



技術解説

## 船舶の復原性評価理論とその途上国海難への応用

梅田直哉\*

Ship Stability Assessment Theory and Its Application  
to Sea Disasters in Developing Countries

Key Words : capsizing, RoRo passenger ship, nonlinear, random process, Indonesia

## 1. はじめに

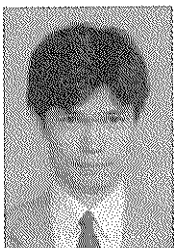
船舶は転覆するとそのすべての乗員乗客は瞬時に死に直面することとなる。このような転覆の例として、1954年の青函連絡船洞爺丸や1958年の客船南海丸の事故が我が国では思い出されよう。これらをきっかけに日本では船舶復原性規則(運輸省令)が制定され、それ以後旅客船の転覆事故は我が国では起こっていない。しかしながら、昨夏公開された映画「パーフェクトストーム」に示されたように、海外や漁船に目を向けると船舶の転覆はまだまだ多く、決して転覆は解決済みの問題ではない。というよりも、船の転覆がどのような条件下で起こるかという基本的なことすら理論ではなく経験の積み重ねとしての知見に頼っているのが実務上の現状に近い。

今日転覆の現実的な発生のパターンとしては次の3つがある。まず我が国においては漁船であり、20総トン以上に限ってもこの14年で5件の転覆が発生している。漁船は小型であるにもかかわらず母港を遠く離れて操業を行うため相対的に厳しい荒天に出会う可能性が高く、世界的にも事故が多い。次に、欧州ではこの20年に3件、損傷した大型カーフェリーの転覆事故を経験している。衝突などによる損傷破口から車両甲板に海水が侵入し、1万トンを越える

大船がたやすく転覆して数百の人命が失われた。さらに、東南アジアの途上国では損傷もないカーフェリーの転覆が頻発している。例えば、インドネシアではこの6年に実に7件の転覆が報告されている。<sup>1)</sup>そしてその多くは日本から輸出された中古船であった。以上3つの種類の事故発生率は、人々の生活水準の高まった20世紀最後のものであることを考えれば、異常に高く到底容認できないことは自明である。

このような転覆事故を防ぐために、管海官庁は復原性基準を定めている。その元締めに当たる国際海事機関(IMO)では、国際航海を行う船の損傷時復原性基準を「海上における人命の安全の条約」に定め、非損傷時復原性基準を作り各国の国内規則とするよう勧告している。また日本では国内規則である船舶復原性規則を旅客船のみならず漁船にも適用している。しかしながら、これらの基準の存在にもかかわらず、前述のように転覆事故は現実に発生しており、模型実験を行うとこれらの基準を満たす状態での転覆を引き起こすことはそれほど難しくない。この原因は、現在の基準が多分に過去の実績による経験則であるため、時代とともに変化する船型、船体構造にうまく対応できなくなっていることが指摘できる。

過去の経験にとらわれない復原性の評価のためには理論の活用が一つの解決のみちである。しかしながら転覆という現象は、直立付近の安定釣合から倒立した安定釣合への遷移という非線形現象であるため、今日の線形の仮定に基礎をおく船体運動理論はほぼ無力である。それでもその後の努力により転覆を扱うことのできる非線形理論もいくつか提案、改良されてきてはいる。<sup>2)</sup>ただ残念ながらこれまで現実の問題に明快な解答を与えることには必ずしもつながっていない。そのようななかで、最近筆者らの



\* Naoya UMEDA  
1957年4月5日生  
1982年大阪大学・大学院工学研究科・造船学専攻博士前期課程修了  
現在、大阪大学・大学院工学研究科・船舶海洋工学専攻、助教授、博士(工学)、船舶復原性  
TEL 06-6879-7587  
FAX 06-6879-7594  
E-Mail umeda@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

グループ<sup>3-5)</sup>は前述のインドネシアのカーフェリー事故の問題をひとつの非線形理論で取り組み、頻発する事故の状況をほぼ説明することができた。そこで、その非線形理論の方法と適用例を個々に紹介することで、船舶の復原性を理論的に評価する技術の可能性を考えていただくご参考に供したい。

## 2. 船舶の復原性評価の方法

船には直立状態から横傾斜すると直立状態に戻す方向にモーメント(復原力)が発生する。しかしながら、図1のように、横傾斜角が大きくなると線形近似(直立点での接線による近似)からはずれて、この復原力は非線形にふるまい、ある角度を越えるとその値は負となって転覆が生じる。このため転覆を扱うためには非線形な復原力を持つ横揺れの運動方程式を考える必要がある。もちろん転覆が発生するためには外力が必要であり、實際上、重要な外力は海洋波による傾斜モーメントである。

