横波中の漁船の転覆確率に関する実験的研究

正員 平 山 次 清*

Experimental Study on the Probability of Capsizing of a Fishing Vessel in Beam Irregular Waves

by Tsugukiyo Hirayama, Member

Summary

It is clear that capsizing in rough seas is probabilistic phenomenon. But the probabilistic treatment by theoretical consideration only is very difficult.

So, in this study, the probability of capsizing in short term sea condition is examined by experiments.

In the first, the definition of capsizing probability is made and the distribution function of the time to capsizing (t_c) is assumed to become Gamma distribution.

This can be obtained by the analogy of the failure of mechanical system.

And the next, capsizing experiments are conducted and the above assumption is confirmed. Some examples of the probability of capsizing are obtained as shown in Fig. 14. This probability is also shown by using the Weibull distribution.

At the same time it is shown that those parameters representing Gamma distribution have closer relation to the significant wave height ($H_{1/3}$) and metacentric height (GM) or dynamical stability (D_{st}) as shown in Fig. 10.

1 緒 言

通常の船舶がどのような外的あるいは内的な状況の下で、いつ転覆するかについては未だ説明されているとはいえない。その理由としては波浪、風、潮流等の外的条件が複雑で、かつ確率論的であり、しかも線形重ね合わせの原理が成立し難いこと、浸水、積荷の移動などの内的条件も入れると考慮すべきケースがあまりにも多過ぎ、また実船による検証も非常に難しいことなどがあげられよう。

したがって転覆そのものに関しては考慮すべきケースを絞った模型実験が主たる解明手段にならざるを得ない。実験的研究としては理論的考察との対応、実験および解析のしやすさといった点から従来規則波中での検討がなされており、例えば文献¹⁾では2次元模型で、風と波の組み合わせを考慮し興味深い結果を得ている。

しかし最終的には確率論的である不規則波中の現象が予測できる必要があるわけで、困難な不規則波中の実験を敢て実施し多くの有益なる結果を得ている例²⁾もあるが、転覆そのものを確率論的に捉えた実験は非常に少ない⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾(本論文末尾のノート参照)。

一方、船の転覆確率を非実験的に計算したものと

して Shama³⁾ の例がある。これは KG, GM などのとり得る値がすべて正規分布する等の仮定に立って動復原挺がマイナスとなる長期の確率を転覆確率として求めたものであり、仮定の妥当性、転覆の確率の意味自体も明確でないように思われる。

いずれにしても転覆確率に関する実験的な検討ができれば転覆に関連する規則波中実験の意味なども逆に明確になる可能性があるわけでその意義は大きい。

そこで本研究では転覆確率を検討する一つの試みとして短期波浪中、停止時横波状態の漁船の転覆現象を確率論的に評価する実験を実施した。長期の確率の検討も必要であるがそのためにはベースとなる短期の現象の把握が必要である。

評価の方法としては転覆に至るまでの時間(t_c)の分布が、転覆現象を機械の故障に対比させて捉えた時、ガンマ分布になるであろうと予想し、実験との比較を行った。一般に風も無く、船内浸水も起らず、GMも正常の状態では可成り大波高でも転覆は生じにくい。

そのために、使用した模型船は GM を比較的小さくする、あるいは風、荷崩れを想定して初期傾斜をつけるなど比較的転覆しやすい状態とした。使用した模型船は 379 ton (満載状態) 鯉鰯漁船のモデルで放水口や特有の張出し甲板(スポンソン)を有しており、ここではそれ

* 横浜国立大学船舶・海洋工学科

らが転覆に及ぼす影響も調べた。ただし本実験は本学の $L \times B \times d = 100 \times 8 \times 3.5(\text{m})$ の長水槽で行ったものである。

2 転覆確率に関する仮説

2.1 転覆確率の定義

緒言で述べたように本研究では実験可能な“短期の転覆確率”に話を絞ることにする。即ち波浪の性質が一定と考えられる短期海面に船が遭遇した時、転覆するまでの時間を“ t_c ”とすると t_c は確率変数であり、これを転覆寿命と呼ぶことにする。これより t_c の確率分布関数 $F(t_c)$ なるものが考えられる。

