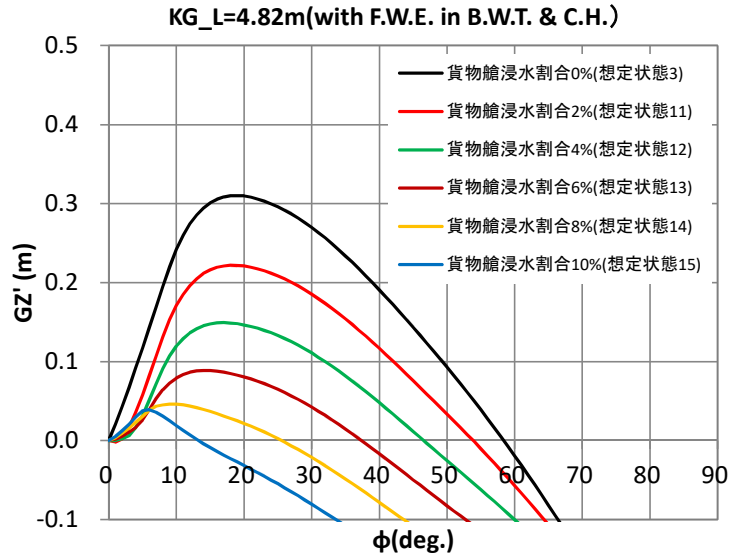


図5 復原力曲線（貨物艙への浸水の影響：KG_L=4.82m，通路滞留割合75%）

表12 メタセンタ高さ，喫水及びトリムの計算結果（貨物艙への浸水の影響）

	GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
想定状態3	1.37	1.28	5.95	5.49	5.72	0.45
想定状態11	0.07	0.00	6.01	5.62	5.82	0.39
想定状態12	0.16	0.10	6.06	5.76	5.91	0.30
想定状態13	0.24	0.20	6.11	5.91	6.01	0.20
想定状態14	0.33	0.30	6.16	6.05	6.11	0.10
想定状態15	0.40	0.39	6.20	6.20	6.20	0.01

また、貨物艙とバラスタンの自由水影響を考慮したメタセンタ高さ（GM），喫水（da：船尾喫水，df：船首喫水，dm：中央喫水）及びトリム（ τ ：船尾トリム正）の計算結果を表12にまとめて示す。メタセンタ高さは、復原力曲線の原点（横傾斜角0度）における接線の傾斜に対応する³⁾ことから、本解析調査のように自由水影響を横傾斜に伴う貨物艙の浸水やバラスタンの残水の重心位置の変化として考慮した場合であっても、メタセンタ高さについては自由水影響を見かけの重心上昇として取り扱った場合と一致することが示されている⁴⁾。そのため、表12に示したように貨物艙の浸水を想定した場合、大きな自由水影響によりメタセンタ高さは貨物艙の浸水がない場合（想定状態3）に比べ大幅に減少する。例えば、KG_L=4.49mの場合、想定状態11の浸水割合2%（浸水重量：No.1貨物艙40.8tf，No.2貨物艙46.6tf）では、メタセンタ高さ（GM1）は0.07mとなり、想定状態3のメタセンタ高さ（1.37m）の5%程度となる。なお、表12で浸水割合2%の場合（想定状態11）にメタセンタ高さ（GM1，GM2）が最も小さくなっている。これは、今回想定した浸水割合では自由表面の慣性モーメント（I）が同一であるので、浸水量の増加に伴い排水容積（V）が増加するため見かけの重心上昇量（ $GG_0=I/V$ ）は小さくなること、浸水量の増加に伴い船体重心高さ（KG1，KG2）が低くなる（表11）こと等によるものである。

一方、想定した貨物艙の浸水量が少ないため、自由水影響は比較的小さな横傾斜角に限定され、例えば、浸水割合2%（想定状態11）でKG_L=4.82mの場合、自由水影響を考慮したメタセンタ高さ（GM2）はほぼ0m（表12）となるが、横傾斜角が2度程度からプロメタセンタ高さが大きくなり、横傾斜角約18度で最大値約0.22mと有意な復原力を示すようになる（図5）。

表13に各状態におけるFr.34位置の放水口，ブルワーク上端と船尾楼甲板上の燃料タンクの空気抜き管の没水角の計算結果を示す。表13から、貨物艙への浸水量が増加するに従い没水角は小さくなり、貨物艙への浸水割合

が10%の場合（想定状態15）には、放水口の没水角は4.5度、ブルワーク上端の没水角は11.9度、空気抜き管の没水角は23.9度～25.8度となり、貨物艙への浸水がない状態（想定状態3）に比べ没水角は3～4度小さくなることが分かる。なお、1.1.3節で説明したように、ブルワーク上端が没水すると、実質的には全ての通路滞留水は船外水と見なして復原力は滞留水がない貨物艙のみ浸水した状態に遷移すると考えられる。

表13 放水口、ブルワーク上端及び空気抜き管の没水角の計算結果（貨物艙への浸水の影響）（単位：deg.）

	放水口	ブルワーク上端	空気抜き管		
	Fr.34	Fr.34	左舷①	左舷②	右舷
想定状態3	7.8	15.5	28.0	29.6	27.8
想定状態11	7.0	14.7	27.1	28.8	26.9
想定状態12	6.4	14.0	26.4	28.1	26.2
想定状態13	5.8	13.3	25.6	27.3	25.5
想定状態14	5.1	12.6	24.8	26.6	24.7
想定状態15	4.5	11.9	24.0	25.8	23.9

参考文献

- 1) 森田知治：船舶復原論 - 基礎と応用 - ， pp.84-94，海文堂，昭和60年4月。
- 2) 田宮真：甲板上の自由水について，造船協会論文集第107号， pp.71-76，昭和35年6月。
- 3) 大串雅信：理論船舶工学（上巻）新訂版， p.163，海文堂，昭和59年10月。

2. 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況の検討

本船が沈没に至る状況で想定される外力としては、錨地付近を通過した台風による風浪と強風が考えられる。本船は風浪により横揺れした状態で強風を左舷方から受け、右舷側に大傾斜して横転し、沈没したと想定されている。風により傾斜した状態の船では、荷崩れや重量物の片積み等により重心が横移動した状態と同様に、当初の復原力から風による傾斜偶力を差し引いた残存復原力が有効な復原力として作用する¹⁾。そのため、風による傾斜偶力が大きくなると、定傾斜角が大きくなるとともに残存復原力が小さくなり、風浪による横揺れにより残存復原力消失角を超えて横転（転覆）する状況が考えられる。

ここでは、1.2節で事故発生時の状態として、上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が75%となるような状況で更に貨物艙内に浸水が生じたとして、貨物艙内の浸水量を変化させて事故発生時の復原性能を推定した6つの状態（通路滞留割合75%+貨物艙浸水割合0%~10%）（表14）について、指定された風速、風向角及び船首方位において船体に作用する風による傾斜モーメントと横傾斜角を推定し、事故発生時の船体傾斜の進展状況を検討した。また、風による傾斜偶力を考慮した残存復原力から右舷側に大傾斜して横転する状況についても検討を加えた。

指定された風速、風向角及び船首方位と対応する相対風速及び相対風向角を表15に示す。事故発生時の船速を0としたため、相対風速は指定された風速と同一である。また、風はいずれも左舷側から船体に当たっている。

表14 計算を行った船体状態

	W (tf)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)	備考
想定状態3	4582.1	5.95	5.49	5.72	0.45	通路75%
想定状態11	4615.0	6.01	5.62	5.82	0.39	通路75%+貨物艙2%
想定状態12	4680.7	6.06	5.76	5.91	0.30	通路75%+貨物艙4%
想定状態13	4598.6	6.11	5.91	6.01	0.20	通路75%+貨物艙6%
想定状態14	4746.5	6.16	6.05	6.11	0.10	通路75%+貨物艙8%
想定状態15	4910.8	6.20	6.20	6.20	0.01	通路75%+貨物艙10%

表15 計算条件（風速、風向角及び船首方位 co.）

風速 [m/s]	風向 [deg.]	co. [deg.]	speed [kn]	相対風速 [m/s]	相対風向 [deg.]
30.0	202.5	225.0	0.0	30.0	22.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	
30.0	270.0	270.0	0.0	30.0	67.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	

2.1 事故発生時の風による横傾斜角の推定

上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が75%となるような状況で更に貨物艙内に浸水が生じたとして、事故発生時の復原性能を推定した6つの状態（表14）について、事故発生時の風による横傾斜角を推定した。なお、付録1に上甲板両舷通路に打ち込み滞留水がない状況（初期状態）で貨物艙浸水が生じた場合の風による横傾斜角の推定結果を示す。

2.1.1 風による傾斜モーメントの計算

風による傾斜モーメント K_A は式(1)で求めた。

$$K_A = C_K q_A A_L H_L \quad (1)$$

ここで、 C_K は風による傾斜モーメント係数であり藤原の式²⁾を基に推定した(付録2)。 q_A は動圧であり、空気密度を ρ_A 、相対風速を U_A として式(2)で定義される。また、 A_L は水面上船体・上載構造の側面投影面積、 H_L は水面上船体・上載構造の側面の平均高さ($H_L=A_L/L_{OA}$)であり、一般配置図から事故発生時の状態の喫水線(表14: 船尾喫水 da, 船首喫水 df)より上部の値を求めた。

$$q_A = \frac{1}{2} \rho_A U_A^2 \quad (2)$$

表16に藤原の式で用いられる船体外観を表現する8つのパラメータをまとめて示す。 L_{OA} は全長、 B は船幅、 A_F は水面上船体・上載構造の正面投影面積、 A_{OD} は上載構造側面投影面積、 C は船体中心から側面積中心までの前後方向座標(船首方向正)、 H_C は喫水から側面積中心までの高さ、 H_{BR} は喫水から主要構造物(ブリッジ)の最高位である。

表16 風による傾斜モーメントの推定に用いたパラメータ

	$L_{OA}(m)$	$B(m)$	$A_F(m^2)$	$A_L(m^2)$	$A_{OD}(m^2)$	$C(m)$	$H_C(m)$	$H_{BR}(m)$
想定状態3	82.65	13.00	141.76	314.11	143.15	-3.88	2.80	15.48
想定状態11			138.16	306.18		-4.07	2.71	15.37
想定状態12			134.08	298.30		-4.34	2.62	15.24
想定状態13			129.82	290.22		-4.63	2.53	15.11
想定状態14			125.74	282.34		-4.93	2.45	14.98
想定状態15			121.65	274.46		-5.25	2.37	14.85

表17に藤原の式を基に推定した風による傾斜モーメント係数 C_K と風による傾斜モーメント K_A の推定結果を計算した状態毎に示す。なお、表中 D_W は傾斜モーメントから算定した傾斜偶力てこ($D_W=K_A/W$)である。今回計算した状態では、貨物艙への浸水が増加するに従い、風による傾斜モーメント係数 C_K は増加する。一方、貨物艙への浸水が増加するに従い、喫水が深くなり、水面上船体・上載構造の側面投影面積 A_L が減少し(表16)、水面上船体・上載構造の側面の平均高さ $H_L(=A_L/L_{OA})$ も減少することから、式(1)で求めた風による傾斜モーメント K_A は減少し、傾斜偶力てこ D_W も減少する(表17)。

