

追波中の復原力喪失現象に対する 新世代非損傷時船舶復原性基準案の策定

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻 船舶設計学領域

久 保 尚 子

緒言

船舶は、ビルやダムなどと巨大構造物という意味では共通するが、水に浮かぶことで自由に移動できる点では大きく異なる。その移動性の代償として、バランスを失って転覆することもありうる。そのような転覆事故は乗員・乗客の生命の危機に直結するため、国連の専門機関のひとつである国際海事機関（IMO；International Maritime Organization）は世界共通の非損傷時復原性基準（荒天などで転覆することを防ぐ能力が十分であるか判断するための基準）を定めている。しかしながら、その現在の基準は経験則あるいは半経験則であり、しかもその根拠のデータとなる船舶は 1950 年代以前に建造されたものである。一方、その後大型化、推進性能や構造強度を追求しての船舶の最適化が進み、その結果として新形式の専用船が増加している。コンテナ船・自動車運搬船・クルーズ客船・カーフェリーなどであり、現在の海運の主力を担うとともに、転覆や横揺れにそれぞれ異なる弱点を抱えている¹⁾。その場合、転覆に至る現象も在来船での横波中同調横揺れとは異なることが多く、本研究で扱う追波中復原力喪失現象もそのひとつである。これは、ポーリング²⁾によれば、船がゆっくりと波に追い抜かれる状況下、波の山が船体中央を通過するとき船の横復原力が一時的に失われ、外力の影響とは無関係に転覆する現象といわれている。2009 年 11 月に発生した沖縄航路カーフェリー「ありあけ」の横転事故の原因とされた³⁾。IMO では、さらに向波中のパラメトリック横揺れ現象（非線形振動で知られるパラメトリック励振の 1 種で、超大型コンテナ船では横揺れ角 40 度にも達することがある。）や追波中の波乗り・ブローチング現象（高速航行時に操縦不能となる現象で、駆逐艦が 67 度傾いた実例がある。）を加えて、それぞれについての物理則による新基準を策定することを決定した。そして、IMO の復原性・満載喫水線・漁船安

全小委員会（SLF, Sub-Committee on Stability and Load Lines and on Fishing Vessels Safety）では、2007 年の第 50 回小委員会（SLF50）にて経験則に拠らない物理則ベース非損傷時復原性基準に対する基本方針が合意された。まず、第一・第二段階基準（vulnerability criteria）で新形式船か在来船かを判定し、不合格となった船は新形式船とみなして、数値シミュレーションなどによる第三段階基準（direct assessment）により詳細な復原性評価を行う。

最新の研究成果を用いれば、現在の船で実際に起こっている危険な現象（パラメトリック横揺れ、ブローチング、追波中復原力喪失現象など）について、コンピュータシミュレーションでその発生確率を推定することは射程範囲といえそうである。とはいえ、すべての船舶にそのような方法を適用することも設計能力の浪費であるから、まず簡易基準（第一・第二段階基準）で個々の対象船がどのモードに潜在的危険を有しているか簡単な計算で判定し、必要がある場合に限って、最新のシミュレーションによる確率論的評価を行う方向で議論が進んでいる。当然ながら、簡易基準で合格した船が第三段階で不合格となることは混乱を招くので、簡易基準、特に第一段階基準は、より大きな安全余裕を持つ必要がある。

さて、船の復原力とは、船が横傾斜したとき直立状態に戻そうとする浮力と重力からなる偶力であり、以下の式で表される。

$$\begin{aligned}\text{復原力} &= W \times GZ(\phi) \\ &\approx W \times GM \times \phi \\ GM &= KB + \frac{I}{V} - KG\end{aligned}$$

ここで、W は船の重量（排水量）、GZ は重力と浮力の着点間距離の水平距離、 ϕ は横傾斜角、KB は没水

体積の重心の船底からの高さ、 I は船首尾線まわりの水線面 2 次モーメント、 V は没水体積、 KG は船体の重心の船底からの高さである。そして GM は、 GZ の原点傾斜であり、横メタセンタ高さと呼ばれ、復原力をばねの力に例えるとそのばね係数にあたる。よって GM が正であれば、船は傾斜しても元に戻ろうとする力が働くことから安定とみなすことができ、 GM が負であれば、不安定を意味する。したがって、 GM は船の安定性の指標と考えることができる。この GM は、水線面 2 次モーメントが大、すなわち幅が広いほど大きく、船体重心が低いほど大きくなる。