$F(t_c)$ は時刻 t_c までに船が転覆している確率でありここではこれを転覆確率と呼ぶ。逆に t_c まで転覆せずにいる生存確率を $R(t_c)$ とすると $F(t_c)$ とは背反故

$$R(t_c) = 1 - F(t_c) \quad (1)$$

なる関数が成り立つ。一方 $(t_c, t_c + \Delta t)$ の範囲に転覆寿命の存在する確率密度 $f(t_c)$ は次式で表わされる。

$$f(t_c) = dF(t_c)/dt_c = -dR(t_c)/dt_c \quad (2)$$

R なる記号は信頼性工学でいうシステムの信頼度 (Reliability), F は故障 (Failure) 確率あるいは不信頼度に対応させている。

2.2 転覆確率に関する仮説

転覆寿命分布関数を転覆確率と呼ぶことにしたわけであるが、ここではその関数形を予想してみる。

横波状態で、GM が比較的小さい時、あるいは荷崩れ、定常風などによって定常傾斜している時ある時間かかって転覆に至る過程としては次のように予想される。即ち不規則波中である高さ (H_c とする) 以上の個別波が k 回船に入射した時、海水打込みの累積により、あるいは波のインパクトによる傾斜モーメントにより船の傾斜が徐々に大きくなり遂に復原力消失角を超えて転覆に至る。

傾斜が徐々に増大するのは打込み水の滞留だけでなく、ブルワークが没水したような時にロールの正、逆の回転方向の違いにより減衰力に差があることから生じ得ることは知られている。

今、前述の打込み等の現象 (事象) の発生がポアソン過程であるとする。即ち事象の発生がランダムかつ独立で、単位時間当りの平均発生回数を ν とすると Δt 区間で事象が 1 回発生する確率は $\nu \cdot \Delta t$ と表わせ、また Δt の間に事象が 2 回以上発生する確率は無視できるものとする。この時は事象が k 回発生するまでの時間 (t_k) の分布関数はガンマ分布となり次式で表わされることが知られており⁴⁾

$$F(t_k) = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\nu t_k)^n}{n!} e^{-\nu t_k} \quad (3)$$

これより密度関数は次式となる。

$$f(t_k) = \frac{\nu(\nu t_k)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\nu t_k} \quad (4)$$

また t_k の平均値、分散はそれぞれ次式となる。

$$\bar{t}_k = k/\nu, \quad \sigma_{t_k}^2 = k/\nu^2 \quad (5)$$

(4) 式は $(k-1)!$ をガンマ関数で置きかえることにより非整数の k の場合に拡張され、またその時は (3) 式は不完全ガンマ関数で表現される。 k は形状母数と呼ばれ $k > 1$ の時は、機械の摩耗故障に対応する分布となる。

次に転覆は事象が k 回生じた時にその累積効果により生じるものと考えると転覆寿命 t_c は次式のごとく t_k

$$t_c \equiv t_k \quad (6)$$

で置きかえられる故、転覆確率についてもガンマ分布となり (3), (4), (5) 式がそのまま適用できるものと予想される。ここで

$$\bar{T} = 1/\nu \quad (7)$$

で定義される $\bar{T}$ は尺度母数ともいわれ事象発生 の平均時間間隔、即ち打込みなどに関係するある高さ H_c 以上の個別波の入射する平均時間間隔であるといえる。

以上により t_c の分布がガンマ分布で表現できるのではないかという仮説を立てたわけであるが、これが実験的にも確認されれば、分布のあてはめから k (累積回数)、 $\bar{T}$ 、ひいては $\bar{T}$ となり得る H_c など逆にも推定できることにもなる。

なお転覆メカニズムの以上の捉え方は累積応力による機械の疲労破壊に類似しているといえる。

3 実験

次に 2.2 節で述べた転覆寿命 t_c の密度関数 (4) 式を検証する実験を行った。本来ならば短期海面に同時に多数の同一模型船を置き、 t_c の頻度分布を見る必要があるがここでは便宜上次に述べる方法で行った。

即ち有義波高 ($H_{1/3}$) と平均波周期 (T_{02}) で決まる ITTC 型スペクトルを有する不規則横波中に 1 隻の模型船を置く。転覆したらその都度 Deck 上の水を排水して初期状態に戻すといったやり方で、初期状態 $\leftrightarrow$ 転覆間の時間間隔 t_c のデータを 20 個程度とり頻度分布を得る。ただし実船換算で 20 分以上転覆が生じない場合は転覆無しと判定する。

3.1 使用モデルおよび静的特性

実験に使用したのは 379 ton 鰹鮪漁船の 1/30 モデルで L_{pp} は 1.06 m とやや小さい。これは造波機能力から見て相対的に大波高不規則波となるよう手持ちのモデルの中から小さいものを選んだためである。

