向かい波中の漁船の転覆プロセスと

数値シミュレーション

正員 平 山 次 清^{*1} 正員 西 村 浩 二^{*2} 正員 福 島 正 朗^{*3}

Study on Capsizing Process and Numerical Simulation of a Fishing Boat in Heading Waves

by Tsugukiyo Hirayama, Member Koji Nishimura, Member Masaaki Fukushima, Member

Summary

Recently, it was reported that a fishing boat (displacement is about 180 ton) had capsized in head seas. Comparing to the case in following waves, capsizing in head irregular waves are not investigated enough in the past. So, in this paper, we investigated capsizing process both by experiments in directional spectrum waves, and by numerical simulation in long crested regular waves including the effect of maneuvering.

1. 緒

营

排水量約180トンの漁船(網船)が向かい波中を航走中 に転覆したとされる事故があった。従来横波あるいは斜め 追い波も含む追い波中での転覆については多くの研究があ り復原性規則の改訂にも貢献している⁹。しかしながら,向 かい波状態で転覆に至る場合が有るとすれば如何なるプロ セスで起こり得るのかといった点について検討された例は 少ない様に思われる。そこで筆者らは実際に転覆事故を起 こした船について短波頂不規則波中での模型実験を実施す ると共に操縦運動をも考慮した規則波中の数値シミュレー ションを実施して考えられるプロセスを検討したのでその 結果について報告する。

2. 対象船

今回研究対象とした船舶は船長(Lpp)が23m,排水量 178.82トンの実際に転覆事故を起こしたまき網漁船の網

*1 横浜国立大学

- *² 防衛庁技術研究本部(研究当時 横浜国立大学大学 院)
- *3 日本小型船舶検査機構(研究当時 横浜国立大学工 学部)

原稿受理 平成 9 年 1 月 10 日 春季講演会において講演 平成 9 年 5 月 15 日 船である。その主要目は Table 1 に,一般配置図は Fig. 1 に示す。実験は 3 度行っておりその都度状態が若干異なる。 また数値シミュレーションに使用した正面線図を Fig. 2 に示す。大きな見かけ容積を持つまき網を搭載するため甲 板船尾側のかなりのスペースが平らな形状をしている事, また時々見られる配置であるが、甲板上のデッキハウスが 船体中心線より左舷側に位置している事等の特徴を持つ船

and the second second

Table 1

· · · · ·		0.00	1		·	·······
SHIP		1/23 MODEL				
ITEMS Spe			cified	Experiment	Experiment	Experiment
		Value		Value 1	Value 2	Value 3
Loa	(m)	29.220	1.270		1	
Lpp	(m)	23.000	1.000			
В	(m)	5.900	0.257			
D	<u>(m)</u>	2.150	0.0934			
d (fore)	<u>(m)</u>	1.500	0.06522			
d (aft)	(m)_	2.586	0.1124			
d (mid)	(m)	1.922	0.08357			
Δ		178.82 (t)	14.339 (kg)	14.336 (kg)	14.519 (kg)	14.265 (kg)
Cb		0.629	0.629			
KG	(m)	1.920	0.0836	0.0740	0.0897	0.0831
GM	(m)	1.450	0.0630	0.0726	0.0558 (G1)	0.0639
КВ	(m)	1.31	0.0570	0.0570	0.0570	0.0570
вм	(m)	2.06	0.0896	0.0896	0.0885	0.0900
G-Midsh	ip (m)	-0.960	-0.0420	-0.042		
Kxx/B		0.497	0.497	0.307	0.319	0.334
Kyy/Lpp		0.250	0.250	_	0.275	0.281
Kzz/Lpp		0.250	0.250	0.285	0.280	0.283
Natural	Roll			0.80	0.81	0.81
Period	Pitch			0.79	0.80	
(sec)	Heave				0.79	

日本造船学会論文集 第181号



Fig. 1 General Arrangement



Fig. 2 Body Plan for numerical simulation

型である。この様な小型の船舶では,搭載する荷物の重量 によって変化する排水量や復原挺あるいは慣性モーメント が船体運動に与える影響は大きいと考えられるが,この漁 船の場合転覆事故を起こしたのは操業中ではなく帰港途中 であった。従って漁網は甲板上にあり,実際の排水量は計 画時(157.25 トン)に比べ13%増加し,GM は20%程度減 少していたと推定されている。

この漁船が転覆した当時の事故現場は,風速10 m/sec 前後,波浪の平均周期7秒,有義波高は2m前後であった と推定され,漁船の推定針路や推定波向から向かい波中を 4 knots (Fn=0.137)前後で航行していたと考えられてい る。