図6~図11に計算した各状態の復原力と風による傾斜偶力てこを比較して示す。図6~図11では例えば、船首方位225度で風速30m/sの場合の傾斜偶力てこを $DW(225,30)$ として表記している。また、図中には、参考のため、各状態の復原力の最大値が生じる横傾斜角(ϕ_{max})と船首方位270度で風速40m/sの場合の傾斜偶力てこ $DW(270,40)$ と復原力曲線との交点の横傾斜角(ϕ_{wind} , ϕ_{wind-2} : ϕ_{wind} に関しては2.1.2節で説明する。)の値も記入している。

上述したように貨物艙への浸水が増加するに従い復原力 GZ' も傾斜偶力てこ D_W も減少するが、復原力 GZ' の減少の方がより顕著である。そのため、図6~図11において実線で示した復原力曲線 GZ' の横軸に平行な傾斜偶力てこ D_W より上方の部分に対応する残存復原力(GZ'_R)は、貨物艙への浸水が増加するのに伴い大きく減少していることが分かる。特に、図11に示した貨物艙浸水割合10%の状態(想定状態15)では、船首方位270度で風速40m/sの場合(傾斜偶力てこ: 緑一点鎖線)、軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合(黒実線)であっても、有効な復原力はほとんどなくなる。

表 17 風による傾斜モーメントの推定結果

		想定状態3:貨物艙浸水割合0%			想定状態11:貨物艙浸水割合2%			想定状態12:貨物艙浸水割合4%			想定状態13:貨物艙浸水割合6%				
風速 [m/s]	風向 [°]	co. [°]	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	
30.0	202.5	225.0	0.750	53.10	0.012	0.763	51.32	0.011	0.774	49.42	0.010	0.785	47.45	0.010	
35.0				72.27	0.016		69.85	0.015		67.26	0.014		64.58	0.013	
40.0				94.40	0.021		91.23	0.020		87.86	0.018		84.35	0.017	
30.0		270.0	1.902	1.946	134.73	0.029	1.987	130.98	0.028	1.987	126.94	0.027	2.030	122.71	0.025
35.0					183.39	0.040		178.27	0.038		172.78	0.036		167.02	0.034
40.0					239.52	0.052		232.85	0.050		225.68	0.047		218.15	0.045

		想定状態14:貨物艙浸水割合.8%			想定状態15:貨物艙浸水割合10%				
風速 [m/s]	風向 [°]	co. [°]	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	Dw (m)	
30.0	202.5	225.0	0.796	45.53	0.009	0.806	43.60	0.009	
35.0				61.97	0.013		59.35	0.012	
40.0				80.94	0.016		77.52	0.015	
30.0		270.0	2.072	2.114	118.55	0.024	2.114	114.33	0.023
35.0					161.37	0.033		155.62	0.031
40.0					210.76	0.043		203.26	0.040

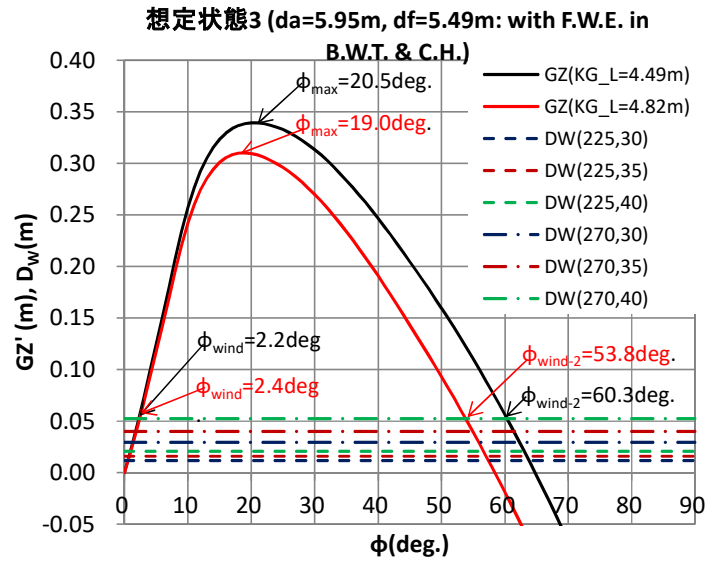


図6 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 3 : 貨物艙浸水割合 0%)

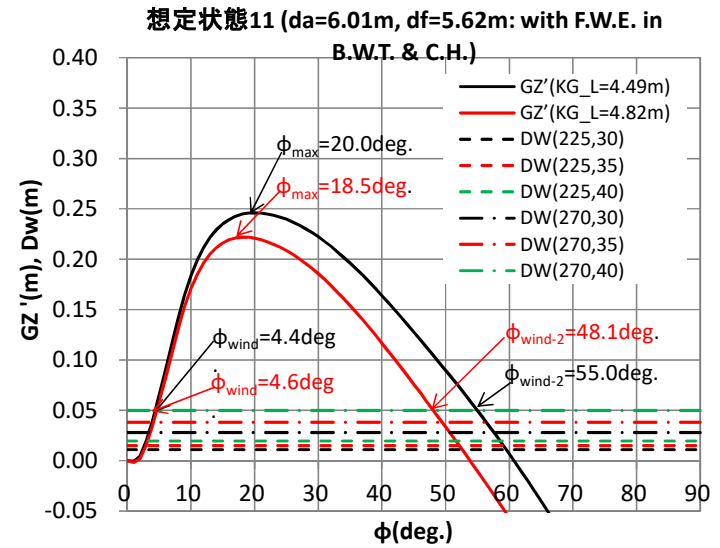


図7 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 11 : 貨物艙浸水割合 2%)

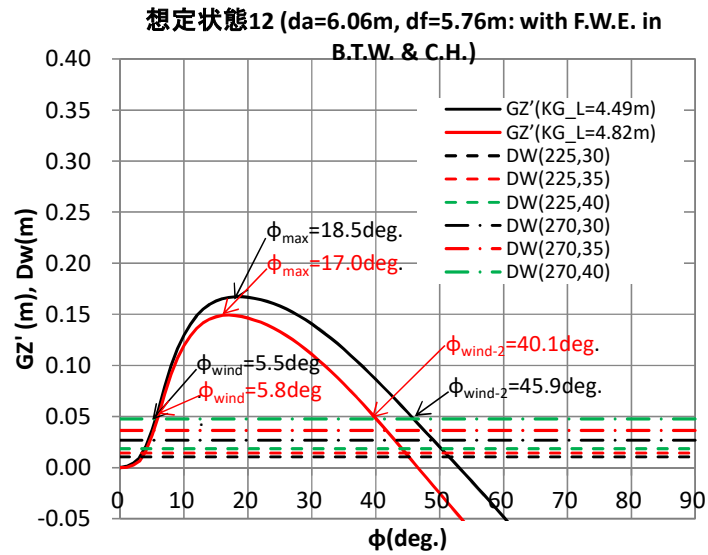


図8 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 12 : 貨物艙浸水割合 4%)

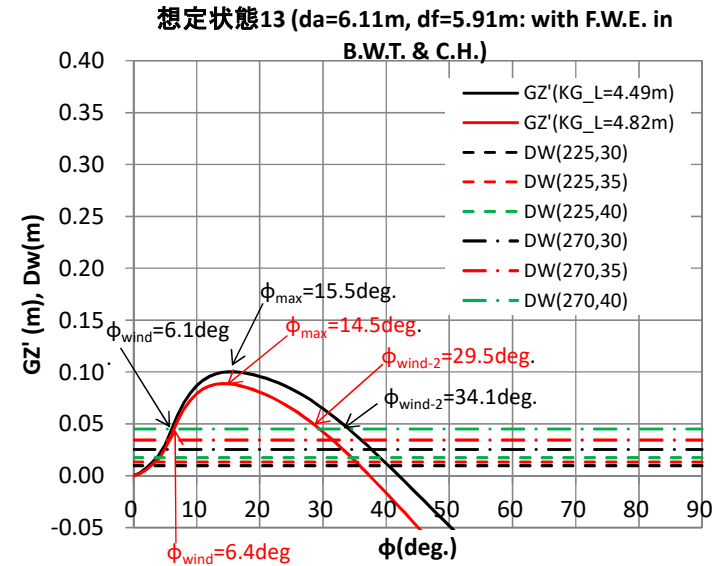


図9 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 13 : 貨物艙浸水割合 6%)

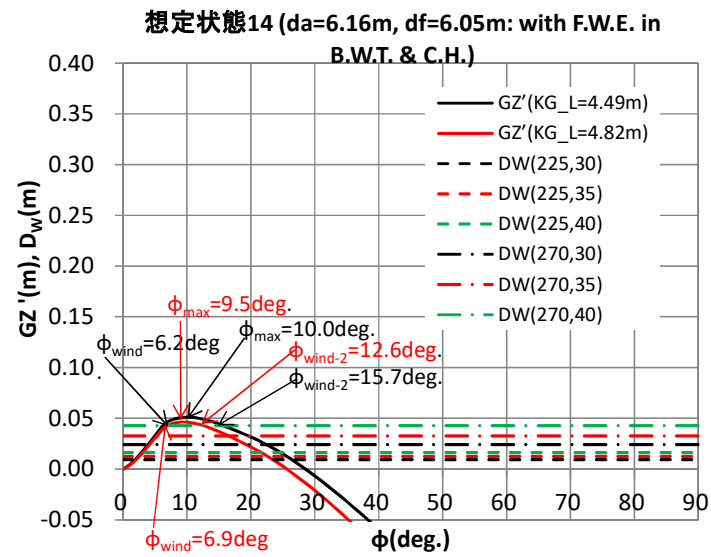


図10 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 14: 貨物艙浸水割合 8%)

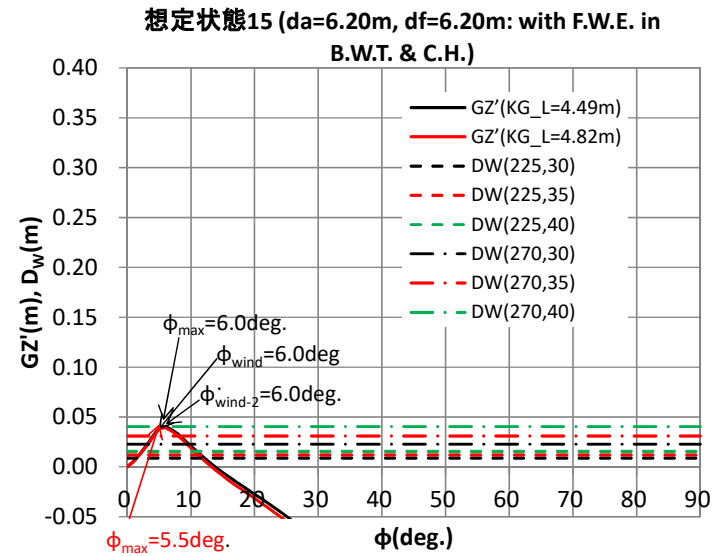


図11 復原力と風による傾斜偶力でこ (想定状態 15: 貨物艙浸水割合 10%)