ここまでの説明は船が波浪中にあるときも当てはまるが、 KG 以外のパラメータは波浪による没水部分の変化に応じて変わる。ここで注目すべきは、船と波の関係によっては GM が波のない平水状態から大幅に減少することもあり得るということである。

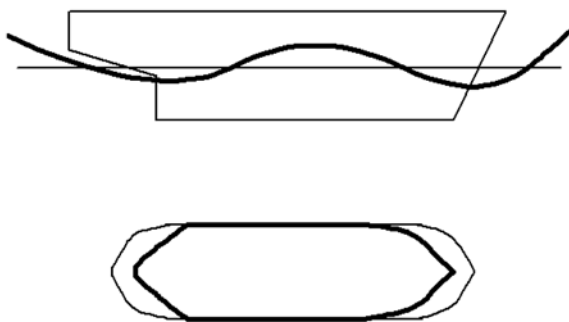


図 1 波の山が船体中央に位置するときの、水線面の変化を示す概念図

例えば図 1 のように、船の長さにはほぼ等しい波において、船の中央部に波の山があって、船首・船尾が波の谷にあると、船に働く横復原力は平水中よりもかなり低下する。なぜなら、船体中央部は船側がほぼ垂直で、水位が上がっても幅は変わらないのに対して、船首尾では水位が下がると幅は狭くなるため、水線面 2 次モーメント I が大きく減少するからである。逆に船の中央部に波の谷があって、船首・船尾が波の山がある場合、横復原力は平水中よりも増加する。この前者の場合には、波の大きさによっては横復原力がまったく失われることもある。このように釣合が存在せず静的に転覆するモードが復原力喪失現象 (pure loss of stability) と考えられてきた。すなわち船がほとんど横揺れ運動をしていない状態から、一つかそれ以上の数の大変險しい波に出会い、船体重心がその波の山にあるとき GZ 正の領域 (復原力の働く横傾斜角の範囲) を失って転覆することとされる。

2008 年の SLF51 では、追波中復原力喪失現象を含む新基準作業の名称を「新世代非損傷時復原性基準の策定」とし、本作業のためにコレスポンスグループ (CG) が設置された。そして 2010 年 6 月を期限に、サンプル船のデータを収集、公表するとともに、各国に基準案とその試算例の提出を要請した。復原力喪失現象については、米国政府と我が国政府がそれぞれ独自の基準案を CG に提案した。このうち我が国の案は、筆者ら⁴⁾の初期的な理論研究をベースにするものであり、その第三段階基準では前後揺れ (船の前後方向の往復運動) と横揺れ (ローリング; 船首尾軸まわりの往復回転運動) の 2 自由度連成運動を数理的にモデル化した。しかしながら、その計算モデルを大傾斜に至るまでのプロセスについて模型実験で検証するには至っていなかった。そこで CG への提案後、この我が国基準案の実験的な検証をまず試みた。その結果、一部の船舶の高速域での自由航走実験の結果を定性的・定量的に評価できなかった⁵⁾。これは船体中央が波の山にあるとき大きな横傾斜を行う現象では、その横傾斜により発生する蛇行運動による遠心力が純粋な復原力喪失に随伴して発生するため、特に左右揺れ (船の左右方向の往復運動)、船首揺れ (船の水平面内の首振り運動) との連成が大きい高速域では 2 自由度モデルでは推定できないものと推測された。

そこで 2011 年 11 月に筆者は新たに自由航走模型実験を行い、並行して前後揺れ・左右揺れ・横揺れ・船首揺れの 4 自由度シミュレーションモデルの構築を試みた。そして両者の比較により有効性が確認された新しいシミュレーションモデルによって基準案のうちの第三段階基準を確立し、厳密性と安全余裕を補完しながら復原力喪失現象の第一・第二段階基準案の具体化の可能性について検討することとした⁶⁾。