主要目、Body Plan を Table 1, Fig. 1 に写真を Photo. 1 に示す。トリムの影響はあまり大きくないよう

Table 1 Principal dimensions

Item	Ship	1/30 Model
Lpp (m)	31.80	1.060
LoA (m)	42.00	1.400
B (m)	6.60	0.220
D (m)	3.45	0.115
Δ	379.1 (ton)	13.700 (kg)
d (m)	2.85	0.095
Trim (m)	0.00	0.000
GM (m)	0.498	0.0166
KM (m)	3.015	0.1005
KG (m)	2.517	0.0839
$\overline{KG}$ (m)	0.210	0.0070
Rolling Period (sec)	With BK 6.299 Without BK 5.510	1.150 1.006
K _{xx} in Air	0.245	0.245
B in Water	With BK 0.336 Without BK 0.294	0.336 0.294
Length of BK	0.324 Lpp	0.324 Lpp
Breadth of BK	0.270 (m)	0.009 (m)
Rudder Area (m ²)	1.931	2.145 × 10 ⁻³

Fig. 1 Body plan and the definition of G_y , G_z

Photo. 1 Model ship. Freeing ports are seen.

であったのでトリム無しとした。ビルジキール、張出し甲板 (Sponson) 付きである。Deck House 等はすべて水密とし、スポンソンも浮力材としている。放水口は $0.7 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ のものが片舷に 7 個設けられているが閉じた状態を主としている。また傾斜しても船内重量物の移動は無いようにしているため Table 1 の GM 状態では 180° 傾いた時に自己直立型の復原性を持っている (Fig. 3(a) 参照)。なお Table 1 の GM は、主要目も含めてマリアナ海域遭難船³⁾に対応しているが実験では船内の Weight の移動により、これより可成り小さい種々の GM について行っている。また Weight の左右

Fig. 2 Stability curve by experiment

移動により重心の左右位置 (G_y , Fig. 1 参照) を $\pm 0.55 \text{ cm}$ (大) (半船幅の 5%) と $\pm 0.25 \text{ cm}$ (小) 移動させ初期傾斜をつけた状態でも行っている。

初期傾斜は GM により異なり最大 25° 位である。 180° にわたる復原挺曲線の例を Fig. 2 に示す。これは排水量一定でかつ純粹のヒールモーメントが加わるようにしてより実船に近いものとして実験的に求めたものであり、Deck House や Deck 上の活漁槽の出張りなどの影響も含まれている。また破線で示すスポンソン無しの場合からわかるようにスポンソンの復原効果も可成りある。放水口閉の場合はブルワーク上部が水が越える以上に傾斜 (約 30°) させて元に戻した場合は一度入った滞留水の影響で以後は直立時の GM が負になっている点に注意する必要がある。

Fig. 2 の放水口閉の場合をもとにして $G_y = 0, \pm 0.55 \text{ cm}$ の時の種々の GM に対応する復原力曲線を Fig. 3 に示す。(a) は $G_y = 0$ で GM のみの変化、(b) は更に G_y を 0.55 cm とした場合であり初期傾斜は各々異なる。ただしここでいう GM は $G_z M$ で、 $G_y = 0$ での GM で表わしている。

Fig. 3 の斜線で示した部分の面積、即ち動復原挺 (D_{st}) を GM ベースに示したのが次の Fig. 4 である。なお Fig. 3(a), (b) に示した斜線部分の D_{st} はほぼ同程度になるケースを示している。波浪中の転覆に関してはこの D_{st} が効くと考えられるが Fig. 4 では $D_{st} = (GM - GM_0)^2$ なる関係があることから、本研究では最終的には初期復原力としての GM で整理している。ただし GM_0 は $D_{st} = 0$ となる GM である。

なお Fig. 4 中で initial heel (L) とあるのは G_y を半船幅の 5%, (S) とあるのは 2.3% とすることにより大小の初期傾斜をつけた場合、破線は Deck 上に滞留水がある状態であり一定量だけ D_{st} が悪化していることが示されている。

Fig. 3 Stability curve for various GM based on Fig. 2 (a) $G_y=0$, (b) $G_y=0.55$ cm

Fig. 4 Dynamical stability for GM. Definition is shown in Fig. 3

3.2 モデルの動的な特性

Fig. 5 に Roll 固有周期 T_R の GM ベースの変化を示す。重心の水平方向のずれ G_y による差が大きく、この時は GM 変化により T_R は殆んど変化せずほぼ一定 ($T_R \approx 1.0$ sec) に近い。なお不規則波の T_{02} としては 0.5 sec, 1.0 sec, 1.5 sec の 3 種類の実験を行っているが、次章では傾斜時の固有周期に近い $T_{02} = 1.0$ sec について主として報告している。

Free Roll による N 係数 (N_{10°) も Fig. 6 に示す。 $G_y(L)$ の時は異常に大きな値となっている。この時は減衰力が大きいことは確かであるが逆に運動の減衰が大