2.1.2 風による横傾斜角

風による横傾斜角 ϕ_{wind} は、図 6～図 11 で復原力 (GZ') 曲線と傾斜偶力 D_w の交点の傾斜角の内小さい方の傾斜角に対応する (式(3))。

$$GZ'(\phi_{wind}) = D_w \left(= \frac{K_A}{W} \right) \quad (3)$$

軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合の風による横傾斜角の推定結果を表 18 に、 $KG_L=4.82m$ の場合の風による横傾斜角の推定結果を表 19 に示す。また、風による横傾斜角の推定結果を横軸に貨物艙への浸水割合をとって図 12 ($KG_L=4.49m$) 及び図 13 ($KG_L=4.82m$) に示す。 $KG_L=4.82m$ で貨物艙への浸水割合が 10% の状態 (想定状態 15) では、復原力曲線と船首方位 270 度で風速 40m/s の場合の風による傾斜偶力 D_w とこの交点 (傾斜偶力と復原力が釣り合う傾斜角) はない。

表 18, 表 19 及び図 12, 図 13 から、①相対風向が横風に近くなる船首方位が 270 度の場合の風による横傾斜角は、船首方位が 225 度の場合の 1.4～2.5 倍程度大きくなること、②風による横傾斜角が 5 度以上となるのは、船首方位が 270 度で貨物艙への浸水割合が 4% 以上となる状態に限られることなどが分かる。

なお、今回計算した状態では、船首方位及び風速が同じ条件で貨物艙への浸水量が増加した場合、浸水割合が 4% (想定状態 12) までは浸水量の増加に伴い風による横傾斜角は増加する。しかしながら、貨物艙への浸水量の増加に伴う復原力 GZ' と風による傾斜偶力 D_w の減少が一樣でないため、浸水割合が 4% を超えると、船首方位及び風速の組合せによっては、浸水量の増加に伴い横傾斜角が減少する場合がある。

また、表 18 及び表 19 で、風による横傾斜角が放水口の没水角を超える状態を黄色で塗りつぶしている。放水口が没水すると、打ち込み滞留水の排水が妨げられるため、滞留水量は本章における計算を行った状況 (滞留水割合 75%) より増加すると考えられる。

表 18 風による横傾斜角の推定結果 ($KG_L=4.49m$)

船首方位(deg.)	225.0			270.0		
	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
想定状態3	0.5	0.7	0.9	1.3	1.7	2.2
想定状態11	2.4	2.7	3.0	3.4	3.9	4.4
想定状態12	3.1	3.4	3.8	4.4	5.0	5.5
想定状態13	2.4	3.1	3.7	4.6	5.3	6.1
想定状態14	1.9	2.3	2.9	3.9	4.9	6.2
想定状態15	1.4	1.9	2.3	3.2	4.1	6.0

表 19 風による横傾斜角の推定結果 ($KG_L=4.82m$)

船首方位(deg.)	225.0			270.0		
	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
想定状態3	0.6	0.8	1.0	1.4	1.9	2.4
想定状態11	2.6	2.9	3.2	3.6	4.1	4.6
想定状態12	3.4	3.8	4.1	4.7	5.2	5.8
想定状態13	2.8	3.5	4.1	4.9	5.6	6.4
想定状態14	2.0	2.5	3.1	4.1	5.2	6.9
想定状態15	1.5	1.9	2.4	3.2	4.2	-

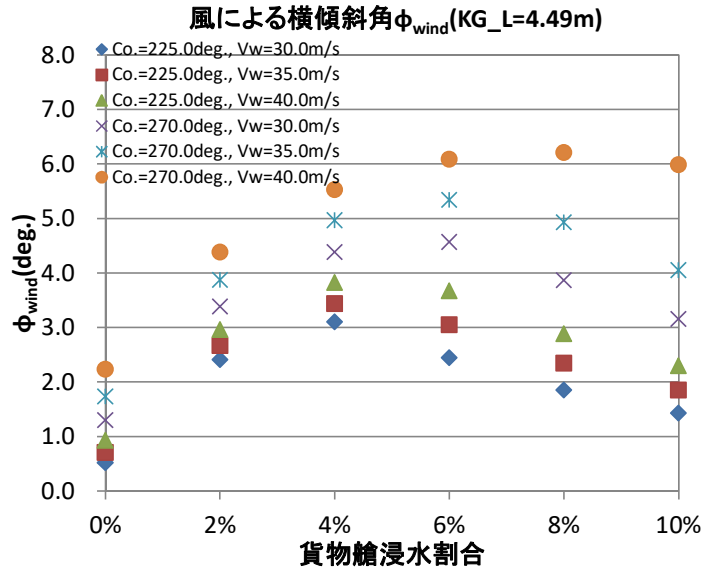


図 12 風による横傾斜角（貨物艙への浸水の影響：KG_L=4.49m）

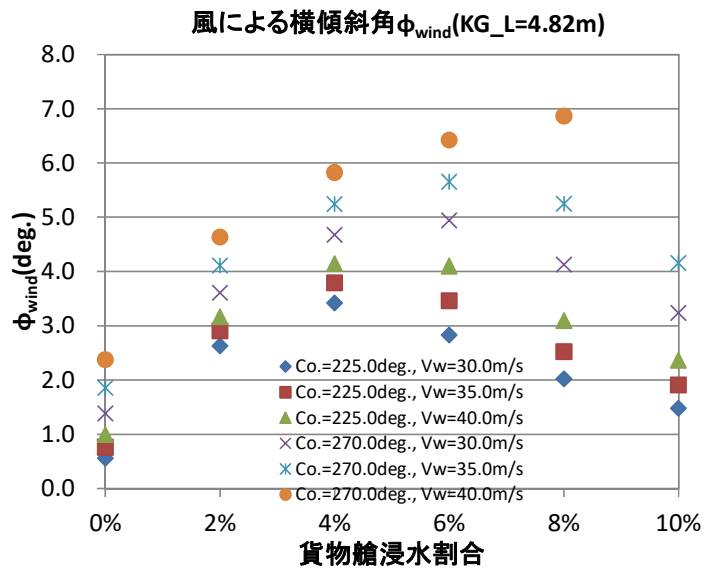


図 13 風による横傾斜角（貨物艙への浸水の影響：KG_L=4.82m）

2.2 沈没に至るまでの船体傾斜の進展状況

風による傾斜偶力を考慮した残存復原力から事故発生時の船体傾斜の進展状況を検討し、右舷側に大傾斜して横転する状況について考察を加えた。

2.2.1 事故シナリオの想定

調査官から示された事故当日 19 時から事故発生までの気象・海象、船体の横揺れ・横傾斜、船上への打ち込み・滞留状況及び口述等から推測される事象と 2.1 節までに示した想定状態の対応をまとめて表 20 に示す。

表 20 に示したように、本船の横揺れ・横傾斜の進展状況は、①事故当日 18 時頃から風浪により 5 度程度の横揺れが発生していたが、②波高の増大に伴い、20 時頃には横揺れが 10～20 度に達した。更に、③21 時 30 分頃には風により約 5 度の横傾斜が加わり、④21 時 34 分頃に横傾斜が約 30 度に増大し、⑤21 時 39 分頃に横傾斜が約 45 度に達した後、横転したと整理される。

表 20 事故発生時の状況

時刻	波高 (m)	波向 (deg.)	風速(平均/最大)(m/s)	風向(平均/最大瞬間)	船首方位 (deg.)	出合い角 (deg.)	横揺れ角 (deg.)	横傾斜角 (deg.)	打ち込み・滞留状況	貨物艙浸水状況	対応する想定状態	口述等から推測される事象	
18:00	1.0~1.5	-	14.6/18.5	東南東/南東	-	-	5	-	船首方から打ち込み 通路滞留水なし		初期状態		
19:00	2.0~3.0	-	15.8/22.1	南東/南東	-	-	5	-	船首方から打ち込み 通路滞留割合:25%~100%	通風筒各4カ所から浸水	想定状態1(滞留割合25%)~想定状態4(滞留割合100%) ⇒想定状態11(貨物艙浸水率2%・通路滞留割合75%)	打ち込み水量>放水口からの排水量	
20:00	3.0~4.5	-	18.0/24.7	南東/南東	-	-	10~20	-	船首方から打ち込み 大角度横揺れに伴う舷側からの流入・流出(通路滞留水量の変化) ハッチカバー上への滞留(0.2~0.5m)	通風筒各4カ所+ハッチカバー隙間から浸水	放水口没水角まで(通路滞留割合75%) 平均的な状況 想定状態11⇒想定状態15(貨物艙浸水率2%)⇒(貨物艙浸水率10%) :時間経過とともに浸水率増加	ブルワーク上端没水角以上(通路滞留割合0%・通路滞留水は船外水) 想定状態21⇒想定状態25(貨物艙浸水率2%)⇒(貨物艙浸水率10%) :時間経過とともに浸水率増加	横揺れ角20度>ブルワーク頂部没水角 ブルワークが海面から出入りする状況 ⇒ 通路滞留水が船外水となることで復原力が回復一方、ブルワークが抵抗となり復原しにくい状況
21:00	4.0~5.0	190	34.6/43.7	南南東/南南東	-	-	"	-	"	"	"	"	
21:30	"	201	28.9/39.6	南南西/南	225~270	111~156	"	5	"	"	"	同上 +風による横傾斜角>放水口没水角	
21:34	"	202	"	"	"	112~157	?	30	-	"	放水口没水角まで 想定状態14/想定状態15(貨物艙浸水率8%/10%)	ブルワーク上端没水角以上 想定状態24/想定状態25(貨物艙浸水率8%/10%)	横傾斜角>ブルワーク上端没水角 風による横傾斜5度+波による横揺れ⇒20度傾斜+突風⇒30度傾斜 又は、 風による横傾斜5度+波による横揺れ25度(船首方位変化)⇒30度傾斜
21:39	"	204	23.1/30.3	南南西/南南西	"	114~159	?	45	-	"	想定状態24/想定状態25(貨物艙浸水率8%/10%・通路滞留割合0%)	横傾斜角>残存復原力消失角 残存復原性範囲(傾斜角約45度)を超えて横転	

ここで、事故発生状況として③～⑤を考えると、以下の事故シナリオが想定される。

- (i) 本船は、上甲板両舷通路に平均 75%の割合で滞留水が発生した状態で風浪を受けて 10 度～20 度の横揺れをしていた。
- (ii) 21 時 30 分頃（船首方位の変化に伴い）平均風速約 30m/s の風により右舷側に約 5 度傾斜し、その角度を中心に横揺れ（10 度～20 度）するようになった。
- (iii) 21 時 34 分頃風上側（左舷側）に最大限横揺れした状態で突風（風速 40m/s）を受けて、風下側（右舷側）に戻り始めた。
- (iv) 右舷への横傾斜角がブルワーク上端没水角を超え（通路滞留水は船外水となり）、（それまでより大きく）復原力が最大となる角度以上（約 30 度）に達した。
- (v) 復原力曲線の傾きが負となる傾斜角で不安定な状態³⁾となり、また、没水したブルワークが抵抗となり復原しにくい状況に陥ったことから、引き続き波の影響で横傾斜角が増し、横傾斜角が（平均風速の風による傾斜偶力てこを考慮した残存復原力消失角に対応する）約 45 度に達して右舷に横転した。