斜め追波中の自由航走実験

基準案に用いる数値シミュレーションモデルは、実際の物理現象と比較することによって検証することが望ましい。しかしながら、荒天中の船舶の転覆現象について、実際の船舶を用いた計測は危険で現実的でないため、力学上の相似則に注意を払った模型実験を行うこととなる。本研究では、C11 級ポストパナマックス・コンテナ船 (長さ 262 m、幅 40 m、喫水 11.5 m、方形係数 0.5621、 $GM1.928m$) の 1/100 スケール模型を用いて、独立行政法人水産総合研究センター・水産

工学研究所の角水槽において、斜め追波中の航走状態を再現するよう実施した。この水槽は長さ 60m、幅 25m、水深 3.2m の規模で、一面に 80 分割された電動機駆動の造波装置とその対辺にスロープ式の消波装置をもつ。模型船は、船内の固形バッテリーからの給電による電動機によってスクリュプロペラを一定回転させて推進する。また、搭載したコンピューターと光ファイバージャイロによってフィードバック制御のオートパイロット（自動操舵装置）を構成している。今回の実験ではいくつかの波長船長比の波において、速度と指令進路角の組み合わせによってどのような運動形態に至るかを調べた。この時、船体に搭載している光ファイバージャイロによって船の角速度を計測し、これを積分することによって横揺れ角・縦揺れ角・船首揺れ角の時系列を得た。また、陸上に設置したトータルステーションから投光し、船上のプリズムからの反射光を追跡することで、模型船の前後揺れ・左右揺れ・上下揺れの時系列を記録した。

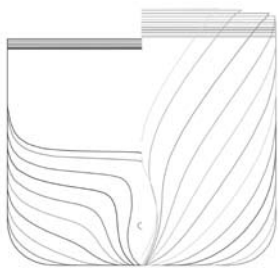


図 2 C11 級ポストパナマックス・コンテナ船の正面線図

実験の手順は次のとおりである。造波装置付近で模型をロープで係留し、角水槽内に波がある程度伝搬するまで船体を保持する。波が十分伝搬したところで、指定のプロペラ回転数とオートパイロット角を実現する制御を開始し、船体の保持を解いて波浪中で航走を開始させる。この結果、模型船は波を斜め後方から受けながらその進路を保つように自走する。この実験方法は非損傷時復原性の模型実験として ITTC（国際試験水槽会議）7.5-02-07-04.1 として登録、推奨されている方法に基づいている。

使用したコンテナ船は、図 2 に正面線図を示すように、船首の舷側が外方に傾斜、中央部は垂直舷側、そして船尾はトランサムスターンと、搭載コンテナ数を極力多く、船体抵抗は極力小さくするように設計されている。この結果、追波中では復原力が大幅に減少しうることになる。

自由航走試験の写真を図 3 に、実験結果を図 4-5 に示す。図 4 は規則波中の各フルード数での最大横揺れ角を示したものである。船速とともに横揺れ角が大きくなっていることがわかる。また、図 5 は不規則波中で各フルード数および進路角で自由航走試験を 7 試行行い、それぞれの最大横揺れ角の平均値をプロットしたものである。規則波と同様に、不規則波でも速度影響のあることが示された。ここで進路角は、船の進路が波の伝播方向であるときを零としている。



図 3 自由航走模型試験の写真

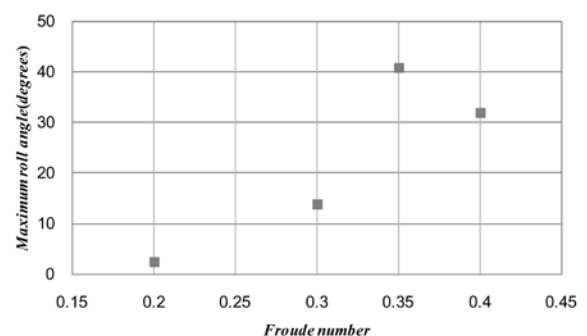


図 4 規則波中の最大横揺れ角の実験値
(波長船長比=1.0、波相度=0.05、指令進路=30 (degrees)、オートパイロットの比例ゲイン=3.0)

