横風横波中における船舶の復原性基準の研究

海上安全研究領域　＊小川　剛孝、石田　茂資

１．はじめに

現在、国際海事機関(IMO)において、非損傷時復原性能基準(以下 IS-Code)の見直し作業が行われている。この作業における主要な検討事項の一つに、横風と横波による転覆を想定した基準（ウェザークライテリオン、以下 WC）の見直しがある。

波浪中を航行する場合には、条件によって追波や斜追波中の方が横波よりも転覆の危険性が高い事が知られている。しかし、このような場合は適切な操船により危険な状況を乗り切る事ができる。一方、機関故障等によって操船不能となった場合には、横波中が最も危険な状態となる。従って、荒天中で操船不能になった時、すなわち、漂流しながら横風横波中にさらされた時でも十分な復原性を確保するための要件が必要である。WC はこうした前提のもとに策定されている。

一方、大きな風圧側面積と長い横揺固有周期を持つ巨大旅客船等の船舶が近年建造されるようになった。WC 中の諸係数は策定当時の船舶をもとに構築されているため、このような船舶に対する現行 WC の適用性ついて疑問が示され、また WC が設計上の大きな制約になることが指摘されている。

この事を背景として、海上技術安全研究所とオランダ海事研究所(以下 MARIN)は、巨大旅客船と WC の関係について計算と実験の両面から共同して検討を行った。ここでは、そのうち転覆確率を用いた安全性評価について報告する。

また、IS-Code の見直し作業では、今後出現する新形式船にも対応するため、いわゆる基準の機能要件化の一環として、模型実験や数値計算による安全性の直接評価も検討されている。その一部として、横風による傾斜モーメントレバーを推定するための模型試験法のガイドラインをまとめたので、その概要についても触れる。

２．ウェザークライテリオンの概要

はじめにウェザークライテリオンを概説する。この基準は、不規則波中で真横から定常風を受けながら横揺している船が、最悪のタイミングで突風を受けても転覆しない条件を定めたものである。そのため、図-1 に示す復原力曲線において（B の面積）＞（A の面積）となることが求められる。

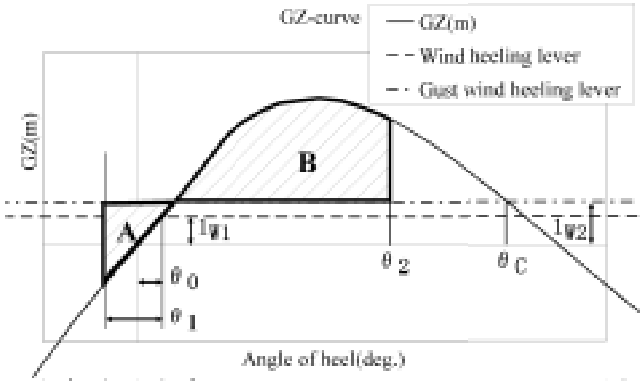


図-1　横風横波中での GZ 曲線

ここで、記号は以下のとおりである。

l_{w1}：定常風による傾斜偶力てこ

l_{w2}：突風による傾斜偶力てこ

θ_0：定常風による静的横傾斜

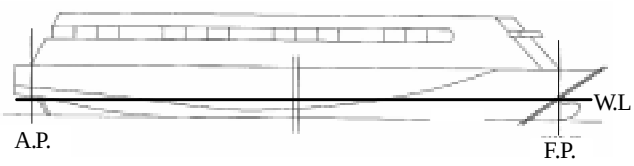
θ_1：不規則横波中での最大横揺角

θ_2：海水流入角又は 50 度又は突風による傾斜偶力てこと GZ が 2 度目に一致する角度(θ_c)のうち最も小さいもの

θ_1 は有効波傾斜係数と波岨度の関数となっており、有効波傾斜係数は重心高さ OG と喫水 d の比 OG/d の関数として規定されている。

一般に巨大旅客船は、図-2 に示すように浅い喫水で大きな上部構造物を有するため、OG/d は大きな値となる。そのため、WC で定義する関数を用いると有効波傾斜係数が 1 以上となる場合がある。

また、WC では波岨度が同調横揺を引き起こす波周期によって変化するとし、横揺固有周期と波岨度の相関表が与えられている。しかし、周期 20 秒（波長 624m）以上の波岨度を一定値としているため、固有周期の長い巨大旅客船等の横揺振幅を過大評価する傾向にある。



図－2　巨大旅客船の側面図

3．供試船型

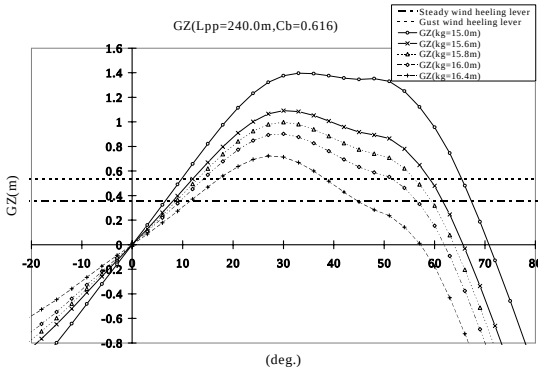
検討には、MARIN で設計された巨大旅客船を用いた。表-1 に主要目を示す。この船は典型的な最近の巨大旅客船である。横揺を抑制するものとしてビルジキールとフィンスタビライザを有しているが、操縦不能で漂流する状態を想定しているため、フィンスタビライザによる効果はないものとして検討した。