2.2.2 事故シナリオに基づく計算

2.2.1 節で想定した事故シナリオに事故発生時の具体的な数値をあてはめて計算を行い、事故発生状況に検討を加える。以下、軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.82m$ の場合で上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が 75%、貨物艙への浸水割合が 8%の状態を例に事故シナリオに基づく計算を説明する。

1) 復原力曲線

1.1.3 節で説明したように、ブルワーク上端が没水すると、実質的には全ての通路滞留水は船外水と見なして復原力は通路滞留水がない貨物艙のみ浸水した状態に遷移すると考えられる。

図 14 に貨物艙への浸水割合が 8%の状態の復原力曲線を示す。通路への打ち込み滞留水の割合が 75%で貨物艙への浸水割合が 8%の状態（想定状態 14）におけるブルワーク上端没水角（ ϕ_B ）は 12.6 度（表 13）である。上述した考え方に従うと、横傾斜角を ϕ とした場合、 $0 \leq \phi \leq \phi_B$ では想定状態 14（通路打ち込み滞留水割合 75%）の復原力、 $\phi_B \leq \phi$ では打ち込み滞留水の割合が 0%で貨物艙への浸水割合が 8%の状態（付録 1，想定状態 24）の復原力となる。なお、図中赤点線は $0 \leq \phi \leq \phi_B$ における想定状態 24（通路打ち込み滞留水割合 0%）の復原力曲線、緑点線は $\phi_B \leq \phi$ における想定状態 14（通路打ち込み滞留水割合 75%）の復原力曲線を示している。

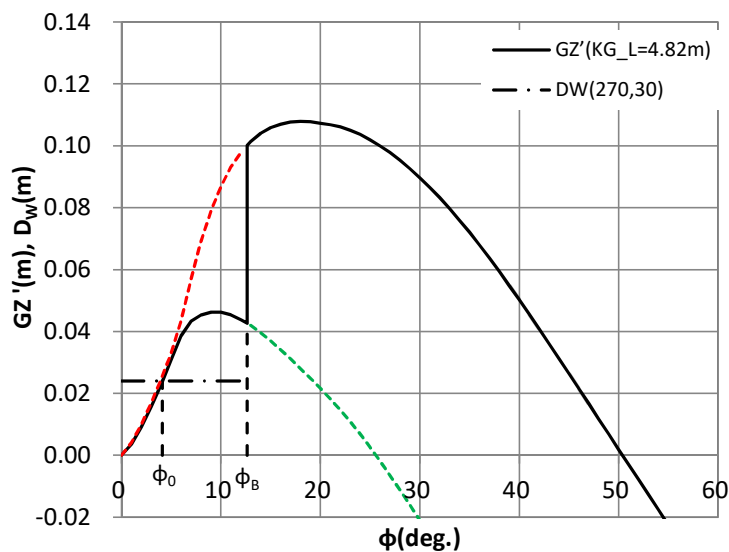


図 14 事故発生時の復原力曲線（想定状態 14，想定状態 24： $KG_L=4.82m$ ）及び風による傾斜偶力てこ（船首方位：270 度，風速：30m/s；想定状態 14）

この状態で10度～20度の横揺れをすると(事故シナリオ(i)), 横揺れ振幅によっては横傾斜角がブルワーク上端没水角の12.6度(ϕ_B)を超え復原力が急変する状況になると想定されるが, 定傾斜が付いていない状態であるため, 直立状態を中心に左右対称の横揺れ(左舷側と右舷側の横揺れ片振幅は等しい)になると考えられる。

2) 風による傾斜角と横揺れ振幅

表18, 表19に示した事故発生時の風による傾斜角の推定結果は, 図14に示した復原力 GZ' と風による傾斜偶力 D_w が一致する ϕ_0 に対応する角度である。図14には想定状態14で軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.82m$ の場合の復原力 GZ' (実線)と船首方位270度で風速30m/sの風による傾斜偶力 $D_w(270,30)$ (一点鎖線)を取っているので, ϕ_0 は4.1度(表19)で右舷側への傾斜を表している。

風により ϕ_0 だけ横傾斜(定傾斜)した状態で波により横揺れする場合, 復原力曲線の性状によっては, 左舷側への横揺れと右舷側への横揺れで振幅が異なる非対称横揺れとなる。このような場合の横揺れ振幅を船舶検査心得⁴⁾では横揺れ中心を ϕ_0 として式(4)及び式(5)で計算している。

$$\int_{\phi_{1p}}^{\phi_0} (D_w - \overline{GZ'}) d\phi = \int_{\phi_0}^{\phi_{1s}} (\overline{GZ'} - D_w) d\phi \quad (4)$$

$$|\phi_{1p} - \phi_0| + |\phi_{1s} - \phi_0| = 2 \cdot \phi_a \quad (5)$$

ここで, ϕ_{1p} は左舷側の最大傾斜角, ϕ_{1s} は右舷側の最大傾斜角, ϕ_a は想定している波による横揺れ振幅であり, 式(5)左辺第1項が左舷側への横揺れ片振幅を第2項が右舷側への横揺れ片振幅を示している。

図14に示した状態で, ϕ_a として10度～20度の横揺れ(事故シナリオ(ii))の中央値15度を取って, 式(4)及び式(5)の計算を行うと, 左舷側の最大傾斜角 ϕ_{1p} は11.1度, 右舷側の最大傾斜角 ϕ_{1s} は18.9度となる(図15)。但し, 式(4)の計算を行う際に, 横傾斜角がブルワーク上端没水角の12.6度(ϕ_B)を超えた場合, 復原力が通路滞留水のない貨物艙のみ浸水した状態(想定状態24)に遷移すると同時に, 風による傾斜偶力も想定状態24の傾斜偶力に遷移すると仮定している。

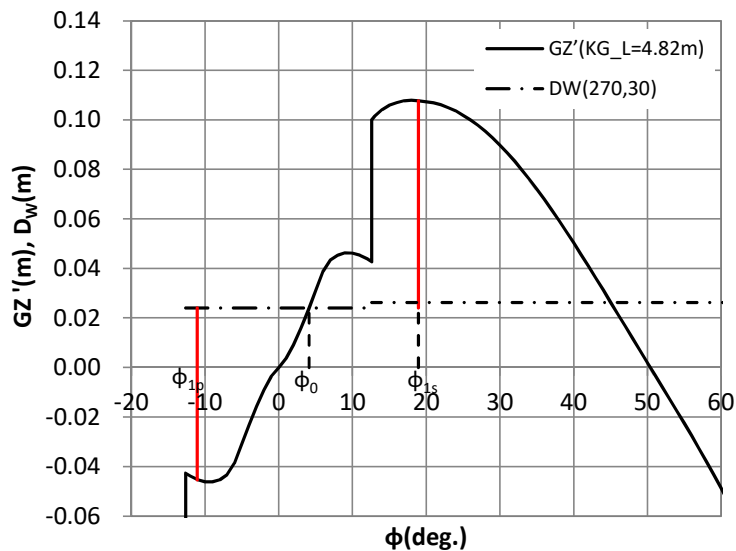


図15 定傾斜状態の横揺れの計算(想定状態14, 想定状態24: $KG_L=4.82m$, 横揺れ中心 ϕ_0 : 4.1度, 波による横揺れ振幅: 15度)

3) 右舷側への最大横傾斜角の計算

波上側(左舷側)に最大限横揺れした状態($\phi = \phi_{1p}$)で突風(風速40m/s)を受けて, 風下側(右舷側)に戻る場合(事故シナリオ(iii), (iv))の右舷側への最大横傾斜角を ϕ_0 とすると, ϕ_0 は船舶復原性規則のC係数基準と同様のエネルギーバランスの考え方にに基づき求めることができる。

今、突風による傾斜偶力を D_{wg} 、突風が準静的に作用した場合の横傾斜角を ϕ_2 とすると右舷側への傾斜エネルギー (a) は式(6)で表されることから、右舷側への最大横傾斜角 ϕ_t はエネルギーバランスの考え方から式(7)を満たすことになる。なお、 ϕ_3 を突風による傾斜偶力を考慮した残存復原力消失角とすると、傾斜エネルギーを吸収する全動復原力 (b) は式(8)で表されるので、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 ($c=b/a$) を求めることができる。

$$a = \int_{\phi_{1p}}^{\phi_2} (D_{wg} - \overline{GZ'}) d\phi \quad (6)$$

$$\int_{\phi_2}^{\phi_t} (\overline{GZ'} - D_{wg}) d\phi = a \quad (7)$$

$$b = \int_{\phi_2}^{\phi_3} (\overline{GZ'} - D_{wg}) d\phi \quad (8)$$

エネルギーバランスの計算に使用した図を図 16 に示す。船首方位 270 度で風速 40m/s の風による傾斜偶力を $D_{w(270,40)}$ を突風による傾斜偶力を D_{wg} とすると、突風が準静的に作用した場合の横傾斜角 ϕ_2 は 6.9 度 (表 19) であり、左舷側への最大傾斜角として 2) で計算した値 ($\phi_{1p} = -11.1 \text{deg.}$) を用いて式(6)~式(8)の計算を行うと、右舷側への最大傾斜角 ϕ_t は 29.2 度、動復原力と傾斜エネルギーの比 $c(b/a)$ は 1.29 となる。なお、式(7)及び式(8)の計算を行う際に、横傾斜角がブルワーク上端没水角の 12.6 度 (ϕ_B) を超えた場合、復原力が通路滞留水のない貨物艙のみ浸水した状態 (想定状態 24) に遷移すると同時に、風による傾斜偶力も想定状態 24 の傾斜偶力に遷移すると仮定した。

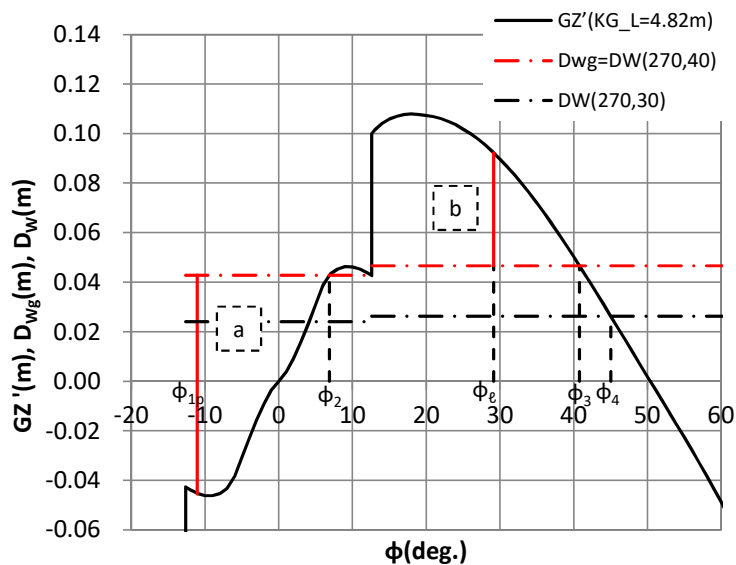


図 16 エネルギーバランスの計算 (想定状態 14, 想定状態 24 : $KG_L=4.82\text{m}$, 船首方位 : 270 度, 風速 : 40m/s, 左舷側最大横傾斜角 ϕ_{1p} : -11.1 度)