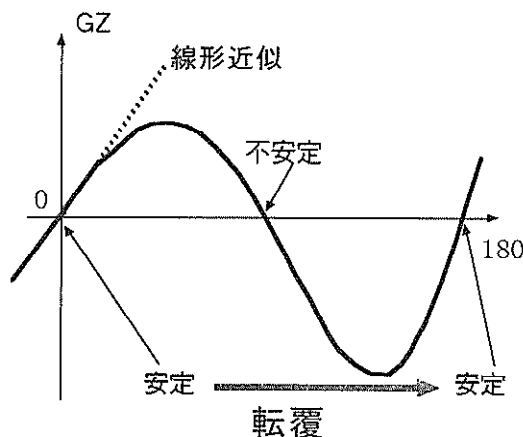


図1 復原モーメント・レバー(GZ)と線形近似

そして、この海洋波は規則的ではあり得ず不規則なものである。このようにして解くべき運動方程式は、不規則な外力項を持つ非線形の常微分方程式となる。これを解いて、ある時間経過後に運動が倒立状態に引き込まれる確率を求めるとこれが転覆の発生する確率となる。これが解くべき問題である。

現在、実用にも使われている船体運動理論では、この復原力を線形と近似するか等価線形化して扱う。また運動方程式中の他の流体力項も同様に線形近似され、流体力学的に精度良く計算される。この結果、不規則外力の影響は線形重ね合わせの原理によりエレガントに処理される。そして種々の確率特性は容

易に計算されるのである。唯一の欠点は、復原力が線形であるため、横揺れ運動の中心は変化せず、この理論の範囲では決して船は転覆しないことである。すなわち転覆確率は常にゼロであって復原性評価に役立たない。逆に非線形性は残して外力の不規則性を無視するとこれは他分野の非線形振動や非線形力学系の理論がかなり活用できる。とはいえ現実の海洋波はランダム以外の何ものでもないからそのままでは復原性評価に使うことはできない。

このようにして船の転覆を考えるためには、システムの非線形性と外力の不規則性を同時に扱うことが必要になってかなり難しい。(ここでは触れないが多自由度性がもう1つの難物である。)

この問題について考えられてきた非線形理論には大きく2つあり、1つはマルコフ過程によるものであり、もう1つは区分線形近似によるものである。このうち前者は計算が膨大となることもあり転覆確率について未だ十分な結果が得られていないのでここでは立ち入らない。ここでは筆者らの研究に用いた後者について述べる。

また常微分方程式の数値解は非線形でも容易に求まることを利用すればランダムな外力の多数の試行に対して転覆の発生の割合をカウントする数値実験も考えられる。しかしながら、たとえ復原性が問題となる船でも実存船の転覆確率の値を得るためには数値実験の反復回数は膨大なものが要求されて現実的とはいえない。

船の復原力を忠実にモデル化すると非線形となるが、これをいくつかの直線で近似するとそれぞれの区間内では線形と近似することができ解析解を利用できるため前進が期待できる。これは区分的には線形であるが全体としてみても非線形であり転覆も表現できる。これを区分線形近似といい、ロシアのベレンキー<sup>6)</sup>が船の復原性評価には最初に適用した。ただし、どのような方法で区分線形化するかがまず問題となる。筆者らの研究では、時間的に変動する外力下での船の転覆を決定する主要パラメーターが保存されるよう区分線形近似を行った。すなわち、横揺れの固有周期にかかわる復原力曲線の原点傾斜、復原力が正である角度範囲、そしてその部分の面積(ポテンシャルエネルギーに相当)が原形と同じであるように定める。図2のように、第1と第2の曲線の交点を $\theta_{m0}$ とすると、0度から $\theta_{m0}$ までが領域0、そして $\theta_{m0}$ から $\theta_v$ までが領域1となる。それぞれ