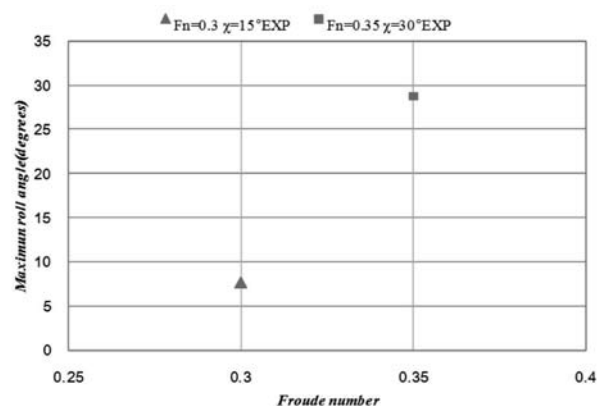


図 5 不規則波中の最大横揺れ角の平均値の実験結果
(有義波高=0.165 (m)、平均波周期=1.295 (s)、オートパイロット比例ゲイン $K_p=3.0$; フルード数 0.3 については指定進路角 15 度、フルード数 0.35 については指定進路角 30 度)

実験の観察結果から筆者は、船体中央が波の山にあるとき大きな横傾斜を行う現象は横傾斜により発生する蛇行運動による遠心力が純粋な復原力喪失に随伴して発生するため、特に左右揺れ、船首揺れの連成が大きい高速域では 2 自由度モデルでは推定できないものと推測した。したがって、本研究では、波浪中復原力変動を考慮した前後揺れ、左右揺れ、船首揺れ、横揺れの 4 自由度シミュレーションモデルを構築した。

4 自由度運動の数値シミュレーションモデル

不規則波中の前後揺れ、左右揺れ、船首揺れ、横揺れの 4 自由度数学モデルを考えた。これは平野・高品⁷⁾による横傾斜を伴う平水中操縦性数学モデルを斜め追波中に拡張したものである。

具体的には、次の 4 つの運動方程式であり、遠心力や揚力などに他の運動モードの影響を受けるため、これらを連立させて解くことになる。

前後揺れ方向の運動方程式

(見かけの質量) × (前進速度の時間微分) = (プロペラ推力) - (船体抵抗) + (波浪による前後力) + (遠心力)

左右揺れ方向の運動方程式

(見かけの質量) × (横方向速度の時間微分) = (遠心力) + (船体に働く揚力) + (波浪による横力) + (舵による揚力)

船首揺れ方向の運動方程式

(見かけの慣性モーメント) × (旋回角速度の時間微分) = (船体に働くムンクモーメントと揚力による旋回モーメント) + (波浪による旋回モーメント) + (舵の揚力による旋回モーメント)

横揺れ方向の運動方程式

(見かけの慣性モーメント) × (横揺れ角速度の時間微分) = (遠心力による横揺れモーメント) + (横方向付加質量力による横揺れモーメント) + (船体に働く揚力による横揺れモーメント) + (波浪による横揺れモーメント) + (舵による横揺れモーメント) + (横揺れ減衰力) + (平水中横復原力) + (波浪による横復原力の変化)

ここに含まれる流体力の各係数は、完全流体として扱う部分 (付加質量・波力・復原力など) について

は流体力学の理論計算により、粘性影響が必要な部分 (揚力・抵抗など) については拘束模型実験により、推定した。また、流体力係数への波の影響が船と波の相対変位の関数となるため、モデル全体としては、波という入力と運動という出力の関係は、非線形となって解析的な厳密解は得られず、時間領域での数値解が非線形近似解により表現される。

シミュレーションと実験結果の考察

図 6 は規則波中の各フルード数での最大横揺れ角を実験とシミュレーションで比較したものである。また、図 7 は不規則波中で最大横揺れ角を実験と 2 自由度 (2DoF)、4 自由度 (4DoF) シミュレーションで比較したものである。実験では $F_n=0.35$ かつ指令進路角 30 度では大きな横揺れ角が見られたのに対して、2 自由度モデルではほとんど速度影響がなかった。それに対して、4 自由度モデルでは速度影響があるとともに、定量的にも改善がみられた。また図 8 の時系列例に示されるように、この新しいシミュレーションモデルの有用性は示された。