3. 模型 実験

実験は転覆事故を起こしたまき網漁船の1/23 自航模型 を使用し、方向スペクトル波発生装置を有する本学の曳航



Fig. 3 Measuring system of GZ curve

水槽(100×8×3.5 m)で行った。模型は造波機の能力を考 慮して決定したため Lpp が1m と小さく,また型深さも浅 い船形の上、船内への浸水を防ぐ水密甲板を有するため重 心調整用のスペースが小さく、慣動半径や重心高さなどが 実船推定値と若干異なる Table 1。同様の理由で、本研究室 で通常使用している計測機材は重量の点で搭載できるもの が少なくロール、ピッチ以外の運動の計測は主に船体に取 り付けたターゲットランプの映像の画像解析により行っ た。ただし船体側面や下面にはターゲットランプを設置し なかったため船体が大きく運動し固定カメラの撮影範囲か ら外れた場合や、転覆等によりターゲットランプが水没し た場合のデータ計測は行えなかった。模型船は船内電動モ ーターにより自航させ、プロペラ回転数やラダーの操作は FM 波による遠隔操作(手動)を行った。また模型船には甲 板上のまき網の移動を模擬するため、移動タイミングを任 意に遠隔操作できる可動ウェイトを設置した Fig. 9。プロ ペラはほぼ実機に相似な, 直径 76 mm, ピッチ比 0.71 のも のを使用した。船内の計測器で得られた各データは細いコ ードを介して船外で計測したが操縦性への影響は極力抑え るよう工夫した。

3.1 静的復原力

模型船による自航試験に先立ち,Fig.3に表すような装置を用いて転覆に至るまでの静的復原力を計測した。基本 的には文献18)と同じであるが,モーメントゲージを船尾 に持ってくることで更に信頼性を増した。ここでは水密な 模型を用いているためブルワークからの冠水や甲板上の構 造物の有無などの影響を強く受けるが,Fig.4は甲板上を フラットにした状態の復原挺曲線である。上図は模型船(1/ 23)のスケールにおいて放水口閉の場合について計測結果 とオフセットデータから計算により求めた値●印を比較し たもので,ほぼ一致していることから計算による推定精度 が十分満足している事を確認した。そこで転覆事故が発生 した重心高さについて実船スケールで計算した結果が下図 である。図中の破線は実験模型より計測したブルワーク厚 さを計算に含めた結果であるが,このブルワーク厚さは実 船で9.2 cm に相当し,実船の厚さとは大きく異なると思



Fig. 4 GZ curve (measured and calculated) without Deck House

われる。実際にはブルワークの浮力はほとんど考慮に入れ る必要はないと思われるため、この部分を無視して計算し た結果が図中の実線である。後述する模型実験による転覆 の再現にはここで示した復原力の誤差が含まれる可能性が ある。また、この KG (転覆時) での復原性範囲は約 60° で ある。なお、本船建造時の C 係数は帰港時に 1.058 であっ た。

3.2 長波頂不規則波中実験

まずこの模型船の基本特性として V=0 における過渡水 波(T.W.W., $H/\lambda=1/60$)中での周波数応答関数を Fig. 5 に示す。図中の●印は後に示す規則波中シミュレーション の結果を、〇印は実験の解析結果を、実線はストリップ法 (NSM)による計算結果を表す。自航試験はまず漁船が転 覆事故を起こした海象に近い条件を考慮して長波頂不規則 向かい波から行った。平均周期が 1.5 秒,平均波高 8.7 cm (実船スケールで周期 7 秒,波高 2 m)の事故当時の海象で は操舵による方位角変動によっても大きな横運動が見られ なかったため、横揺れ及び縦揺れの固有周期である周期 0.8 秒(実船スケール 3.8 秒)で出会う不規則波中でも計測 を行った。この時の各運動の時系列は Fig. 6 に表すが、甲 板上に大量に水が打ち込み、それがスムーズに排水されな い場合甲板水はデッキハウスがない右舷側に集まり横傾斜 を生じさせることが確認された。この状態では長波頂不規 則波で向かい波中でも大きな横揺れが発生したが、転覆現 象は起きなかった。また、打ち込み水の片寄りに相当する 重心の移動により定常的なヒールを起こした状態で縦波中 を航走させたときの横運動の実験結果は後の数値シミュレ ーションの項で比較する。

ここで見られた海水打ち込みを予想する手段としてスト リップ法 (NSM) を用い,船体各位置における相対波高の 有義値を計算した Fig. 7。計算は実船スケールで行い,設定 不規則波は実験と同様に ITTC スペクトル長波頂不規則 波で平均周期3.84秒,及び5.07秒,有義波高は2.0mと した。図中の○印はブルワーク高さ、●印は相対波高の有 義値(両振幅)を表すが,ここで打ち込みの発生が予想さ れる F. P. 及び S. S. 8 (F. P. より 4.6 m 後方) について発 生確率1/100となる有義波高を周期ベースで表したのが Fig.8 である。ただし相対波が乾舷を越えれば打ち込み水 が発生するとした場合である。この図は平均周期3.84秒の 波浪中では有義波高が2m前後の場合でも打ち込みが発 生することを表しており、実験と同様の傾向を示すことか ら、フレア形状の影響が考慮されていない NSM による相 対波高からでも打ち込みはある程度予想できることが確認 された。なお事故当時の平均周期及び有義波高では海水打 ち込みの発生確率は非常に小さいが、打ち込みが生じない わけではない。