きいため係数の推定精度は悪くなっており定量的には検討の余地がある。また $G_y(L)$ でビルジキール (BK) を

Fig. 5 Rolling period about GM (Experiment)

Fig. 6 N_{10° coefficient against GM

とった時の変化も大きく出ている。ただし $G_y=0$ の時は通常いわれている値 0.02 に近い。なお Free Roll は 4.1 節で説明する方法で傾斜計により計測した。

4 実験結果および考察

4.1 不規則波中の転覆例

Fig. 7 に不規則横波中での実験状態を示す。船体運動計測用の細いコード (ポジションセンサー用発光ダイオード, 傾斜計, 小型レートジャイロ, 相対波高計を積載しているため) が船首尾の重心高さから出ている以外は完全フリーである。地上波高計は船体位置での入射波が計測されるように補助台車にのせ手動リモコンにより船のドリフトに追従させた。空間位置計測用のポジションセンサーカメラも台車にある。

記録例を Fig. 8(a), (b) に示す。Fig. 8(a) は計画周期 $T_{02}=1.5$ sec の不規則波中, ビルジキール, スポンソン共に有り, 放水口は閉, 重心の y 座標 (G_y) は -0.55 cm で初期傾斜が -24.5° (Lee Side Down (L)) についているが静水面はブルワーク下部である。 $G_y=0$ とした時の GM は 0.491 cm としている。有義波高は実船で約 3.5 m の場合となっている。波の平均周期に対して Roll は約 1 秒の傾斜時固有周期が目立つ。減衰が大きいので Roll の振幅は比較的小さい。また海水打込みにより途中からゼロベースが 12° 位ずれている現象も見られ, 3 回の転覆とも約 21 cm の個別波高 ($H_{1/3}$ の 1.8 倍に相当) (図中 H_1, H_2, H_3) が入射した後 5 回程

度の揺れで急速に転覆に至っている。Lee 側転覆のため相対波高 (Lee 側) には H_1, H_2, H_3 の影響は殆んど見られないが, 角速度には影響が見られる故, 波の Dynamic な力により転覆したと理解される。ただし H_1 などと同程度の波高でも (H_4, H_5 など) 転覆していないケースもあり話しはそう単純ではない。図中の t_c が転覆寿命である。

一方 $G_y=+0.55$ cm (初期傾斜 Weather Side Down (L) 25.2°), $GM=0.367$ cm の例を Fig. 8(b) に示す。有義波高は (a) より大で実船で 5.1 m ある。この場合は (a) と対照的に海水打込みが激しく直ちに 10° 位定常傾斜が増す。ただしその後一波一波に対応する Roll 応答は小さく長周期度動的な動きをしている点は (a) と全く異なる。また転覆直前の動きも (a) と異なるようである。

ここには示さなかったが (b) と同じ波の中で $G_y=0$ (重心は中心線上) $GM=-0.127$ cm の例は (b) に近い傾向であった。ただし負の GM のため Weather 側に 5° 位の初期ヒールがあった。

4.2 転覆寿命 (t_c) の分布

実験で得た転覆の回数は総計 1,200 回にのぼったが t_c の頻度分布の数例を Fig. 9 に示す。ただし計画した $T_{02}=1.0$ sec の場合である。図中の値 k, ν は t_c の平均値 ($\bar{t}_c$) および分散 ($\sigma_{t_c}^2$) より (5) 式の関係より求めたものである。ただし k はまるめて整数化してある。また k, ν により (4) 式のガンマ分布を頻度分布にあてはめたものを曲線で描いてある。

χ^2 検定も若干行ったが 90% の確かさでガンマ分布といえるというような結果が得られており, ここに示さなかったケースも含めて全体的にガンマ分布で表現できるといってよい。

また後述するように $H_{1/3}$ が大きくなる程 k が小さくなっている。これはガンマ分布を想定した時の物理的な仮定からすると, $H_{1/3}$ が大なる程転覆に至らしめる事象 (海水打込み, 傾斜増大のインパクト) の累積回数が少なくなることを意味し, 現象的にもありうることでガンマ分布の有効性が示されていると思われる。なお k は 1 より大である故, 機械の摩耗故障に対応するケースといえる。

また ν は事象の単位時間当たり平均発生回数であることからすると, 例えば Fig. 9(e) では $k=2$ で発生 of 平均周期 $T=1/\nu=12.8$ sec となりこれは造波した波の実際の T_{02} の 9.3 倍である。したがって, この場合は 9.3 波に 1 波の割で現われる個別波高 (H_c) が 2 回程度入射してから転覆しているといえる。この波高を順序統計により得られる N 波中の最大値⁹⁾として考えると $N=9.3$ 故, H_c は $H_{1/3}$ の 1.4 倍程度の波ということにな