このことから、復原力喪失現象には、縦波中による復原力変動のみならず、左右揺れ、船首揺れとの連成影響も考慮し、遠心力のような外力の考慮が必要であると考えられる。すなわち、復原力喪失現象とは、従来考えられてきたような復原力変動のみでは説明がつかないということである。

この点を IMO での復原性基準案の審議に反映させることが重要であると考えられ、実際に 2012 年 1 月に開催された SLF54 においてこの実験と計算の比較例を我が国代表団が紹介することで新たな合意案の枠組みに取り入れられた。

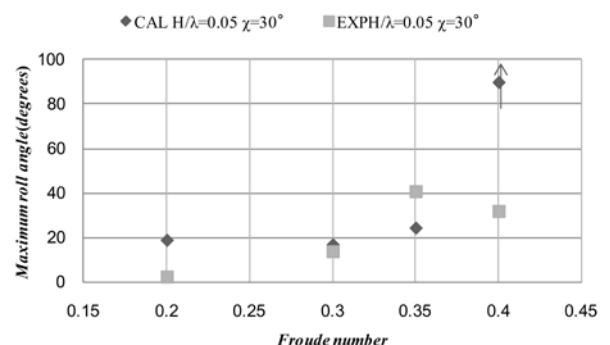


図 6 規則波中の実験とシミュレーションにおける最大横揺れ角の比較
(波長船長比 = 1.0、波幅度 (H/λ) = 0.05、指定進路角 (χ) = 30 度)

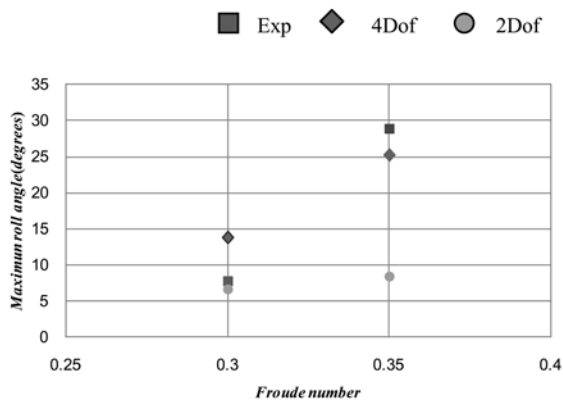


図7 不規則波中の最大横揺れ角の平均値の比較
(有義波高=0.165(m)、平均波周期=1.295(s)、オートパイロット比例ゲイン=3.0；フルード数0.3については指定進路角15度、フルード数0.35については指定進路角30度)

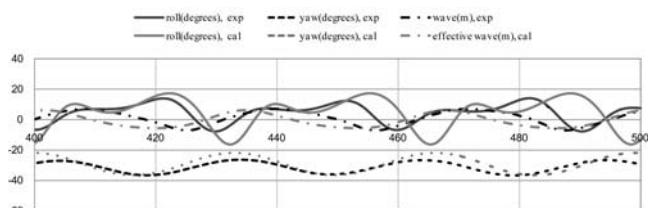


図8 規則波中の船の運動の時系列の比較
(波長船長比=1.0、波組度=0.05、フルード数=0.3、指定進路角=30(degrees)、オートパイロット比例ゲイン=3.0)

新基準案

2012年1月に開催されたSLF54において合意されたドラフト案は以下のとおりである(図9参照)。第一段階基準としては、水線面二次モーメントによる近似法による縦波中GMの最小値がある閾値以下であると危険と判定する。次に第二段階基準としては、数種類の周期的な波について、GZの最大値などがある閾値以下であると危険と判定する。これらに不合格の場合は、第三段階基準として4自由度の数値シミュレーションモデルなどにより北大西洋中の危険発生確率を計算することになる。ここで第一、第二段階基準の閾値は横傾斜による没水部非対称性からの横傾斜モーメントを表現するよう今後決定すべきとされた。