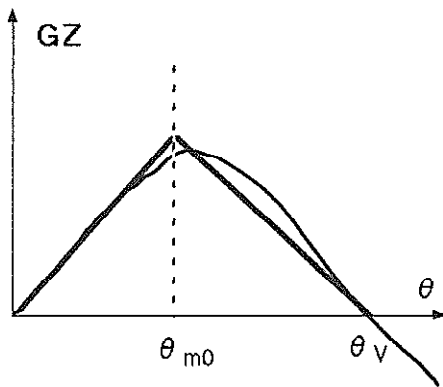


図2 復原力とその区分線形近似

の領域ではそれぞれの線形運動方程式が成立し解析解が容易に求まる。そこに含まれる任意定数は  $\theta_{m0}$  における境界条件により決定される。

このようなモデル化を行うと、転覆の発生条件は、横揺れ角が  $\theta_{m0}$  を越えたうえ、領域1でも横揺れ角が単調に増加していくこととなる。このため、転覆確率は、横揺れ角が  $\theta_{m0}$  を越える確率とそのとき領域1で固有値の実部が正となる条件付き確率の積として計算すればよい。現在の船体運動理論によれば、前者を波のスペクトルから求めることは容易であり、後者も数学的に求めることができる。ただしこのようにして求めた転覆確率は一定の波スペクトルのもとである時間だけ船が横波を受けたときに転覆する確率である。実際には海はなぎの時もあれば時化の時もあり、波スペクトル自体が時間とともにゆっくりではあるが変化していく。そこで波スペクトルを定める有義波高や平均波周期が出現する結合確率密度を波浪統計から推定したうえ、それを重みとして考慮することにより1年当たりの転覆確率を求めておくこととなる。横波以外を考えると横揺れ単独で扱うことはできず前後揺れや船首揺れなどの連成運動を考える必要がある。そうすると速度や針路、そして制御を含めた操船の影響と関係する。また船の重量、重心位置などは航海毎に、また細かくはゆっくりであるが時々刻々変化する。最終的にある船の1年あたりの転覆確率を推定するにはこれらの要素まで考慮することになる。

### 3. インドネシアのカーフェリー事故への応用

インドネシアは多数の島々からなる国であるから、島と島を結ぶ海峡フェリーは不可欠な交通手段である。2000年1月現在185隻のカーフェリーが就航さ

れているが、前述のようにこの6年間で7件の転覆事故を起こしている。このため1年当たり1隻当たりの転覆海難事故発生率を計算すると、 $6.31 \times 10^{-3}$  という値が得られる。これは交通機関としては異常に高い数字で通常の船舶は $10^{-6} \sim 10^{-7}$  といった危険度以下であるといわれる。このような高い事故発生率が理論的に説明できるかどうか問題となる。

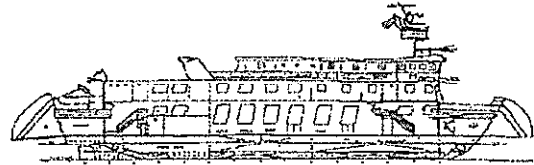


図3 検討対象としたインドネシアのカーフェリー

まずインドネシアのカーフェリーの主要目の分布を調べ、最も代表的な船でかつ船型を表わす図面が入手できるものとしてある500総トンのカーフェリー(図3)を選んだ。そしてこの船が設計重量で浮いている状態で種々の重心位置の場合について検討を行うこととする。現在のところインドネシアには国内の復原性規則がないのであらゆる重心位置を検討する必要があるためである。また、このとき船に働く復原力は通常の流体静力学の手順により、動的流体力は模型実験から主に推定した。波浪統計については、英国の研究機関BMTが公表している波浪データベースGWSを利用した。このデータベースは、より信頼できる風のデータベースから波浪を推算して、かつ対数正規分布に従うとして求められたものである。インドネシア水域についてはその一部をカバーするにすぎないが、それ以外に信用できる長期の波や風の統計がないためやむを得ないと考えた。ただし、このデータベースは $10^{-3}$ 以下の出現確率は無視しているが船の転覆では、これ以下の出現確率ではあるが険しい波が重要な役割を持つ。そこで公表データを対数正規分布に再度フィッティングした後、より小さい出現確率まで外挿するという方法をとった。この検討によると最終的に $10^{-5}$ までの出現確率まで考慮すると転覆確率の値は収束することがわかった。このような小さな出現確率までを波浪観測のみでカバーしようとするとは極めて長期間の連続的な観測が要求されることとなる。さらに海峡フェリーが主体ということと事故報告を検討した結果、ほとんどの転覆は横波状態で起こっていると判断されたので横波のみの検討にとどめた。