4) 右舷側への最大横傾斜角と復原力の最大値が生じる傾斜角の比較

3) で説明したように、事故シナリオに基づく計算を行うと、軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.82\text{m}$ で上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が 75%、貨物艙への浸水割合が 8% の状態で船首方位が 270 度の場合、平均風速 30m/s の風を受け、波により両振幅で 30 度の横揺れしている状況で、左舷側に最大限横揺れした状態で風速 40m/s の突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角は 29.2 度になる。

一方、この状態での復原力の最大値が生じる傾斜角は約 18 度であり、右舷側への最大傾斜角 29.2 度では復原力曲線の傾斜は負となる (図 16)。そのため、突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角では不安定な状態³⁾ となり、また、没水したブルワークが抵抗となり復原しにくい状況に陥ることから、引き続き波の影響で横傾斜

角が増すことが想定される（事故シナリオ(v)）。図 16 に示した状態で平均風速 30m/s の風を受けた場合の残存復原力消失角は ϕ_4 に対応し、45.1 度と計算される。

5) 事故シナリオに基づく計算のまとめ

軽荷状態の重心高さ 2 ケース (4.49m, 4.82m) , 貨物艙への浸水割合 6 ケース (0%~10%, 2%刻み) , 船首方位 2 ケース (225 度, 270 度) の組合せで上述した 1)~3)の計算を行った結果を表 21~表 24 に示す。表 21 及び表 22 は船首方位を 225 度とした場合の計算結果で、表 21 は軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の計算結果、表 22 は KG_L=4.82m の計算結果である。また、表 23 及び表 24 は船首方位を 270 度とした場合の計算結果で表 23 は軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の計算結果、表 24 は KG_L=4.82m の計算結果である。各表には、貨物艙への浸水割合 6 ケース分の計算結果をまとめて示しており、突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角が復原力の最大値が生じる傾斜角を超える状態を黄色で塗りつぶしている。

表 21 エネルギーバランス計算結果 (KG_L=4.49m, 船首方位 225 度)

貨物艙 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_l (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (m·deg.)	b (m·deg.)	c (=b/a)
0%	0.5	-14.4	0.9	15.5	16.2	25.5	73.6	74.3	2.87	19.38	6.75
2%	2.4	-14.4	3.0	14.7	16.5	26.0	72.3	73.1	1.99	14.44	7.24
4%	3.1	-14.3	3.8	14.0	16.8	25.5	69.1	70.0	1.45	10.04	6.94
6%	2.4	-14.3	3.7	13.3	17.2	23.5	63.1	64.3	1.06	6.10	5.75
8%	1.9	-14.0	2.9	12.6	18.2	20.5	51.5	53.2	0.79	2.92	3.70
10%	1.4	-13.3	2.3	11.9	21.5	11.0	35.2	37.1	0.57	0.88	1.54

表 22 エネルギーバランス計算結果 (KG_L=4.82m, 船首方位 225 度)

貨物艙 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_l (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (m·deg.)	b (m·deg.)	c (=b/a)
0%	0.6	-14.4	1.0	15.5	16.3	23.5	67.9	68.5	2.70	15.93	5.90
2%	2.6	-14.4	3.2	14.7	16.6	24.0	66.5	66.5	1.86	11.63	6.26
4%	3.4	-14.3	4.1	14.0	16.9	23.5	63.2	64.2	1.34	7.96	5.95
6%	2.8	-14.2	4.1	13.3	17.4	22.0	57.2	58.5	0.98	4.78	4.89
8%	2.0	-13.9	3.1	12.6	18.5	18.0	46.7	48.3	0.73	2.33	3.19
10%	1.5	-13.2	2.4	11.9	22.2	10.5	33.4	35.2	0.54	0.75	1.38

表 23 エネルギーバランス計算結果 (KG_L=4.49m, 船首方位 270 度)

貨物艙 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_l (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (m·deg.)	b (m·deg.)	c (=b/a)
0%	1.3	-13.7	2.2	15.5	18.3	25.5	71.3	73.0	3.11	17.00	5.47
2%	3.4	-13.4	4.4	14.7	19.0	26.0	69.6	71.6	2.27	12.26	5.41
4%	4.4	-13.1	5.5	14.0	20.1	25.5	65.9	68.2	1.74	8.10	4.65
6%	4.6	-12.5	6.1	13.3	22.0	23.5	58.6	61.9	1.34	4.45	3.31
8%	3.9	-11.4	6.2	12.6	26.8	20.5	45.2	49.7	1.01	1.69	1.67
10%	3.2	-8.2	6.0	11.9	-	11.0	27.2	33.2	0.66	0.14	0.22

表 24 エネルギーバランス計算結果 (KG_L=4.82m, 船首方位 270 度)

貨物艙 浸水割合	ϕ_0 (deg.)	ϕ_{1p} (deg.)	ϕ_2 (deg.)	ϕ_B (deg.)	ϕ_ℓ (deg.)	ϕ_{max} (deg.)	ϕ_3 (deg.)	ϕ_4 (deg.)	a (m・deg.)	b (m・deg.)	c (=b/a)
0%	1.4	-13.6	2.4	15.5	18.5	23.5	65.5	67.2	2.94	13.75	4.68
2%	3.6	-13.3	4.6	14.7	19.4	24.0	63.6	65.7	2.13	9.65	4.52
4%	4.7	-12.9	5.8	14.0	20.7	23.5	59.7	62.3	1.64	6.21	3.79
6%	4.9	-12.3	6.4	13.3	22.9	22.0	52.1	55.8	1.27	3.33	2.63
8%	4.1	-11.1	6.9	12.6	29.2	18.0	40.8	45.1	0.96	1.24	1.30
10%	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

これらの表から、今回の計算を行った範囲では、①突風を受けた場合の右舷側への最大傾斜角 ϕ_ℓ が復原力の最大値が生じる傾斜角 ϕ_{max} を超えるのは、貨物艙への浸水割合が 6%以上となる状態に限られること、②その内、2.2.1 節で想定した事故シナリオに対応する残存復原力消失角 ϕ_4 が 45 度程度となるのは、貨物艙への浸水割合が 8%であること、③船首方位 270 度で貨物艙への浸水割合が 10%の状態では、左舷側に最大限横揺れした状態で突風を受けた場合に一気に横転する (KG_L=4.49m : 表 23) か、突風単独で作用した場合に釣り合い状態がなく横転する (KG_L=4.82m : 表 24) ことなどが分かる。よって、本事故の状況において本船が横転するのは、軽荷状態の重心高さ KG_L=4.82m で貨物艙への浸水割合 8%の状態では船首方位が 270 度であった場合と考えられる。

参考文献

- 1) 森田知治：船舶復原論 - 基礎と応用 - , pp.127-128, 海文堂, 昭和 60 年 4 月.
- 2) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂：成分分離型モデルと利用した新しい風圧力推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 2, pp. 243-255, 平成 17 年 10 月.
- 3) 渡辺恵弘：非対称横揺の不安定性に関する一考察, 西部造船会々報, 第 34 号, pp.59-71, 昭和 42 年 7 月.
- 4) 運輸省海上技術安全局監修, 船舶安全法関係規則研究会編：船舶検査心得準拠 船舶安全法関係規則解釈集, p.507, 成山堂, 平成 12 年 2 月.

付録1 上甲板両舷通路の打ち込み滞留水がない場合の検討

事故発生時には貨物艙内への浸水が生じた可能性があるとのことから、上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が75%となるような状況（想定状態3）で更に貨物艙内に浸水が生じたとして、貨物艙内の浸水量を変化させて事故発生時の復原性能を推定（1.2節）するとともに、風による横傾斜角を推定（2.1節）し、その影響を調べた。ここでは、上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が0%（初期状態：通路滞留水なし）の状況で、同様の調査を行った結果を報告する。

（1）事故発生時の復原性能

上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が0%の状況（初期状態）で更に貨物艙内に浸水が生じたとして、貨物艙内の浸水量を変化させて事故発生時の復原性能を推定し、その影響を調べた。

ここでは、貨物艙への浸水は底面（二重底上面）に初期状態のトリム（船尾トリム0.50m：表7）に応じて滞留するとして、貨物艙への浸水割合に対して、浸水重量（ W_H' ）、重心位置（ C_{HL} ：前後位置、 C_{HV} ：上下位置）を求めた（表A1-1、表A1-2）。表A1-1、表A1-2で貨物艙への浸水重量は喫水検査時の海水の比重（ $\gamma=1.019$ ）を用いて計算した。また、前後方向の重心位置 C_{HL} は各貨物艙の後部隔壁（No.1貨物艙：Fr.74、No.2貨物艙：Fr.28）を基準とし、上下位置 C_{HV} は二重底上面を基準として示している。浸水を想定した状態のトリムが異なるため、通路への打ち込み滞留水の割合が75%の状態（表9、表10）と比較すると、浸水割合に対する浸水重量 W_H' は同一であるが、前後方向の重心位置 C_{HL} は0.04m～0.29m後方に位置する。一方、上下方向の重心位置は、上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が0%の状態と75%の状態で大きな違いは見られない。

表 A1-1 想定した貨物艙への浸水（No.1 貨物艙）

浸水割合 (%)	浸水重量 W_H' (tf)	前後重心 C_{HL} (m)	上下重心 C_{HV} (m)
2%	40.8	10.41	0.087
4%	81.5	11.50	0.164
6%	122.3	11.87	0.243
8%	163.0	12.05	0.322
10%	203.8	12.16	0.402

表 A1-2 想定した貨物艙への浸水（No.2 貨物艙）

浸水割合 (%)	浸水重量 W_H' (tf)	前後重心 C_{HL} (m)	上下重心 C_{HV} (m)
2%	46.6	10.67	0.078
4%	93.2	12.21	0.141
6%	139.8	12.72	0.207
8%	186.4	12.98	0.274
10%	232.9	13.13	0.342

表 A1-3 計算状態（貨物艙への浸水の影響）

	W (tf)	mid-G (m)	KG1 (m)	KG2 (m)	備考
初期状態	4424.8	-0.285	3.877	3.967	通路0%
想定状態21	4512.2	-0.250	3.825	3.901	通路0%+貨物艙2%
想定状態22	4599.5	-0.165	3.778	3.839	通路0%+貨物艙4%
想定状態23	4686.9	-0.084	3.735	3.781	通路0%+貨物艙6%
想定状態24	4774.2	-0.006	3.696	3.726	通路0%+貨物艙8%
想定状態25	4861.6	0.070	3.661	3.674	通路0%+貨物艙10%