Fig. 7 Rough sketch of experiment

Fig. 8 Example of time history showing capsizing

(a) Lee side down, (b) Weather side down (Initial heel is large)

る。

4.3 ガンマ分布のパラメータと GM , $H_{1/3}$ との関係

前節において t_c の分布がガンマ分布で表現されうることが示されたが、分布を決めるパラメータ k, ν が物理的に納得できる一定の傾向を持つこと、更には船体条件、波浪条件との結びつきが示されれば転覆確率を今後理論的に扱う上で更に有用である。そこで本節では計画波周期 $T_{02} = 1.0 \text{ sec}$ の波浪中について GM , 初期傾斜角, $H_{1/3}$ と k, ν との関係について見てみる。本来ならば GM でなく D_{st} (動復原矩) との関係を見るべきと思

われるが節 3.1 でも述べたように両者は 2 次関数的に結ばれているので実用上の点からも GM との関係を見た。

まず $H_{1/3}$ との関係であるが、 k は一定の傾向を持つようであるが ν についてはあまりはつきりしなかった。そこで ν の代わりに平均転覆寿命 t_c について調べそれより ν を推定した。Fig. 10-1~3 に t_c と $H_{1/3}$ の関係を示した。中央が $G_y = 0$, 右が Weather, 左が Lee 側に重心を移動させ大なる初期傾斜をつけた場合である。パラメータは GM である。これらより与えられた GM に対して t_c が無限大となる、即ち転覆しない限界の有

Fig. 9 Frequency diagram of time to capsizing (t_c) and Gamma distribution fitting. Chain curve in © is Weibull distribution corresponding to obtained parameters in Fig. 13

義波高 $H_{1/3.L}(\equiv a(GM))$ とする)が存在しかつ比較的一定の変化を示しており D_{st} がゼロでなければ負の GM の時にもそれが存在する。そこで次式

$$\bar{t}_c = \frac{b(GM)}{H_{1/3} - a(GM)} \quad (8)$$

で実験点を近似した時(破線で示す)の a, b を GM を横軸にとって表現したものが Fig. 10-4, 5 の $\circ \triangle \square$ でありそれを更に第一次近似として直線近似したのが実線で示したものである。 $G_y = 0$ と $G_y \neq 0$ で大きな違いがみられる。 a, b がゼロとなる、即ち波が無くても直ちに転覆する GM_0 は動復原挺がゼロとなる GM (Fig. 4 参照)にはほぼ一致するものとした。ただし同一 GM でも重心位置が Weather 側(+)か Lee 側(-)かによって GM_0 に違いが見られるのでそれも考慮した。これより Fig. 10-4, 5 は a_1, b_1, GM_0 を G_y の関数として次式で表現される。

$$\begin{cases} a = a_1(G_y) \cdot \{GM - GM_0(G_y)\} \\ b = b_1(G_y) \cdot \{GM - GM_0(G_y)\} \end{cases} \quad (9)$$

以上のように近似した結果得られた a, b で(8)式の $\bar{t}_c$ を再度描いたものが Fig. 10-1~3 中の実線であり、ほぼ実験点の傾向を表現できているといつてよい。即ち(9)式の関係がほぼ成立するものと思われる。

次に k を $H_{1/3}$ ベースに表現したのが Fig. 10-6~8 である。これもほぼ右下りの傾向となっており大なる有義波高で $k=1$ 即ち偶発故障型といわれる指数分布に近づく。また先ほどの限界有義波高で矢張り k (例えば転覆に至る打込みの回数)が無限大になると予想されることから次式

$$k = \frac{h(GM)}{H_{1/3} - a(GM)} \quad (10)$$

で表現できるものとし、実験点を破線のようにあてはめた時の h を示したのが Fig. 10-9 である。

この時 h もまた先ほどの GM_0 の時に無限大となると予想される故

$$h = \frac{h_1(G_y)}{GM - GM_0(G_y)} \quad (11)$$

のごとく近似してやり(実線で示す)、得られた h を(10)式に代入して再度描いた k が Fig. 10-6~8 の実線で先ほどと同様傾向はほぼ表現できていることがわかる。

したがって以上の(8)~(10)式を用いてガンマ分布のもう一つのパラメーター ν あるいは $\bar{T}$ を求めると、(5)式より

$$\begin{aligned} \nu = \frac{k}{\bar{t}_c} &= \frac{H_{1/3} - a}{b} \cdot \frac{h}{H_{1/3} - a} = \frac{h}{b} \\ &= \frac{h_1(G_y)}{b_1(G_y) \{GM - GM_0(G_y)\}^2} \equiv \frac{1}{\bar{T}} \quad (12) \end{aligned}$$