3.3 短波頂不規則波(方向スペクトル波)中実験

海水打ち込みを生じやすいと考えられる長波頂不規則波 中の打ち込み水のみでは転覆に至らなかった実験結果を踏 まえ,船体が損傷していない状態での長波頂向かい波中の 転覆現象は打ち込み水以外に幾つかの要因により引き起こ されると考え,それらを確認する実験を行った。

まず波浪はより実際の海象に近く主方向が向かい波中で も横揺れを生ずる短波頂不規則波を使用し、網船の場合に 考えられる網の荷崩れによる重心の移動を再現できる装置 を取り付けた。この装置の概要は Fig.9 に表すが、移動さ せたおもりの重量は実船で約 20 ton に相当する 1.71 kg である。ここでは船体がある角度までヒールすると自動的 に移動するようにくさび(トリガー)を入れたが、トリガ ーをリモコンではずして任意の時刻に移動させることもで き、ブルワークまで移動すると推定された GM の状態で約 13°のヒールが生じる。この実験では転覆事故のプロセス の解明及び、転覆に至る条件の探求のため、以下のように 実験状態を様々に変えて計測を行った。

①模型船の重心高さは推定される事故当時の値を基準とし、5段階に上げて航走させた。

②網の移動を再現する装置はウェイトを船体中心に固定し

171



TRANSFER FUNCTION



Fig. 5 Transfer Function of roll, pitch, heave (V=0)









Fig. 6 Measured time history in head irregular waves ($T_{02}=0.8$ sec, $H_{1/3}=8.7$ cm, in model scale) (V=4 knots, in ship scale)



Weight 1.71kg Trigger 11.0cm 20.6cm Total Weight = 1.9 kg

向かい波中の漁船の転覆プロセスと数値シミュレーション

Fig. 9 Physical simulation of net shifting



Fig. 10 Measured directional spectrum waves for experiments

た状態,静的に20°傾斜すると動き出す状態,任意のタイ ミングで動かす状態の3通りにセットして計測を行っ た。

③ブルワークの放水口は閉じた状態,開放した状態で各々 航走させ,甲板水の量を変化させた。

④使用水波の有義波高は事故当時の波高の2m前後で,有 義波高6.7 cm (実船スケール1.54 m),及び9.4 cm (実 船スケール2.16 m)とした。また平均周期は実船で5秒 に相当する値を用いている。この実験で計測された波の パワースペクトラム及び方向分布をFig.10 に示す。

これら4つの条件を様々に組み合わせ運動の計測を行う 中で転覆現象を捉えることが出来た。その運動の時系列を Fig.11に,また CCD カメラの画像であるためやや不鮮明 であるが,この時の連続写真を Fig.12 に示す。この模型船 は先にも述べたように,調整上の問題で重心高さや横慣動 半径の値が実船とやや異なるため,実際の転覆事故の完全 な再現とまではいかないが,短波頂不規則波中での実験で 波高を事故当時の海象とほぼ同じ条件にして測定を行った 結果,転覆が発生したのは重心(KG)が推定位置より 15%



 $(\phi = 180^\circ, V = 4 \text{ knots (ship), Capsized})$

程度高く,またウェイト(網)の移動により重心位置が横方 向に移動した時のみであった。この海象に於いては甲板上 への海水打ち込みはしばしば発生し,放水口が十分機能を 果たしていない状態では,滞留水による遊動水効果により GM減少,横傾斜増大は十分考えられる。先にも述べたよ うに甲板上には左舷側にデッキハウスがあるため甲板水は 常に右舷側に集まり,スムーズに排水されない場合に定常 な右舷傾斜を発生させるため本実験で想定したように網が 右舷側に移動する可能性も十分考えられる。実験でこのよ うな状況では転覆が発生し,再現性がある事も確認された 事から,この漁船が転覆に至ったプロセスは次のように推 定された (Fig.13参照)。

- ①向かい波中での大きな相対波高により、甲板上に海水が 打ち込む。
- ②設計上は十分でも障害物などにより放水口の機能が十分 に発揮されない場合,排水されない甲板水がデッキ上構 造物の非対称性のため構造物の無い右舷側に集まり,船 体が定常的に右傾斜する。
- ③船体がヒールした事により非対称横揺れが励起され,ウ ェイト(網)が横移動を始める。