表 A1-3 に貨物艙への浸水の影響を調べるために復原性能の計算を行った状態の排水量 (W) , 重心位置 (mid-G : 前後位置, KG : 上下位置) をまとめて示す。KG1 は軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の場合の重心の上下位置 (重心高さ) であり, KG2 は KG_L=4.82m の場合の重心高さである。表中には参考のため, 貨物艙への浸水がない状態 (初期状態) の値も示している。

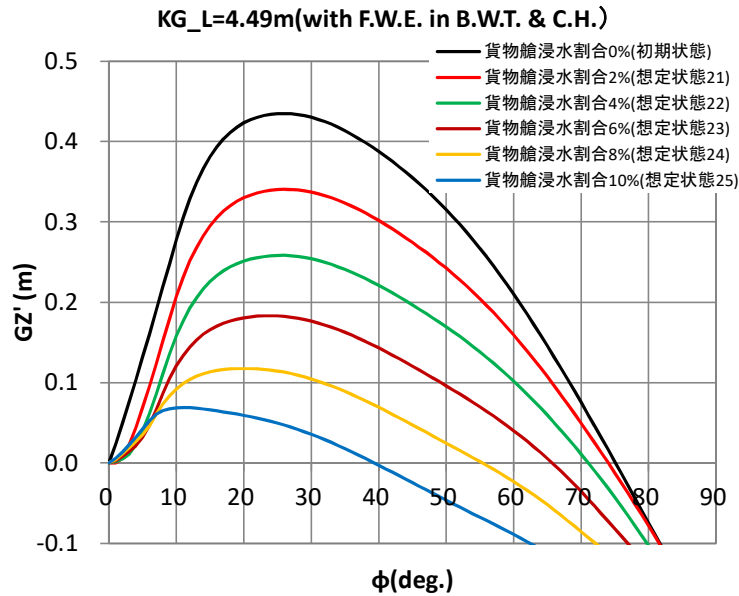


図 A1-1 復原力曲線 (貨物艙への浸水の影響 : KG_L=4. 49m)

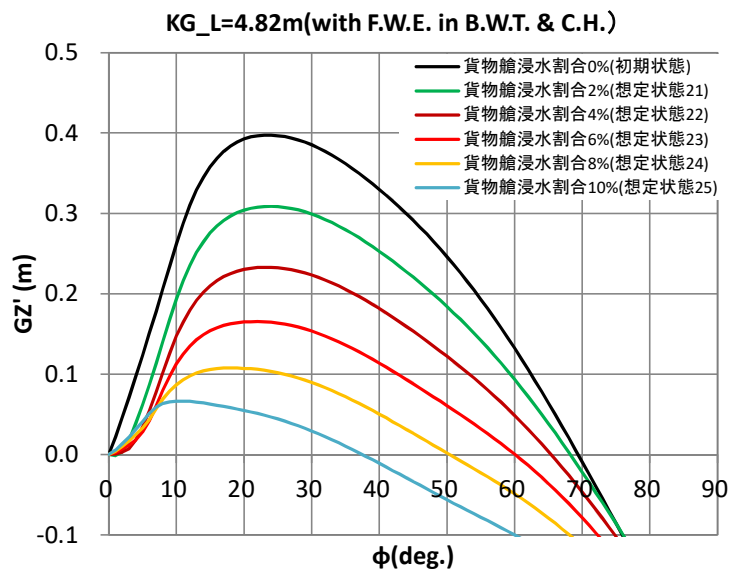


図 A1-2 復原力曲線 (貨物艙への浸水の影響 : KG_L=4. 82m)

各状態の復原力計算結果を図 A1-1 及び図 A1-2 に示す。1.2 節と同様に, 貨物艙に侵入した海水については, 平面形状を長さ及び底面積を実際の貨物艙と一致させた相当矩形平面で近似した貨物艙を想定して, 横傾斜に伴う貨物艙浸水の重心位置の変化として自由水影響を考慮した¹⁾。

貨物艙内の浸水量が増加すると, 全般的に復原力が低下するとともに, 復原力の特性を示す復原力消失角 (ϕ_v) や復原力範囲 (ϕ_R) が小さくなり, 復原力の最大値 (GZ_{max}) や GZ_{max} が生じる横傾斜角 (ϕ_{max}) も小さくなっていることが分かる。例えば, 軽荷状態の重心高さ KG_L=4.49m の場合, 図 A1-1 で緑線で示した浸水割合 4%

(想定状態 22 : No.1 貨物艙浸水重量 81.5tf, No.2 貨物艙浸水重量 93.2tf) では, 復原力消失角 ϕ_v は約 72 deg. で, 復原力の最大値 GZ_{max} は約 0.26m, 復原力の最大値が生じる横傾斜角 ϕ_{max} は約 26deg. となっており, 黒線で示した貨物艙への浸水がない場合 (初期状態: $\phi_v \doteq 75$ deg., $GZ_{max} \doteq 0.43$ m, $\phi_{max} \doteq 26$ deg.) に比べて, 復原力の最大値は約 4 割小さくなるが, 復原力消失角や復原力の最大値が生じる横傾斜角はそれほど大きな違いはない。

表 A1-4 メタセンタ高さ, 喫水及びトリムの計算結果 (貨物艙への浸水の影響)

	GM1 (m)	GM2 (m)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)
初期状態	1.45	1.36	5.80	5.30	5.55	0.50
想定状態21	0.10	0.02	5.87	5.42	5.65	0.45
想定状態22	0.19	0.13	5.92	5.56	5.74	0.36
想定状態23	0.27	0.23	5.97	5.71	5.84	0.26
想定状態24	0.36	0.33	6.01	5.85	5.93	0.16
想定状態25	0.43	0.42	6.06	6.00	6.03	0.06

また, 貨物艙とバラスタンの自由水影響を考慮したメタセンタ高さ (GM), 喫水 (da: 船尾喫水, df: 船首喫水, dm: 中央喫水) 及びトリム (τ : 船尾トリム正) の計算結果を表 A1-4 にまとめて示す。メタセンタ高さは, 復原力曲線の原点 (横傾斜角 0 度) における接線の傾斜に対応する²⁾ ことから, 本解析調査のように自由水影響を横傾斜に伴う貨物艙浸水やバラスタンの残水の重心位置の変化として考慮した場合であっても, メタセンタ高さについては自由水影響を見かけの重心上昇として取り扱った場合と一致することが示されている¹⁾。そのため, 表 A1-4 に示したように貨物艙の浸水を想定した場合, 大きな自由水影響によりメタセンタ高さは貨物艙の浸水がない場合 (初期状態) に比べ大幅に減少する。例えば, $KG_L=4.49$ m の場合, 想定状態 21 の浸水割合 2% (浸水重量: No.1 貨物艙 40.8tf, No.2 貨物艙 46.6tf) では, メタセンタ高さ (GM1) は 0.10m となり, 初期状態のメタセンタ高さ (1.45m) の 7%程度となる。

一方, 想定した貨物艙の浸水量が少ないため, 自由水影響は比較的小さな横傾斜角に限定され, 例えば, 浸水割合 2% (想定状態 21) で $KG_L=4.82$ m の場合, 自由水影響を考慮したメタセンタ高さ (GM2) は 0.02m (表 A1-4) と非常に小さいが, 横傾斜角が 2 度程度からプロメタセンタ高さが大きくなり, 横傾斜角約 24 度で最大値約 0.31m と有意な復原力を示すようになる (図 A1-2)。

表 A1-5 に各状態における Fr.34 位置の放水口, ブルワーク上端と船尾楼甲板上的燃料タンクの空気抜き管の没水角の計算結果を示す。表 A1-5 から, 貨物艙への浸水量が増加するに従い没水角は小さくなり, 貨物艙への浸水割合が 10% の場合 (想定状態 25) には, 放水口の没水角は 5.9 度, ブルワーク上端の没水角は 13.4 度, 空気抜き管の没水角は 25.8 度~27.6 度となり, 貨物艙への浸水がない状態 (初期状態) に比べ没水角は 3~4 度程度小さくなる事が分かる。

表 A1-5 放水口, ブルワーク上端及び空気抜き管の没水角の計算結果 (貨物艙への浸水の影響)

	放水口	ブルワーク上端	空気抜き管		
	Fr.34	Fr.34	左舷①	左舷②	右舷
初期状態	9.2	17.0	29.6	31.3	29.4
想定状態21	8.5	16.2	28.8	30.4	28.6
想定状態22	7.8	15.5	28.1	29.8	27.9
想定状態23	7.2	14.9	27.4	29.1	27.3
想定状態24	6.5	14.1	26.6	28.4	26.5
想定状態25	5.9	13.4	25.9	27.6	25.8

(2) 事故発生時の風による横傾斜角

ここでは, 事故発生時の状態として, 上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が 0% となるような状況で更に貨物艙内に浸水が生じたとして, 貨物艙内の浸水量を変化させて事故発生時の復原性能を推定した 6 つの状態 (通

路滞留水 0%+貨物艙浸水 0%~10%) (表 A1-6) について、指定された風速、風向角及び船首方位 (表 A1-7 : 表 15 再掲) において船体に作用する風による傾斜モーメントと横傾斜角を推定した。

表 A1-6 計算を行った船体状態

	W (tf)	da (m)	df (m)	dm (m)	τ (m)	備考
初期状態	4424.8	5.80	5.30	5.55	0.50	通路0%
想定状態21	4457.7	5.87	5.42	5.65	0.45	通路0%+貨物艙2%
想定状態22	4523.4	5.92	5.56	5.74	0.36	通路0%+貨物艙4%
想定状態23	4441.2	5.97	5.71	5.84	0.26	通路0%+貨物艙6%
想定状態24	4589.1	6.01	5.85	5.93	0.16	通路0%+貨物艙8%
想定状態25	4589.1	6.06	6.00	6.03	0.06	通路0%+貨物艙10%

表 A1-7 計算条件 (風速, 風向角及び船首方位 co.)