となり、 ν あるいは $\bar{T}$ は GM と G_y だけの関数となる(ただし、いま T_{02} は一定としている)。 $\bar{T}$ を(12)式によりプロットしたものが Fig. 10-10 である。図中の記号は近似しない生の実験点でありオーダ的には(12)式が成立していると思われる。また $\bar{T}$ が $(GM - GM_0)^2$ に比例することは Fig. 4 の D_{st} の傾向と同じであり $\bar{T}$ が D_{st} に比例することを意味しており興味深い。なお、ここでは相対波高との関係は見えていないが初期傾斜、有義波高、GM などと密接な関係があるわけで当然その効果も内に含まれていることになる。

4.4 初期傾斜、波周期、放水口、ビルジキール、スポンソンの影響

計画平均波周期 $T_{02} = 1.0$ sec の場合について、初期傾斜が平均転覆寿命 $\bar{t}_c$ に及ぼす影響は Fig. 10-4 の a

Fig. 11 Effect of bilge keel and freeing port on mean time to capsizing ($\bar{t}_c$)

即ち転覆を生ずる最小の有義波高 ($H_{1/3L}$) に最も明確に示されている。即ち同一の GM に対しては重心位置が風下側 (大) 風上側 (大), 中央の順に最小有義波高が大きくなっている。即ちこの順で転覆しにくくなっている。重心が中央の時は風上, 下側に対しておよそ 10 cm 位 (実船で約 3 m) その値が大きく直立時の転覆しにくさが示されている。また同図中には重心位置のズレ G_y が小 (半船幅の 2.3%) 即ち初期傾斜が小の場合も 1 点ずつ示してあるが非常に $G_y=0$ のケースに近づいていることがわかる。

ここで注意すべきは Fig. 4 を用いて同一の動復原力に対して最小有義波高を見ると逆に初期傾斜 25° の方が概略 7 cm 位高くなっておりこの時は GM の小さい直立時の方がやはり転覆しやすいといえることである。これまではずべて BK 有り, 放水口閉の場合であったが次に GM と G_y を固定して波周期, 放水口開閉, ビ

ルジキール (BK) の有無の違いを見たものが $\bar{t}_c$ で示した Fig. 11 である。ただし (a), (b), (c) では GM, G_y は異なる。白丸は放水口開, ヒゲは BK 有りを意味する。同図より周期の影響が比較的是っきり現われており傾斜時の横揺れ固有周期より可成り短い $T_{02}=0.5$ sec の時転覆しやすいといえる (ただし波傾斜が高くなると波くずれのため得られる T_{02} は次第に大となる)。

また, 放水口開, ビルジキール無しの違いも比較的是っきり出ているようである (ただし, この時の放水口は単なる穴であり逆流防止扉はつけていない)。これを見るために各々のケースについて最小有義波高で示したのが Fig. 12 である。

放水口開で BK 無し (○印に相当) のケースは無いが, 同図中では T_{02} が小さい時, あるいは重心が風上側にある時, 放水口閉, BK 無しの状態が最小有義波高が極端に小さくなっていることがわかる。

各々のケースの 3 つのマークの内両端, 即ち放水口開閉の差はあまり大きく出していないことから, これは BK 無しの効果によるものと思われる。

ただし転覆しやすい周期 $T_{02}=0.5$ sec のかつビルジキール有りの所でこまかくみると重心が中央の時を除いて, 大傾斜している時は放水口を閉じた方が転覆側への動きに対して抵抗が大きくなるからと思われる。

なお漁船特有のスポンソンをはずした時の影響も若干調べた。1 例として

Fig. 12 Effect of bilge keel and freeing port on lowest significant height ($H_{1/3L}=a$) occurring capsizing.

は、 $T_{02}=1.0$ で風下側傾斜大 $GM=1.19$ cm の時は、同じ条件下でスポンソン有りの時の $GM=0.37$ cm に対応するカーブとなった。これはスポンソンの復原力が無い分だけ重心が約 0.8 cm 実船で 24 cm 上昇してしまったような効果となっているともいえるわけで浮力を有するスポンソンの効果は大きい。

5 ワイブル分布との関係

前章において転覆寿命 (t_c) の分布がガンマ分布で表現できることが示されたといえる。また、形状母数 (k) の値から見て、比較的転覆しやすい状況での転覆が機械の摩耗故障に対応していることも明らかとなった。

ここでは故障寿命の種々の分布パターンに幅広く適用できるといわれており、また極値分布としても広く用いられているワイブル分布のあてはめを考えてみる。この場合は確率紙により母数の推定が容易であり複数の転覆パターンが混在しているような時にもそのパターンを見分けられる可能性がある⁹⁾。