④ウェイト(網)が右舷のブルワーク近くまで達したところ

日本造船学会論文集 第181号

1.with shipping water 2.net shifting 3.4.5.6.7.8.process to capsizing



Fig. 12 Picture of experimental model capsizing in directional spectrum waves



Fig. 13 Process to capsizing in head waves

で更に海水が打ち込み大傾斜を生じ転覆に至る。また, 船内浸水があれば更に容易に転覆に至ると考えられる。 以上のプロセスを Fig. 13 で示した起こり得るプロセス の中で太線で示した。

転覆に至るまでのプロセスにはいくつもの要因が重なっ ているが、中でも放水口の排水効率や、ウェイト(網)の移 動しやすさ(固定方法)などが大きな要因となっているよ うに思われる。

4. 数値シミュレーション

本船の転覆原因として操舵影響も調べておく必要がある が、長水槽の実験では舵が故障し急旋回したときの影響な どは十分確認できなかった。そこで操舵影響も含めた波浪 中横揺れの数値シミュレーションを実施した。また本手法 によるシリーズ計算で転覆条件を探るのも目的の一つであ る。今回の計算では転覆に至る大傾斜を扱う必要性から, 波浪中で船殻が受ける流体圧力(ただしフルードクリロフ 力)⁵¹⁴⁹ は各時刻ごとに甲板上まで含めたオフセットデー タ上で計算して取り扱った。なおブルワークが没水した場 合は 3.1 で述べたとおりブルワークの浮力は考慮していな い。

4.1 船体運動方程式1)2)3)4)

数値シミュレーションで船体運動を表すのに使用した座 標系は浜本らの提案した船体水面固定座標系¹⁾(Horizontal Body Axes System) と呼ばれる従来と異なる座標系 Fig. 14 を使用した。この座標系では、座標原点は船体重心 位置にとり、船体重心 G の並進運動は静水面と平行な平面 上で前後及び左右の運動を表し、上下運動はこの面に垂直 な方向で表す。また回頭運動については、この座標系は船 体重心 G とともに静水面に垂直に上下揺れしながら回頭 し、縦揺れ及び横揺れはしない。従って、船体の縦揺れと 横揺れはこの座標系の縦軸及び横軸周りの回転運動で表 す。この点が船体固定座標系のそれと異なるが、この座標 系に関する運動方程式と従来型の空間固定座標系(Earth Fixed Axes System),船体固定座標系(General Body Axes System)のそれとの比較検討の結果¹⁾はこの座標系



Fig. 14 Coordinate Systems

が従来型の両座標系を包含する形となっていることが分か っており,大きな回頭角と横傾斜を持つ運動を従来の操縦 性能及び耐航性能推定法を生かした形で記述できる性質を 持っていると考えられる。この座標系での船体運動方程式 は以下のように表される。ここでは横揺れの外力(船体の 付加質量力,横揺れ減衰力,復原力を除く成分)の与え方 を,船体に受ける横方向流体力によるモーメントが主要成 分であると考えている。

- 1. 操縦運動
- $(m+m_x)\dot{U} (m+m_y)V\dot{\psi} + X_{v\dot{\psi}}V\dot{\psi}$ $+ m_x z_G\dot{\theta} + m_z W\dot{\theta}$ $= T(1-t) - R + X'_{F.K}(\zeta_G, \phi, \theta, \psi)$ $- \frac{1}{2}\rho A_R U_R^2 f_a \sin \alpha_R \sin \delta$
- $(m+m_y)\dot{V} + Y_V V + m_y x_G \ddot{\psi}$ $+ (m+m_x)U\dot{\psi} - Y_{\dot{\psi}}\dot{\psi} - m_y z_G \ddot{\phi}$ $= Y'_{F.K}(\zeta_G, \phi, \theta, \psi) - \frac{1}{2}\rho A_R U_R^2 f_a \sin \alpha_R \cos \delta$
- $(I_{zz}+J_{zz})\ddot{\psi}+(N_{\dot{\psi}}+m_{y}x_{G}U)\dot{\psi}+m_{y}x_{G}\dot{V}$ $+N_{V}V-(I_{xx}+J_{xx})\dot{\theta}\dot{\phi}-m_{y}z_{G}U\dot{\phi}$ $=N_{F.K}'(\zeta_{G},\phi,\theta,\psi)+\frac{1}{2}\rho A_{R}l_{R}U_{R}^{2}f_{a}\sin\alpha_{R}\cos\delta$
- 2. 横摇運動
 - $\bullet (I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi} + K_{\dot{\phi}}\dot{\phi} + K_{\phi}^{2}\dot{\phi}|\dot{\phi}| (J_{xx} + J_{xx})\dot{\theta}\dot{\phi}$ $- Y_{V}Vz_{c} + Y_{\dot{\phi}}\dot{\phi}z_{c} - m_{x}z_{c}U\dot{\phi} - m_{y}z_{c}\dot{V} - m_{y}x_{c}\ddot{\psi}z_{c}$
 - $=K'_{F.K}(\zeta_G, \phi, \theta, \psi) + \frac{1}{2}\rho A_R h_R U_R^2 f_a \sin \alpha_R \cos \delta$
- 3. 縦運動
- $(m+m_z)\dot{W}+Z_WW+Z_{\ddot{\theta}}\dot{\theta}$ $+Z_{\dot{\theta}}\dot{\theta}+Z_{\theta}\theta-m_yz_G\dot{\phi}^2$ $=Z'_{F.K}(\zeta_G,\phi,\theta,\phi)+mg$
- $(I_{yy} + J_{yy}) \ddot{\theta} + M_{\dot{\theta}} \dot{\theta} + M_{\theta} \theta + M_{\dot{w}} \dot{W}$ $+ M_w W + m_{xZ_G} \dot{U} + J_{xx} \dot{\phi} \dot{\phi}$ $= M'_{F.K} (\zeta_G, \phi, \theta, \phi)$ (1)