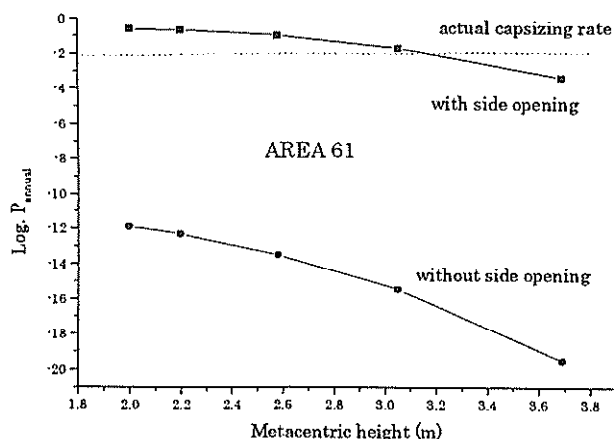


図4 インドネシアカーフェリーの1年あたり転覆確率の計算結果

このような方法により、インドネシアの代表的なカーフェリーの1年当たりの転覆確率を理論推定した結果を図4に示した。計算は車両甲板の船側に並ぶ開口部を実情そのままとした場合と閉じた場合について実施した。このうち実情に対応する理論計算値は、事故統計による破線の転覆発生率とほぼ同程度の大きさでしかも非常に大きな値となることがわかる。つまり理論は現実の事故の頻発する状況をよく説明しているわけである。そして、もし車両甲板の開口部を閉じると転覆確率の計算値は $10^{-12} \sim 10^{-20}$ 程度までに下がり、一般の社会生活よりもむしろ小さなリスクとなることが示されている。

インドネシアの多くのフェリーは実は日本の瀬戸内海で使われていた中小型のカーフェリーの中古であることが多い。たとえ新造でも船体構造は中古のものと同大差ない。瀬戸内海は極めて静穏な水域であるからこれらの中小型フェリーは転覆の恐れとは無関係に運航できている。しかし、それらの船がほとんど安全上の改善なしにインドネシアに輸出されるとどうであろうか。赤道に近いインドネシア水域は日本の外洋と比べてむしろ静穏といえるが日本の瀬戸内海よりは厳しい。なぜならインドネシアの島々の間の海峡はインド洋や太平洋に広く開いており、それらの水域の波浪が到達しうるからである。このため瀬戸内海で安全なフェリーもインドネシアで使用すれば危険ということになる。しかし、瀬戸内のフェリーの車両甲板の開口部を閉鎖するならばこれらの船はインドネシアでも非常に安全に運航できよう。これが今回の筆者らの理論計算が雄弁に主張す

るところである。

#### 4. おわりに

これまであまり実務上ではかえりみられることのなかった船の復原性の理論的評価法であるが、ここで適用したインドネシアのカーフェリーの事故頻発問題については明快な説明と改善策が示すことができた。この主な理由はインドネシアの事故が横波での転覆という力学的にはシンプルな状況下で発生していることにある。IMOの復原性基準などを適用している国の船舶では、横波での転覆はよほどの人為的ミスがない限り考えられず、むしろ追波や斜め追波中の転覆が実際の危険となっている。このため今回のような横波中の転覆確率をいくら計算してみても実用上の意味はうすい。このため追波、斜め追波中の転覆を計算する必要があるのだが多自由度というもう1つの難物が浮上ってきて理論の展開を数段難しくしている。しかしながら現在、筆者ら<sup>7)</sup>はこの追波、斜め追波中の復原性に全力を上げて取り組んでいるところであり、ごく近い将来、インドネシアのフェリーに対して得られたような明快な社会への提言が我が国や欧米の船舶にもできるものと信じて研究を進めている次第である。

なお本研究は、日本学術振興会の広島大学を拠点校とする二国間学術交流の一環として実施中のものであり、小瀬邦治教授はじめ関係各位に謝意を表す。

#### 参 考 文 献

- 1) Kose, K. and N. Bahreisy : Report for Safety Studies on Indonesian Ferry, Hiroshima University, March 2001, pp.1-99.
- 2) 梅田直哉：非損傷時復原性基準とその理論的背景，試験水槽委員会シンポジウム「操縦性および復原性基準に関する研究動向」，日本造船学会，2000年12月，No.8，pp.1-18.
- 3) Iskandar, B. H., N. Umeda and M. Hamamoto : Capsizing Probability of an Indonesian RoRo Passenger Ship in Irregular Beam Seas, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 188, December, 2000, pp.183-189.
- 4) Iskandar, B. H., N. Umeda and M. Hamamoto : Capsizing Probability of an In-

- donesian RoRo Passenger Ship in Irregular Beam Seas(Second report), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 189, June, 2001, pp.31-37.
- 5) Iskandar, B. H., N. Umeda : Some Examinations of Capsizing Probability Calculation for an Indonesian RoRo Passenger Ship in Waves, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, 236, September, 2001, (in press.)
- 6) Belenky, V.L. : Capsizing Probability Computation Method, Journal of Ship Research, 37, 3, 1993, pp.200-207.
- 7) Umeda, N. and M. Hamamoto : Capsize of Ship Models in Following/Quartering Waves-Physical Experiments and Nonlinear Dynamics-, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A. Vol.358, 2000, pp.1883-1904.