風速 [m/s]	風向 [deg.]	co. [deg.]	speed [kn]	相対風速 [m/s]	相対風向 [deg.]
30.0	202.5	225.0	0.0	30.0	22.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	
30.0		270.0		30.0	67.5
35.0				35.0	
40.0				40.0	

(i) 風による傾斜モーメントの計算

風による傾斜モーメント K_A は式(A1-1) (式(1)再掲) で求めた。

$$K_A = C_K q_A A_L H_L \quad (\text{A1-1})$$

ここで、 C_K は風による傾斜モーメント係数であり藤原の式³⁾を基に推定した (付録 2)。 q_A は動圧であり、空気密度を ρ_A 、相対風速を U_A として式(A1-2) (式(2)再掲) で定義される。また、 A_L は水面上船体・上載構造の側面投影面積、 H_L は水面上船体・上載構造の側面の平均高さ ($H_L = A_L / L_{OA}$) であり、一般配置図から事故発生時の状態の喫水線 (表 12 : 船尾喫水 da, 船首喫水 df) より上部の値を求めた。

$$q_A = \frac{1}{2} \rho_A U_A^2 \quad (\text{A1-2})$$

表 A1-8 風による傾斜モーメントの推定に用いたパラメータ

	LOA(m)	B(m)	A_F (m ²)	A_L (m ²)	A_{OD} (m ²)	C(m)	H _C (m)	H _{BR} (m)
初期状態	82.65	13.00	147.28	327.98	143.15	-3.65	2.98	15.67
想定状態21			143.88	320.23		-3.81	2.88	15.56
想定状態22			139.79	312.39		-4.06	2.79	15.43
想定状態23			135.56	304.30		-4.33	2.69	15.30
想定状態24			131.48	296.42		-4.61	2.61	15.17
想定状態25			127.22	288.34		-4.92	2.52	15.04

表 A1-8 に藤原の式で用いられる船体外観を表現する 8 つのパラメータをまとめて示す。LOA は全長、B は船幅、 A_F は水面上船体・上載構造の正面投影面積、 A_{OD} は上載構造側面投影面積、C は船体中心から側面積中心までの前後方向座標 (船首方向正)、 H_C は喫水から側面積中心までの高さ、 H_{BR} は喫水から主要構造物 (ブリッジ) の最高位である。2.1 節に示した上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が 75% の場合 (表 16) に比べて、喫水が浅いため、投影面積 (A_L , A_F) や高さ方向のパラメータ (H_C , H_{BR}) の値が増加している。一方、船体中心から側面積中心までの前後方向座標 C は船体中央寄りになっている。

表 A1-9 に藤原の式を基に推定した風による傾斜モーメント係数 C_K と風による傾斜モーメント K_A の推定結果を計算した状態毎に示す。なお、表中 D_W は傾斜モーメントから算定した傾斜偶力てこ ($D_W=K_A/W$) である。今回計算した状態では、貨物艙への浸水が増加するに従い、風による傾斜モーメント係数 C_K も増加する。一方、貨物艙への浸水が増加するに従い、喫水が深くなり、水面上船体・上載構造の側面投影面積 A_L が減少し(表 A1-8)、水面上船体・上載構造の側面の平均高さ $H_L(=A_L/L_{OA})$ も減少することから、風による傾斜モーメント K_A は減少し、傾斜偶力てこ D_W も減少する(表 A1-9)。

また、図 A1-3～図 A1-10 に計算した各状態の復原力と風による傾斜偶力てこを比較して示す。上述したように貨物艙への浸水が増加するに従い復原力 GZ' も傾斜偶力てこ D_W も減少するが、復原力 GZ' の減少の方がより顕著である。そのため、図 A1-3～図 A1-10 において実線で示した復原力曲線 GZ' の横軸に平行な傾斜偶力てこ D_W より上方の部分に対応する残存復原力 (GZ'_R) は、貨物艙への浸水が増加するのに伴い大きく減少していることが分かる。特に貨物艙浸水割合 10% の状態(想定状態 25)では、船首方位 270deg. で風速 40m/s の場合(傾斜偶力てこ：緑一点鎖線)、軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合(黒実線)であっても、残存復原力範囲は 22 度程度となる。

表 A1-9 風による傾斜モーメントの推定結果

			初期状態:貨物艙浸水割合0%			想定状態21:貨物艙浸水割合2%			想定状態22:貨物艙浸水割合4%			想定状態23:貨物艙浸水割合6%		
風速 [m/s]	風向 [°]	co. [°]	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)
30.0	202.5	225.0	0.725	56.00	0.013	0.738	54.30	0.012	0.748	52.42	0.011	0.759	50.47	0.011
35.0				76.22	0.017		73.91	0.016		71.35	0.016		68.69	0.015
40.0				99.56	0.022		96.54	0.021		93.19	0.020		89.72	0.019
30.0		270.0	1.823	140.81	0.032	1.865	137.27	0.030	1.903	133.34	0.029	1.944	129.22	0.028
35.0				191.65	0.043		186.85	0.041		181.49	0.039		175.88	0.038
40.0				250.32	0.057		244.04	0.054		237.05	0.052		229.72	0.049

			想定状態24:貨物艙浸水割合8%			想定状態25:貨物艙浸水割合10%		
風速 [m/s]	風向 [°]	co. [°]	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)	C _K (-)	K _A (tf*m)	D _w (m)
30.0	202.5	225.0	0.770	48.57	0.010	0.781	46.59	0.010
35.0				66.11	0.014		63.42	0.013
40.0				86.34	0.018		82.83	0.017
30.0		270.0	1.984	125.16	0.026	2.026	120.91	0.025
35.0				170.36	0.036		164.57	0.034
40.0				222.51	0.047		214.95	0.044

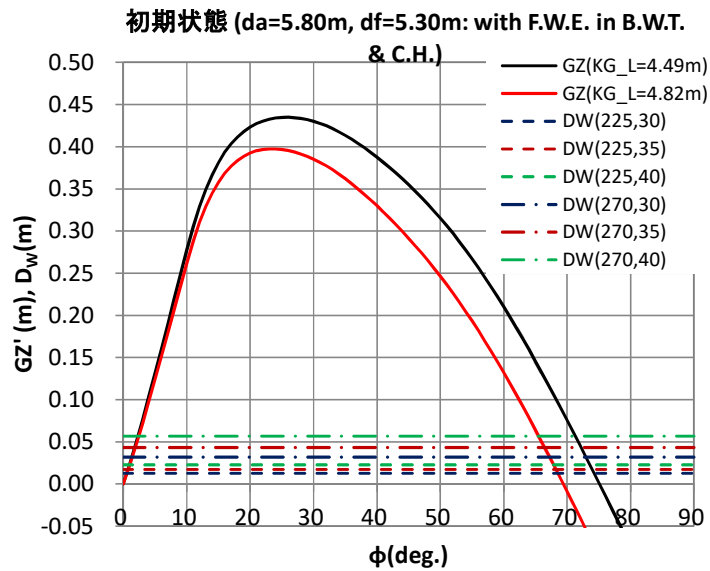


図 A1-3 復原力と風による傾斜偶力てこ（初期状態：貨物艙浸水割合 0%）

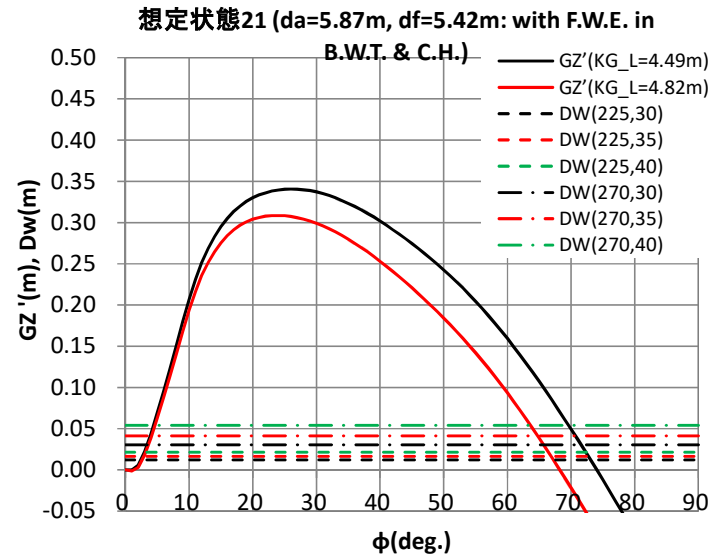


図 A1-4 復原力と風による傾斜偶力てこ（想定状態 21：貨物艙浸水割合 2%）

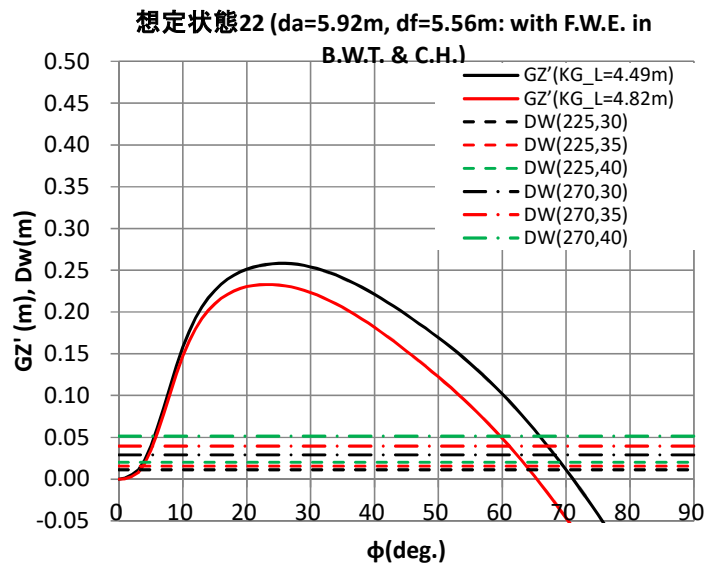


図 A1-5 復原力と風による傾斜偶力てこ（想定状態 22：貨物艙浸水割合 4%）

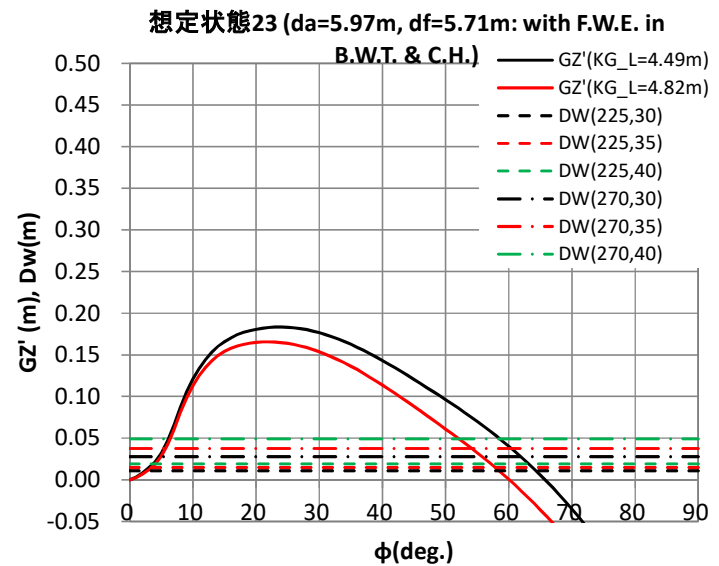


図 A1-6 復原力と風による傾斜偶力てこ（想定状態 23：貨物艙浸水割合 6%）

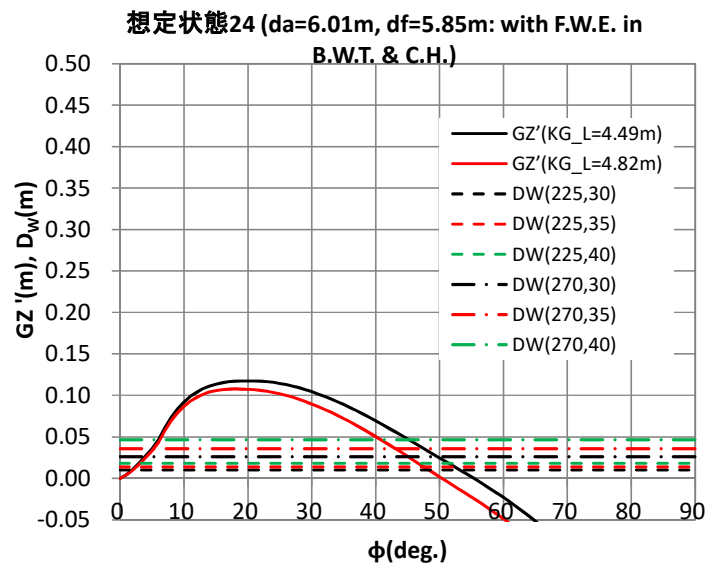


図 A1-7 復原力と風による傾斜偶力てこ (想定状態 24: 貨物艙浸水割合 8%)