式中の記号の定義を Table 2 に示す。

波浪外力としては船速が低い事と想定海象がうねり性の周 期の長い波であったためフルードクリロフ力のみとした が、実験による応答との比較 (Fig.5) でも近似は良いよう である。表中のフルードクリロフ力に関しては以下のよう に計算した。

まず,空間固定座標系 O- 知くにおける長波頂規則波の波 形を考えると次式のように表される。

 $\zeta_w = -\zeta_c + x'\theta + a\cos k(\xi_c + x'\cos\psi - y'\sin\psi - ct)$ (2)

ここでaは波の振幅,kは波数を表す。このとき船体水面 固定座標系におけるある座標(x', y', z')にはたらく静水圧 を含むフルードクリロフ力は次のように表す事ができる。

$$p = \rho g(\zeta_c - x'\theta + z')$$

$$-\rho gae^{-kd} \cos k(\hat{\varepsilon}_c + x'\cos \phi - y'\sin \phi - ct)$$

Table 2

m	mass of ship				
mx	added mass (x direction)				
my	added mass (y direction)				
m _z	added mass (z direction)				
Ixx	moment of inertia (rotation about x)				
Iyy	moment of inertia (rotation about y)				
Izz	moment of inertia (rotation about z)				
Jxx	added moment of inertia (rotation about x)				
Jyy	added moment of inertia (rotation about y)				
J28	added moment of inertia (rotation about z)				
	velocity (x direction)				
	velocity (y direction)				
W	velocity (z direction)				
ø	roll angle				
θ	pitch angle				
ψ	heading angle				
XG	length from G to effective point of m_r (x direction)				
ZG	length from G to effective point of m_r (z direction)				
ζg	coordinate of G on earth fixed system (ζ direction)				
ρ	density of fluid				
A_R	area of rudder				
U_R	effective attack velocity of rudder				
fa	slope of lift coefficient of rudder				
<i>a</i> _R	effective attack angle of rudder				
8	rudder angle				
T	propeller thrust behind ship				
t	thrust deduction fraction				
R	resistance of ship				
$X_{F.K}$	Froude-Krylov force (x direction)				
Y _{F.K}	Froude-Krylov force (y direction)				
$Z_{F.K}$	Froude-Krylov force (z direction)				
K _{F.K}	Froude-Krylov moment (rotation about x)				
$M_{F.K}$	Froude-Krylov moment (rotation about x)				
N _{F.K}	Froude-Krylov moment (rotation about x)				
B	acceleration of gravity				
l_R	length from G to center of pressure on rudder (x direction)				
h _R	length from G to center of pressure on rudder (z direction)				

(3)

(d:喫水)

今回の計算では、このフルードクリロフ力が船体の運動 に与える力およびモーメントを次に表すように近似して取 り扱ったが、横揺れに関してはその非線形性に関して正確 に取り扱う必要があったため、船体のオフセットデータを 入力してデータ上の各点にはたらく波圧を直接積分するこ とにより船体横揺れに与えるモーメントを求めた。 Froude-Krylov力

$$\begin{aligned} X'_{F,K} &= -\iiint_{V} \frac{\partial p}{\partial x'} dV \\ &\cong \rho g \theta \int_{L} A(x) dx \\ &- \rho g \cos \psi \int_{L} F(x) A(x) \sin k \\ &\times (\xi_{c} + x \cos \psi - ct) dx \\ Y'_{F,K} &= -\iiint_{V} \frac{\partial p}{\partial y'} dV \\ &\cong \rho g \sin \psi \int_{L} F(x) A(x) \sin k \\ &\times (\xi_{c} + x \cos \psi - ct) dx \\ Z'_{F,K} &= -\iiint_{V} \frac{\partial p}{\partial z'} dV \\ &\cong -\rho g \int_{L} A(x) dx \end{aligned}$$