転覆確率がワイブル分布で表現できるとするとそれは

$$F(t_c) = 1 - e^{-(t_c/\eta)^m} \equiv 1 - R(t_c) \quad (13)$$

$$f(t_c) = (m/t_c) \cdot (t_c/\eta)^m e^{-(t_c/\eta)^m} \quad (14)$$

で表現される⁹⁾。

m は形状母数、 η は特性寿命と呼ばれている。ワイブル確率紙では m と、 $t_0 = \eta^m$ なる t_0 が直接に求まり、 t_0 は尺度母数とも呼ばれる。

この時の平均値、分散はそれぞれ次式となる。

$$\bar{t}_c = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (15)$$

$$\sigma_c^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right] \quad (16)$$

ガンマ分布で $k=1$ の時は指数分布となり、これはランダムに生ずる事象に対応して必ず転覆が生ずる場合に相当する。ワイブル分布も指数分布を拡張したものであり $m=1$ の時はやはり指数分布となり、 $m>1$ では摩耗型の故障に対応する点も k と同様であるが、もともと直列形のシステム (例えば鎖の切れる確率) の信頼度に関して考え出されたものである。したがって m, η はガンマ分布で述べた k, ν ほど転覆については明確な物理的意味合いを有してはいないように思われる。

ここでは実験結果をワイブル確率紙にプロットし、得られたパラメータ m, η より (15), (16) 式と (5), (6) 式を組合わせて k, ν を

$$k = 1 / \left\{ \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) / \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right) - 1 \right\} \quad (17)$$

$$\nu = k / \left(\eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right) \quad (18)$$

より求め (5) 式より直接求めた k, ν と比較してみた。

まず Fig. 13 に市販のワイブル確率紙にプロットした例を示す。この確率紙は (13) 式の $R(t_c)$ の 2 度対数をとったもの (縦軸) が $\ln t_c$ (横軸) に関して直線になることを利用している。即ち得られたデータをワイブルプロットして直線になればワイブル分布していることになる。そして切片より $-\ln t_0$ が、傾斜より m が求まる。

この例では 21 回の転覆がプロットされており Fig. 9 (c) に対応している。得られた m_0, t_0 より η を求め (図

Fig. 13 Example of Weibull distribution fitting about t_c .

Fig. 14 Example of probability of capsizing in short term sea conditions.

中に示してある), (17), (18) 式より k, ν を求めると $k=6.24(6.0)$, $\nu=0.693(0.685)$ と得られる。() 内は平均値と分散から (5) 式のガンマ分布における関係から求めたものでありほぼ一致している。このことはまた Fig. 9(c) に点線で示したように m, η できまるワイブル分布と比較してもいえる。ここに示さない他のケースについてもワイブル分布のあてはめにより k, ν が大略求まるようである。

したがって実験結果をあてはめてパラメータを求めるだけならワイブル確率紙を使用した方が $F(t_0), R(t_0)$ もグラフから直ちに求められるので便利である。

Fig. 14 にワイブルプロットより得られた m, η を用いて転覆確率を計算した例を示す。これは風下側初期傾斜(大)の場合であるが、時間的な変化および実船スケールの有義波高が 3.8m から 5.7m と 1.5 倍になっただけで急速に転覆確率が增大する事がみてとれよう。ただし BK, スポンソンは有り、放水口は閉である。

また前節でみたように k, ν などが $GM, H_{1/3}$ の比較的簡単な関係で表現されれば比較的少ない実験で転覆確率の全体像がつかめるわけで転覆防止装置などの試みにも役立つ可能性があると思われる。

6 結 言

本研究は短期の不規則横波中の船の転覆確率(ある時刻 t_0 までに転覆している確率)の分布形を予想し、それを実験水槽で実験的に確かめるという新しい試みを行ったものである。使用したのは排水量 379 ton (満載状態)の漁船の 1/30 モデルであり特有の張出し甲板(Sponson)を有している。モデルには Deck House 等もついているが船内への浸水は無いようにしている。

排水量は一定とし重心の上下(G_z), 左右(G_y)位置を変化させた実験を行った。

本研究で得られた主たる結論は以下のとおりである。

(1) 船の転覆は機械あるいはシステムの故障と類似

性があると考えられ、信頼性工学でいう故障寿命たる転覆寿命の検討が有意な情報を与え得る。

(2) 比較的転覆しやすい状態(小さい GM , 積荷や風等による横傾斜がある場合など)での船の転覆確率はガンマ分布((3)式)で表現できるのではないかと予想したがこれは実験でも確認された。その際実用的にはワイブル分布へのあてはめによってもパラメータ推定が可能であり、それによる転覆確率の計算例を示した(Fig. 14)。ただしパラメータの理論的推定は今後の課題である。