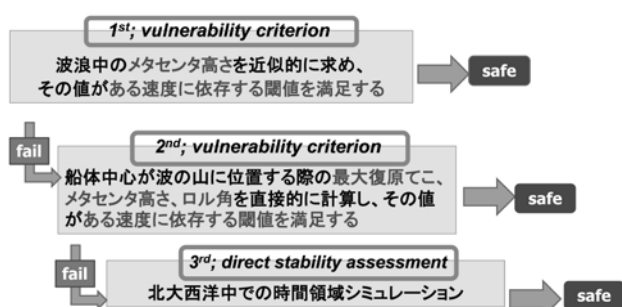


図9 SLF54での復原力喪失現象に関するドラフト案

このように、ドラフト案では枠組みは決定されたが、具体的な閾値は示されなかった。そこで、筆者は、その修士論文研究の最終段階として、これらの閾値を遠心力による横揺れモーメントのことで与える具体的な数式も提案した。すなわち次式である。

$$l = \frac{m u r z_H}{m g} = \frac{u}{g} r' \left(\frac{u}{L} \right) z_H' d$$

$$r' = \frac{0.4}{0.05} (H/\lambda)$$

m：船体質量、g：重力加速度、u：船の前進速度、r：旋回角速度、 z_H ：横力着力点と重心の距離、L：船長、d：喫水、 r' ：無次元旋回角速度、 z_H' ： z_H/d 、 H/λ ：波組度。ここで r' と z_H' は、あまり船型に依存しないことから、 $r' = 0.4$ 、 $z_H' = 1.0$ をこれまでの実績から推奨した。

この基準案は、その後、本年4月の段階で、日本政府よりCGに提案され、国の内外でその妥当性を検証するための試計算が行われているところである。

結言

最近のカーフェリーの事故で注目を集めている追波中復原力喪失現象について、模型実験と数値シミュレーションの比較を通して検討した結果、これまでの通説である復原力が波浪中で低下することだけでは傾向を説明できず、横傾斜による蛇行運動との連成が重要な役割を果たしていることを指摘した。そして、この結果を日本政府からIMOに提出することで、IMOでの新基準策定の枠組みにこの新しい結論を反映することができた。さらに、具体的な基準への提案も行い、現在IMOでその提案について試計算による検討が始まった。この新しい新基準案により、追波中復原力喪失現象に強い船舶が出現することを祈念する次第である。

謝辞

本研究の一部は日本財団の助成により(財)日本船舶技術研究協会が設立した2011年度「新世代復原性基準に関する調査研究(新世代復原性プロジェクト)」(プロジェクトマネージャー：大阪大学・梅田直哉)の一環として実施したものであり、実験にご協力いただいた水産総合研究センター含め、ここに関係各位に謝意を表します。また、本研究を進めるにあたり、ご指導いただいた梅田直哉准教授に心より御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 梅田直哉 (2012). 物理則ベースの新しい復原性基準で革新的な船を考えよう。Ship & Ocean Newsletter, 海洋政策研究財団。第 284 号。
- 2) Oakley O.H., Paulling, J.R. and Wood, P.D.(1974). "Ship Motions and Capsizing in Astern Seas", Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Cambridge, pp.1-51.
- 3) 運輸安全委員会 (2011). 船舶事故調査報告書, MA2011-2.
- 4) Kubo, H., Umeda, N. (2010). "Designing New Generation Intact Stability Criteria on Pure Loss of Stability on Wave Crest", Proceedings of 4th International Maritime Conference on Design for Safety, Trieste, pp. 75-82.
- 5) Yamane, K., Kubo, H. and Umeda, N. (2012). "Model Experiment on Pure Loss of Stability for a Ship in Following Waves", Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.13, pp.175-178.
- 6) Kubo, H., Umeda, N., Yamane, K. and Matsuda, A. (2012). "Pure Loss of Stability in Astern Seas -Is it Really Pure?-", Proceedings of the 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics, Johor, pp. 307-312.
- 7) Hirano, M. and Takashina, J. (1979). "A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect Due to Heel into Consideration", Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol.59, pp. 71-81.



国土交通省海事局安全基準課勤務
現在は、国際海運からのCO₂削減
基準策定に携わり、国際海事機関
(IMO) 対応業務に従事している。

(地球総合 平成 22 年卒 24 年前期)