$$-\rho g \int_{L} F(x) A(x) \cos k(\xi_{G} + x \cos \psi - ct) dx$$

$$K'_{F,K} = -\iiint_{V} \left[y' \frac{\partial p}{\partial z'} - z' \frac{\partial p}{\partial y'} \right] dV$$

$$M'_{F,K} = -\iiint_{V} \left[z' \frac{\partial p}{\partial x'} - x' \frac{\partial p}{\partial z'} \right] dV$$

$$\cong \rho g \int_{L} x A(x) dx$$

$$+ \rho g \int_{L} F(x) A(x) x \cos k(\xi_{G} + x \cos \psi - ct) dx$$

$$N'_{F,K} = -\iiint_{V} \left[x' \frac{\partial p}{\partial y'} - y' \frac{\partial p}{\partial x'} \right] dV$$

$$\cong \rho g \sin \psi \int_{L} F(x) A(x) x$$

×sin $k(\xi_c+x\cos \phi-ct)dx$ (4) (4)式中で用いられている記号の定義は Table 2 に準ず るが V は船体没水部体積, A(x) は船体没水部各断面の面 積, B(x) は船幅, d は喫水, F(x) は波の圧力勾配を表す。 F(x) は次式のように与えられる。

$$F(x) = ak \frac{\sin\left(k\frac{B(x)}{2}\sin\psi\right)}{k\frac{B(x)}{2}\sin\psi} e^{-kd(x)}$$
(5)

付加質量,造波減衰力などの流体力の係数についてはス トリップ法による理論計算結果及び元良チャート^{7/8/9/}を, また操縦運動における微係数については類似船のデータ^{10/} を参考にし,基本特性がモデルと合うように修正した。

4.3 シミュレーション結果

今回用いた計算手法の推定精度を確認するため、まず模型試験で得られた船体運動計測結果と計算結果の比較を行う。以降示す計算結果については全て実船スケールで図示する。操縦運動も考慮して転覆現象のシミュレーションを行うには、操舵に対する船体の応答も重要であるが、静水中において矩形操舵(両振幅約 35°)したときの船首角、及び横揺れ角の計測結果と、実験と同じ舵角データを入力して船体応答を計算した結果の比較を Fig. 15 に示す。本船においては矩形操舵に対するロールの応答は小さく、この結果でも発生する横揺れは非常に小さい。従って転覆に対しては操舵による動的影響は小さいと考えられる。また、計算結果については船首方位角、横揺れともに推定精度上特に問題はないと思われる。

次に,規則波(向かい波 ϕ =180°)中において,横揺れを 起こすため初期船首角を僅かにとり(25°前後),ラダーを 固定した状態で航走させたときの船体運動を実験結果,計 算結果ともに Fig. 16 に示す。2 通りの波高について比較し たが,波周期,船体 GM 及び船速についてはどちらも転覆 事故当時の値を用い,右図の波高(H_u =1.85 m)が当時の 海象を狙ったものである。先にも述べたように波浪外力は フルードクリロフ力のみを考慮したが,実験結果と計算結 果はほぼ一致した。

Fig. 17 は規則波中 (T_w =7 sec) において向かい波状態 (ϕ



Fig. 15 Simulation of heading and roll angle, using experimental rudder motion(pulse control) (V=4 knots, in still water)

=180°)から舵角一定(35°),初期船速4knotsで旋回させ たときのロール,ピッチの時系列である。シミュレーショ ン結果(実線)と実験結果(破線)の比較を目的としてい るが,シミュレーションと実験で船首方位角の時系列に差 があるため,それぞれのグラフに船首方位角が180°,210°, 240°,270°に達したときの時間に印を入れた。各船首方位 角におけるロール,ピッチのシミュレーション結果は実験 結果とほぼ同じ振幅を示しており,先の2つの結果とも合 わせ今回取り扱う海象(T_w =5~7 sec, λ/H_w =40~80)及 び船速においては計算による推定精度は十分満足し得るも のと思われる。