(3) また(3)式の k, ν はそれぞれ転覆に至るまでの海水打込みの回数、打込みの単位時間当りの発生頻度などに対応づけられるものと思われる。しかもこれらは波高, GM などの変化に対して、予想される一定の変化の傾向を示し、第1次近似的に比較的簡単な関係で表現され得ることを示した(Fig. 10)。また以上のことから、規則波中の転覆実験でも時間的経過、即ち打込み回数などが意味を持つことになると思われる。

(4) 転覆確率に及ぼす GM , 船体傾斜および放水口, ビルジキール, ひいては張出し甲板の有無の影響なども実験的に示すことができた。ただし本文中の GM はすべて $G_y=0$, 即ち重心が船体中心線にある時の値で示したものである。

(5) 転覆寿命(t_0)の平均値($\bar{t}_0$)が無大となる有義波高, 即ち転覆を生じる最小の有義波高が明確に捉えられた。これは転覆の一つの目安となりうるものと思われる。

謝 辞

本研究実施に当たり日頃明快な助言を頂いている竹沢誠二教授、並びに実験、図面作製の面で尽力頂いた本学の宮川清助手、高山武彦技官に感謝したい。

更に、困難な本実験を卒業研究として、興味を持って熱意と創意により成しとげた西橋隆嗣(現在、日魯漁業株式会社)、森本一彦(現在、田原造船副社長)の両君にも謝意を表する。

また参考文献 9)~11)を御指摘頂いた高石敬史船舶技術研究所海洋開発工学部部長にも謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 田宮 真, 渡辺弥幸: 転覆に関する実験, 日本造船学会論文集, 第125号(1969).
- 2) Yamakoshi, Y., Takaishi, Y., Kan, M., Yoshino, T., Tsuchiya, T.: Model Experiments on Capsize of Fishing Boats in Waves. Proceedings of the Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, Oct. 1982.
- 3) Shama, M. A.: On the probability of ship capsizing, Shift & Hafen pp.870~872 (1976)

- 4) 例えば, 塩見 弘: 信頼性工学入門, 丸善株式会社 (1982).
 - 5) 運輸省船舶局: マリアナ海難に関連する漁船安全対策特別研究, 昭和 40 年度.
 - 6) 服部龍義, 他: 機械系フィールドデータの信頼性解析に関する考察, 三菱重工技報, Vol.13, No.6 (1976).
 - 7) Koyama, T., Hirokawa, S., Okumoto, K., Enomoto, M.: On a micro-computer based capsizing alarm system, Proceedings of the Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Tokyo, Oct. 1982.
 - 8) 平山次清: 海洋波の統計的性質, 日本造船学会誌, 第 609 号 (1980). (5.7) 式.
 - 9) Roden, S.: Welche Ergebnisse liefern Kenterversuche mit modellen?, Schiffstechnik Bd.9 (1962), Heft 48. pp.165~172.
 - 10) Roden, S.: Modellversuche in natürlichem Seegang, Jahrb. STG. Bd.56 (1962) pp.132~144.
 - 11) Krappinger, O.: Über Kenterkriterien, Schiffstechnik Bd.9 (1962), Heft 48, pp.145~154. (参考文献に関するノート)
- 転覆を確率論的に捉えた実験例を著者は知らなかった

が本論文提出後高石敬史部長より参考文献 9)~11) があることを御指摘頂いた。

文献 9) は転覆に至る時間が指数分布になると考察し, 湖の自然風波中での航走模型実験により得られた 12 の転覆例が指数分布となったことを示している。

文献 10) は 9) をまとめたもので転覆例のフィルムも示されている。

また文献 11) は理論的考察を行ったものでポアソン分布から最終的には指数分布を帰結しているが両者とも基本的には転覆の発生そのものがポアソン過程であることを前提としており同一分布となるのは, ある意味では当然ともいえる。なお 9), 11) とともに主として縦波中での話となっている。

一方, 本論文では 9), 11) とは異なり横波中の, 傾斜時をも含めた転覆を扱っている点, 前二者とは異なり転覆を生ずる海水打込み等がポアソン過程であるとし, その累積による転覆メカニズムを考えたためガンマ分布が帰結されたが, ガンマ分布は指数分布を特別な場合として含んでおり, より一般的な表現となっていると思われる点, 転覆の確率分布を機械あるいはシステムの故障の場合と対比することにより信頼性工学での知見を適用した点, 人工不規則波中でしかも放水口やスポンソンの影響なども含めた系統的かつ大量の実験データを示している点, などに特徴があるといえる。