

論文の内容の要旨

論文題目 砕波による小型船の転覆機構に関する研究

氏名 石田 茂資

小型船は、自船のスケールに比較して荒れた海象に遭遇することが多いため、転覆海難がしばしば発生している。海洋レジャーの発展に伴って、海難に占めるプレジャーボートの比率も増加していることから、小型船の転覆事故対策が急がれるところである。

小型船の安全基準としては、我国では「小型船舶安全規則」（20ト未満、1974）が制定されており、また国際的にはISO（国際標準化機構）において、全長24m以下の舟艇を対象に新たな復原性基準が検討されているところである。これらの基準では、まず海水が打ち込まない条件や過度に傾斜しない条件が準静的に定められている。また、風波中の動的な転覆過程については、中大型船を対象とした「船舶復原性規則」のいわゆるC係数基準が準用されている。C係数基準は、定常風を受けて定傾斜しながら横波によって同調横揺れしている船を想定し、そこに最悪のタイミングで突風を受ける場合を最も危険な状態と仮定して、傾斜エネルギーのバランスから安全性を評価したものである。この基準は、中大型船に対しては優れた基準として広く認められ、国際的にもこれを若干修正したものがIMO（国際海事機関）の決議A.562（Weather Criterion、1985）として採択されている。

しかしながら、小型船は以下にあげるような特徴を有する。

- ① 自船のスケールに比較して荒れた海象に遭遇することが多い。
- ② 水面下の形状は喫水が小さく幅広の船型である。
- ③ スケグやハードチェーンなど角のある複雑な形状を持つ。

- ④ 重心が比較的高い位置にある。また、初期復原力が大きいがブルワークトップが没水すると復原力は急に減少する。
- ⑤ 人の移動や荷崩れによる傾斜が大きい。

従って、風波がある程度大きくなれば大振幅の船体運動を生じるが(①, ②)、その振る舞いは中大型船とやや異なったものとなる。たとえば、静的に考えても大角度で傾斜すれば水面下の形状が大きく変化するし(②, ③)、動的に考えれば砕波等の外力によって大きな横流れを生じ(②)それが剥離を伴う複雑な流場につながる(③)。またこの他に、横風による定傾斜が小さい(④)、横揺れの回転中心が高い位置にある(④)、定傾斜を生じた時の流体力や運動特性が重要になる(⑤)、などの性質がある。

このような特徴は近年増加している高速船型にも共通する部分が多く、これを踏まえた上で安全性を検討しておくことが必要である。しかし、このような特徴を十分に踏まえた研究はほとんど行われていない。そこで、小型船の復原性基準は、中大型船のものを準用しているのが現状であるが、それが小型船の実態に必ずしも合わないことが指摘されている。たとえば、海難統計によれば小型船の転覆の主原因は波の作用であるが、上に述べたC係数基準では横風による傾斜モーメント、すなわち水面上の風圧側面積を重視しており、そこには整合性がない。

また、転覆に関する近年の研究では、追波中を対象にしたものや確率論的なアプローチが多くなっているが、小型船の転覆海難の記録によれば、突然の一、二発の大横波による転覆もまた多くを占めている。確率論以前の問題として、このような小型船の転覆メカニズムを明らかにしておく必要がある。

上に述べたような視点から著者は、船の横から来襲する一、二発の大波による転覆現象について研究を行った。剥離流を生ずる現象、すなわち粘性による非線形な流体力の影響が大きい現象であることから、ポテンシャル理論を用いた従来の船体運動理論が適用できないため、多くの実験を実施しながら研究を進めた。

まず、試験水槽に砕波を伴う集中性過渡水波を発生させ、これを真横から模型船に当てて転覆実験を行った。その結果、模型船の運動の顕著な特徴は、波の山で波下側に傾斜しながら波乗り状態となり、波下側にかなり速い速度で横流れすることであった。

そこで、大振幅かつ傾斜角をパラメータとした強制左右揺れ試験によって流体力を調べたところ、左右揺れ加速度に比例する成分(付加質量)は線形理論によるものと大きな差は見られなかった。しかし、減衰力では線形成分(造波減衰力)は小さく、運動速度の自乗に比例する抗力成分の寄与が極めて大きかった。そして、左右揺れ-横流れ連成流体力の減衰力成分(左右揺れ減衰力と同位相の傾斜モーメント)には、船型によって傾斜角に対する顕著な非対称性が確認された。