向かい波中で発生する転覆のプロセスについてこれらの 実験結果を踏まえ,数値シミュレーションを用いて考察す る。

長波頂波中実験の章で述べたように、船体は正面向かい 波中でも横揺れを発生する事があるが、縦波中の横揺れ現 象として、出会い周期がロールの固有周期の1/2と一致し た場合のパラメトリック共振による大振幅ロールはよく知 られている。これらの原因として考えられる規則波中での 横復原力の変化を計算によって求めた(Fig. 18)。これは船 体が $(\lambda/L=1)$ の波の山に位置する時と谷に位置する時の 復原力曲線の変化をフルードクリロフ力のみを考慮して計 算したものであるが、この漁船の場合も通常言われている とおり船体が山にある場合復原力の最大値、復原力消失角 が共に大きく減少することが確認された。このような復原 力の変化は波長の長い波の中では小さくなるが、大きな縦 揺れ及び上下揺れが発生した場合その運動の周期にあわせ て GM が変動する。 船体が積み荷の配置や滞留水の影響な どで横に傾斜した状態で縦波中を航走すると, 更に上下揺 れとの連成により非対称な横揺れが発生すると考えられ、

向かい波中の漁船の転覆プロセスと数値シミュレーション





 $(T_w=7 \text{ sec}, \ \phi_{\text{ini}}=206^\circ, \ \delta=0^\circ, \ V=4 \text{ knots})$



Fig. 17 Measured and simulated ship motion in regular head waves $(T_w=7 \text{ sec}, \ \psi_{\text{ini}}=180^\circ \rightarrow 360^\circ, \ \delta=35^\circ, \ V=4 \text{ knots})$





Fig. 18 GZ curve variation in regular wave $(\lambda/L = 1, H_w = 2 \text{ m})$



Fig. 19 Roll in head regular waves with initial heel (measured and simulated) ($T_w=5.15 \text{ sec}$, H_w =1.81 m, V=4 knots, $\phi=180^\circ$, $\phi_{\text{ini}}=9^\circ$)

初期ヒール(右舷側)9°で規則向かい波中を航走させた時 の実験結果,及びこれにほぼ一致する計算結果から Fig. 19 でもこのような現象が確認された。

模型実験により本転覆事故のプロセスとして、甲板上滞 留水による船体のヒール、それにより励起される横揺れ、 大きな横傾斜に伴う漁網の移動などの要因が推定された が、同様の条件で規則波中での数値シミュレーションを行



Fig. 20 Simulation without $(T_w = 7 \text{ sec})$ and with $(T_w = 5 \text{ sec})$ capsizing by shift of weight (in head regular waves, $H_w = 2 \text{ m}$)

った(Fig.20)。ここで船体の重心高さ等の各諸元,漁網が 移動し始める船体のヒール角等は模型実験と同じ値を用 い,波浪条件は周期を幾つかに変えて計算を実施した。図 の周期7秒のものは事故当時の推定海象であり,甲板水に よる横傾斜はデッキ上の漁網の初期位置を右舷側にずらす ことにより模擬している。従って滞留水の細かい動きは模 擬できていない。この計算では横揺れが生じたが振幅が小 さく横揺れに伴う漁網の移動が起きなかったため転覆は発 生していない。周期5秒の場合は前者に比べ横揺れが大き く発生し,それに伴い漁網が移動することにより転覆が発 向かい波中の漁船の転覆プロセスと数値シミュレーション



Fig. 21 Limiting wave height (regular wave) for capsizing occur (Calculation)

生した。ロールの縦軸は周期7秒の時と異なることに注意 されたい。模型船の重心高さ、及び横貫動半径のセッティ ングの不具合がシミュレーション結果に反映するため事故 当時の推定波浪周期で転覆は発生しなかったが、この結果 は短波頂不規則波中における模型実験の結果とも一致し た。そこで本船が転覆に至る波高の条件を Fig. 21 に GM ベースで示した。図の実線は模型実験における諸元および オフセットデータ(ブルワーク厚さが実船と異なる)を用 いて波周期5秒で計算したときの結果であり、矢印で示す 限界波高については先にも述べたように模型試験でも確認 されている。破線は実船の諸元、オフセットを使用した結 果であり、波周期が5秒のものと事故当時の7秒のものに ついて表した。本船の事故当時の推定 GM は約1.45 m で あり,波浪周期を約6秒とすると,この時の転覆波高は2m 位と推定され、当時の波高とほぼ一致しており、今回仮定 したプロセスをある程度確認できたものと考えられる。

5. 結 言

本論文では向かい波中において転覆に至るプロセスを検 討するために短波頂および長波頂不規則波中での実験を行 い,規則波中ではあるがそれらを説明しうる操縦運動も含 んだ数値シミュレーションを実施した結果,以下の結論が 得られた。

(1) 今回の研究の発端となった小型漁船の向かい波中での転覆事故に関しては、航走中に波浪による巨大な横揺れモーメントが生じたとは考えにくいが、一般の大型船舶に比べて縦運動による海水の打ち込みや、それに伴う荷崩れ、船体の損傷などが船体運動に与える影響は大きく、それらを総合的に検討した結果そのプロセスを推定した(Fig.13)。本船の場合デッキハウスが左舷に偏った設計であること及び放水口閉塞が右舷側傾斜の引き金になったと推定され、これと同様なデザ