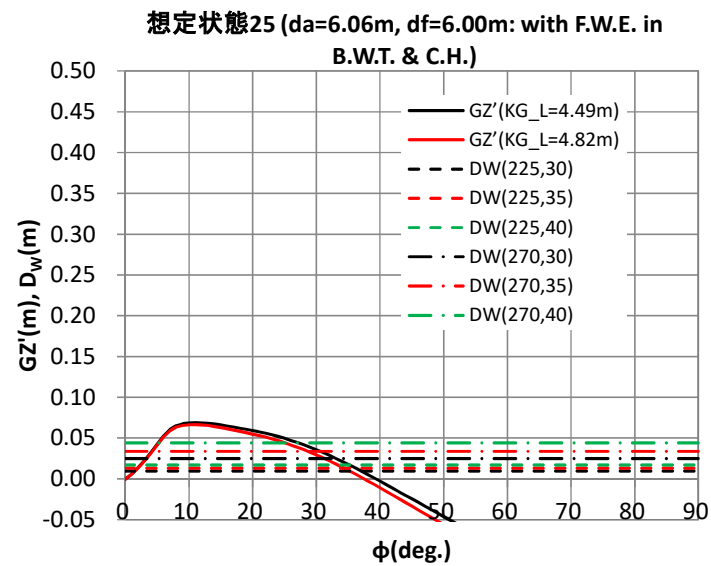


図 A1-8 復原力と風による傾斜偶力てこ (想定状態 25: 貨物艙浸水割合 10%)

(ii) 風による横傾斜角

風による横傾斜角 ϕ_{wind} は、図 A1-3～図 A1-8 で復原力 (GZ') 曲線と傾斜偶力てこ (D_w) の交点の傾斜角に対応する (式(A1-3))。

$$GZ'(\phi_{wind}) = D_w \left(= \frac{K_A}{W} \right) \quad (A1-3)$$

軽荷状態の重心高さ $KG_L=4.49m$ の場合の風による横傾斜角の推定結果を表 A1-10 に、 $KG_L=4.82m$ の場合の風による横傾斜角の推定結果を表 A1-11 に示す。また、風による横傾斜角の推定結果を横軸に貨物艙への浸水割合をとって図 A1-9 ($KG_L=4.49m$) 及び図 A1-1 ($KG_L=4.82m$) に示す。

表 A1-10 風による横傾斜角の推定結果 ($KG_L=4.49m$)

船首方位(deg.)	225.0			270.0		
	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
風速(m/s)	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
初期状態	0.5	0.7	1.0	1.3	1.8	2.3
想定状態21	2.4	2.7	3.0	3.4	3.9	4.4
想定状態22	3.1	3.4	3.8	4.4	5.0	5.5
想定状態23	2.4	3.1	3.7	4.6	5.4	6.1
想定状態24	1.9	2.4	2.9	3.9	5.0	6.0
想定状態25	1.5	1.9	2.4	3.2	4.2	5.2

表 A1-11 風による横傾斜角の推定結果 ($KG_L=4.82m$)

船首方位(deg.)	225.0			270.0		
	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
風速(m/s)	30.0	35.0	40.0	30.0	35.0	40.0
初期状態	0.6	0.8	1.0	1.4	1.9	2.4
想定状態21	2.6	2.9	3.2	3.6	4.1	4.7
想定状態22	3.4	3.7	4.1	4.7	5.2	5.8
想定状態23	2.8	3.4	4.1	4.9	5.7	6.4
想定状態24	2.0	2.5	3.1	4.2	5.3	6.2
想定状態25	1.5	2.0	2.4	3.3	4.2	5.3

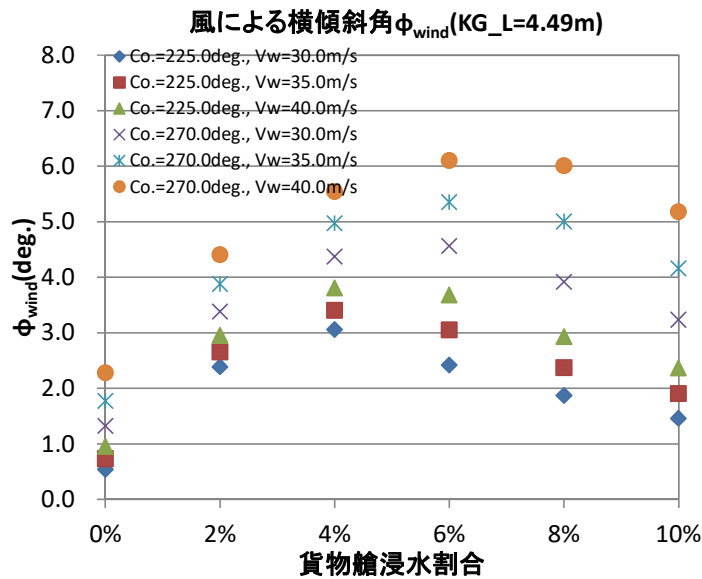


図 A1-9 風による横傾斜角 (貨物艙への浸水の影響 : $KG_L=4.49m$)

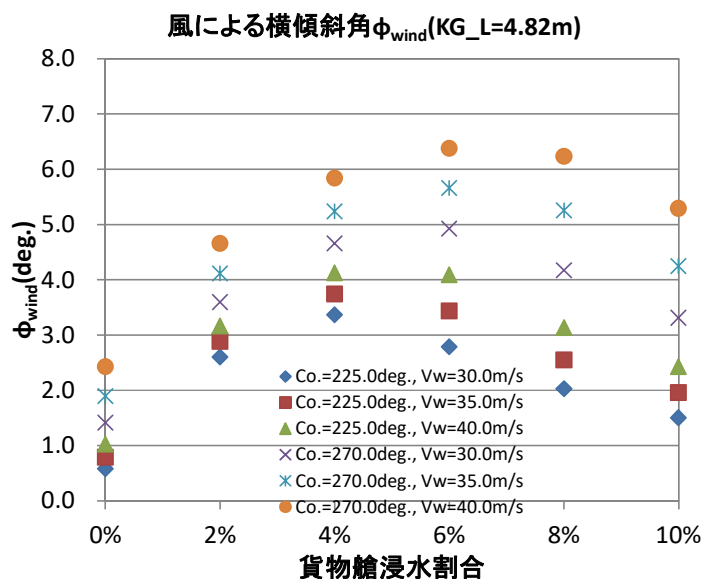


図 A1-10 風による横傾斜角（貨物艙への浸水の影響：KG_L=4.82m）

今回計算した状態では、船首方位及び風速が同じ条件で貨物艙への浸水量が増加した場合、浸水割合が4%（想定状態22）までは浸水量の増加に伴い風による横傾斜角は増加する。しかしながら、貨物艙への浸水量の増加に伴う復原力 GZ' と風による傾斜偶力 D_w の減少が一様でないため、浸水割合が4%を超えると、船首方位及び風速の組合せによっては、浸水量の増加に伴い横傾斜角が減少する場合がある。また、浸水割合が6%を超えると全ての船首方位及び風速の組合せで浸水量の増加に伴い横傾斜角が減少する。

なお、2.1節で示した上甲板両舷通路の打ち込み滞留水の割合が75%となるような状況とは異なり、表 A1-5、表 A1-10、表 A1-11 から、通路滞留水なしの状況では風による横傾斜角が放水口の没水角を超える状態にはならないと推測されることが分かる。

参考文献

- 1) 森田知治：船舶復原論 - 基礎と応用 - ， pp.84-94，海文堂，昭和60年4月。
- 2) 大串雅信：理論船舶工学（上巻）新訂版，p.163，海文堂，昭和59年10月。
- 3) 藤原敏文，上野道雄，池田良穂：成分分離型モデルと利用した新しい風圧力推定法，日本船舶海洋工学会論文集，Vol. 2，pp. 243-255，平成17年10月。

付録2 風による傾斜モーメント係数 C_K の推定

風による傾斜モーメント係数 C_K

風による傾斜モーメント係数 C_K は式(A2-1)で表現される。

$$C_K = C_Y(L_K + L_d) \quad (A2-1)$$

ここで、 C_Y : 横風圧力係数、 L_K : 水面上の船体に作用する風による傾斜モーメントレバーの無次元値、 L_d : 水面下の船体に作用する流体反力(横力)による傾斜モーメントレバーの無次元値であり、 C_Y と L_K は藤原の式¹⁾で推定した。また、 L_d は水面下の船体に作用する横力の見かけの作用点が喫水の半分($d/2$)にあると仮定して求めた。

横風圧力係数 C_Y 及び風による傾斜モーメントレバー L_K

横風圧力係数 C_Y はクロスフロー抗力と揚力・誘導抗力の横方向成分で構成されるとして相対風向角 Ψ_A の関数として式(A2-2)で表現される。

$$C_Y(\Psi_A) = C_{CF} \sin^2 \Psi_A + C_{YLI} \left(\cos \Psi_A + \frac{1}{2} \sin^2 \Psi_A \cos \Psi_A \right) \sin \Psi_A \cos \Psi_A \quad (A2-2)$$

ここで、 C_{CF} はクロスフロー抗力係数、 C_{YLI} は揚力・誘導抗力の横方向成分係数であり、事故発生時の状態では、それぞれ式(A2-3)、式(A2-4)により表2に示したパラメータを用いて推定した。

$$C_{CF} = 0.404 + 0.368 \frac{A_F}{BH_{BR}} + 0.902 \frac{H_{BR}}{L_{OA}} \quad (A2-3)$$

$$C_{YLI} = \pi \frac{A_L}{L_{OA}^2} + C_{YM} \quad (A2-4)$$

$$C_{YM} = 0.116 + 3.345 \frac{A_F}{L_{OA}B}$$

また、風による傾斜モーメントレバー L_K は風向角によらずほぼ一定とされており¹⁾、事故発生時の状態では式(A2-5)により推定した。

$$L_K = 0.0737 \left(\frac{H_C}{L_{OA}} \right)^{-0.821} \quad (A2-5)$$

参考文献

- 1) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂: 成分分離型モデルと利用した新しい風圧力推定法, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 2, pp. 243-255, 平成17年10月.