この連成流体力は、①船が傾斜した方向に横流れする場合には傾斜を大きくする方向に作用する、②逆方向に横流れする場合には傾斜モーメントがかなり小さくなる(場合によ

っては傾斜を小さくする方向に作用する)、という性質を示す。すなわち、この連成流体力は、上に述べたような「波の山での高速な横流れ」においては、船を転覆する方向に作用するものである。時間領域のシミュレーション計算を行って横揺れ運動を構成する各流体力の寄与を調べたところ、転覆運動の最終段階においては、この連成流体力が支配的な成分であることが判明した。そして、船体表面に作用する水圧分布を計測した結果から、①この流体力の性質はチェーン部に発生する局所的な剥離流に起因すること、②スケグを持った船型や V 字型の船型では船底中央からの大規模な剥離によってこのような危険な連成モーメントが生じにくいこと、等が明らかになった。

また、船型および波高をパラメータとして碎波中の転覆実験を行った結果から、次の結論が得られた。

- ① 波高が高い場合には短時間に転覆し、船型による運動の差は小さい。
- ② 波高が比較的低い場合には、船型によって転覆限界波高が異なる。また、転覆は碎波中ではなくそれに続く次の波で発生する。

①は、あらゆる海象下で転覆しない小型船を設計することが実際上困難であることを示している。従って、これは「荒天を避ける」という運用でしか解決できない。一方、②は安全基準によって防ぐべきものである。そこで、この転覆パターンのメカニズムについて詳しく検討したところ、次のような知見が得られた。

- ① 小型船の重心と衝撃力の作用中心との位置関係から、碎波による衝撃的な傾斜モーメントはあまり大きくない。
- ② しかし、碎波による衝撃モーメントは、「次の波に出会う条件」を変化させるという意味で重要である。
- ③ 「次の波に出会う条件」で最も危険なのは、波による傾斜モーメントと横揺れ速度が同位相となる、一種の同調状態になる場合である。
- ④ 同調状態になった船はかなりの角度まで傾斜する。その後は、上に述べた非対称な連成モーメントによって転覆に至る。

従って、小型船の安全基準は、この転覆メカニズムを反映したものでなければならない。

以上の検討から、小型船の性質を反映した C 係数基準の改良案を提案した。現在の C 係数基準の概念を図 1 に示す。この基準は、復原力曲線において風による傾斜モーメント (D_w) を考慮し、復原エネルギー (面積 ABC) が最大傾斜角から揺れ戻るエネルギー (面積 BDE) を上回ることを求めている。しかしながら、真に重要なのは風による傾斜モーメントではなく左右揺れ-横揺れ連成モーメントであり、それは船が波下側に傾斜した場合にのみ作用する。そこで、図 2 に示すように、上記連成モーメント (D_s) を傾斜角が正の範囲でのみ考慮する基準案を提示し、これが船型による転覆限界波高の違いを説明できることを明

らかにした。本研究で提示したのは新しい復原性基準のコンセプトの段階であるが、多くの小型船の実態を調査し、基準を評価するための各種パラメータ（たとえば想定する横流れ速度）を小型船の実態に合わせて設定することにより、合理的な復原性基準が定められ、転覆海難の減少につながるものと考えられる。

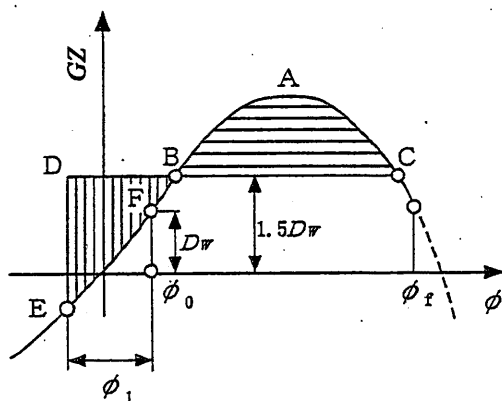


図1 現在のC係数基準

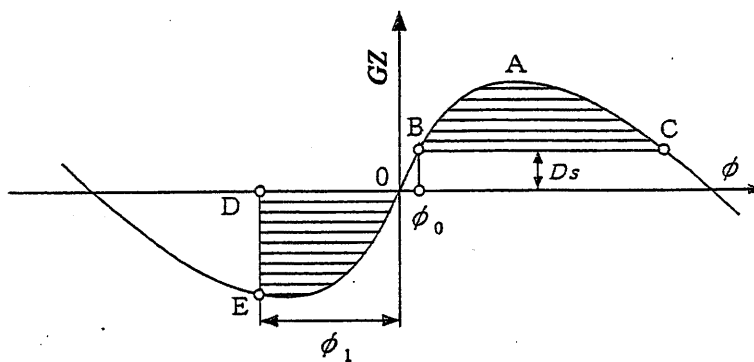


図2 C係数基準の改良案