インの漁船は共通の危険を有するものと考えられる。

- (2) 従来から知られた事であるが、船舶が規則的な縦波 中を航走する場合、縦運動との連成や、没水部形状の 変化による横復原力の変化により横揺れが誘起される 事があり、波との出会い周波数によっては大振幅運動 に発達することが今回の模型実験及び数値シミュレー ションによっても確認出来た。
- (3) 数値シミュレーションは浜本らの提唱した船体水面 固定座標系¹¹により波浪中運動と操縦運動を同時に考 慮した結果,規則波中の操縦運動の実験を可成り証明 し得る結果を得た。更に今回の対象漁船については急 激な転舵による横傾斜は小さい事が判明した。
- (4) ここで用いた数値シミュレーションでは海水打ち込みの結果としての甲板水や荷崩れを荷重移動としてモデル的に組み込んだ形で転覆のプロセスをある程度説明できた。また、本手法による規則波中の数値シミュレーションにより転覆の限界波高も求め、実験とも大略対応する事を確かめた。

今後の課題としては、計算における流体力の取り扱い方 として、出会い周期の短い波などを考慮する場合はフルー ドクリロフ力だけでなくディフラクション力なども併せて 考慮するとともに、滞留水の実際に則した挙動を組み込む 必要があると考えられる。また、計算に用いた運動方程式 の流体力係数などの値にはいくつか問題を残しており、そ れが計算結果に現れることもあったが、これに関しても実 験と並行して比較検討しながら研究を進め、より精度の高 い係数の推定法を確立していく必要があるといえる。

辞

謝

本論文を作成するに当たって,水槽試験方法や解析手法 などに様々な助言や,貴重な意見を頂いた横浜国立大学工 学部浮体運動学研究室の宮川清助手,高山武彦技官に感謝 の意を表したい。また,斉藤靖浩君,河内功君,久保田智 君を始めとする本研究室の学生の皆様にも全般に渡って協 力して頂いた事を記し,改めて感謝したい。

参考文献

- 浜本剛実他,波浪中の操縦運動を記述する新しい座 標系とその運動方程式,日本造船学会論文集 第 173 号, pp. 209-220 (1993)
- Masami Hamamoto et al: Study of Ship Motions and Capsizing in Following Seas (1 st Report), Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol 163 pp. 173-180 (1988)
- 3) Masami Hamamoto et al: Study of Ship Motions and Capsizing in Following Seas (2 nd Report), Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol 165 pp. 123-130 (1989)
- 4) Masami Hamamoto et al: Study of Ship Motions and Capsizing in Following Seas (Final

Report), Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol 170 pp. 173-182 (1991)

- Hamamoto Masami et al: Dynamic Stability of a Ship in Quarterring Seas, Stability '94 pp. 1-17 (1994)
- 6) 運動性能委員会第3回シンポジウム,船舶と海洋構 造物の安全性と復原性,日本造船学会(1986)
- 7) 元良誠三,船体運動に対する付加質量及び付加慣性 モーメントについて(その1),造船協会論文集 第 105号,pp.83-92(1959)
- 8) 元良誠三,船体運動に対する付加質量及び付加慣性 モーメントについて(その2),造船協会論文集 第 106号, pp. 59-62 (1959)
- 9) 元良誠三,船体運動に対する付加質量及び付加慣性 モーメントについて(その3),造船協会論文集 第 106号, pp. 63-68(1959)
- Keiichi Karasuno et al: Physical-Mathematical Models of Hydro-or-Aero-Dynamic Forces Acting on Ships Moving in an Oblique Direction,

- MARISM & ICSM 90 pp. 393-400 (1990)
- 田才福造,水面に浮かんだ柱状体の Free Heaving に就て,西部造船会会報 第21号,pp.101-107 (1961)
- 12) 田才福造,船の Heaving 並びに Pitching に対する 付加質量及び減衰力(続),西部造船会会報 第21
 号 pp. 109-132 (1961)
- 13) 第3回操縦性シンポジウム,日本造船学会(1981)
- 14) 耐航性理論の設計への応用,日本造船学会(1994)
- 15) 操縦性研究の設計への応用,日本造船学会(1995)
- 16) 平山次清他, 横波中の漁船の転覆確率に関する実験 的研究, 日本造船学会論文集 第154号, pp. 173-184 (1983)
- 17) 平山次清他, 砕波による漁船の転覆過程について, 関西造船協会誌 第196号, pp. 19-30 (1985)
- 平山次清他, 斜め追い波中航走ヨットの砕波による 転覆及び復元特性, 関西造船協会誌 第221号, pp. 117-122 (1994)