表－1 巨大旅客船の主要目

Lpp(m)	240
B(m)	32.2
D(m)	22
d(m)	7.75
Displacement(m3)	36895.58
Cb	0.616
B/d	4.15
Lomgitudinal radius of gyration in the air (kyy/Lpp)	0.25
Transverse radius of gyration in the air (kxx/Lpp)	0.45
Bilge keels	
length(m)	90 (S.S.2.75 - S.S.6.5)
height(m)	0.8
Windage areas	
lateral areas of superstructures (m2)	6445.6
lateral areas of hull above water line (m2)	3688.9

はじめに、この船の GZ 曲線を計算して積み付け状態（重心高さ KG あるいはメタセンタ高さ GM）と WC との関係について調べた。ここでは 5 状態の重心高さについて検討した。はじめに、現行 WC を満足する 3 状態(KG=15m、15.6m、15.8m、それぞれ OG/d=0.935m、1.013m、1.039m)を想定した。次に、本来 1 未満である有効波傾斜係数を 1、波岨度を 0.02 と修正した上で WC を満足する 1 状態(KG=16 m)、さらに修正した WC も満足しない 1 状態(KG=16.4m)を想定した。なお、波岨度の 0.02 は巨大旅客船の横揺固有周期（約 30 秒）と同じ周期の波岨度に相当する [1]。

図-3 に KG 毎の GZ 曲線を示す。計算では、船楼の影響と船内への海水の流入は考慮していない。WC で規定する定常風および突風によるモーメントレバーも図中に示す。巨大旅客船は水線面より上に大きな風圧側面積を有している事から、大きなモーメントが作用する事が分かる。



図－3　巨大旅客船の復原力曲線

4．転覆確率の計算

転覆確率は、梅田の方法 [2]により計算した。この手法は、横揺角の確率分布をガウス分布と仮定して復原力曲線上のエネルギーバランスから転覆の確率を計算するものである。厳密には転覆が発生するような横揺は非ガウス過程になると考えられるが、Iskander らの検討結果 [3]では、この違いが転覆確率に及ぼす影響はそれほど大きくないとされている。

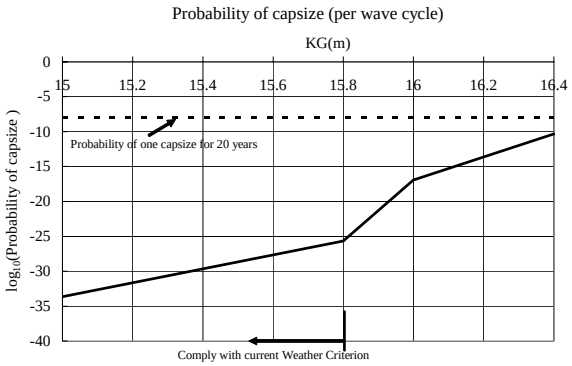
計算は横風横波中で船速無しの場合について行った。風については、WC での想定と同じく、定常風速を 26.5m/s、風圧力係数を 1.17 とした。波については、ビューフォート階級表に基づき、風速 26.5m/s に対応する有義波高 H_s=9.0m、平均波周期 T_{01}=11.6 秒を想定した。波スペクトルには JONSWAP スペクトラムを用いた。

横揺の計算には MARIN で開発された時系列計算

コード(FREDYN)を用いた。この計算法は、非線形ストリップ法の手法により線形及び非線形のポテンシャル流体力と操縦流体力及び粘性流体力を考慮した計算法[4]である。これにより、風波中での転覆まで含めた6自由度の船体運動を計算した。

5. 巨大旅客船の安全性

転覆確率の計算結果を図-4にKGの関数として示す。縦軸に対数軸で示したのは、1波周期当たりの転覆確率である。また、図中には比較のため20年に1度の転覆確率（10^{-8}）を点線で示している。この結果から、巨大旅客船の横風波中での転覆確率は小さい事が分かる。



図－4　巨大旅客船のKGと転覆確率の関係

またこの図から、KGが大きくなるにつれて転覆確率が大きくなること、WCを満足する付近のKGで転覆確率が大きく変化することが分かる。すなわち、この巨大旅客船ではWCが転覆確率を抑制している事が分かる。

他の船種については梅田ら[5]が検討を行っており、風圧側面積の大きな船についてWCが重要な役割を果たしていることが示されている。IS-Codeは基本的に全ての船舶に適用されるため、その重要部分であるWCの改正においても、既存船への影響を十分に考慮した取り扱いが必要と考えられる。

さらに、風のない波だけの場合（横波中船速無し）についても同様の計算を行った。その結果、全てのKGで転覆確率が10の-80乗以下と極めて小さくなる事が分かった。この事から、大きな風圧側面積をもつ船舶の安全性を考える上で、風と波を同時に考慮することの重要性が再確認できた。IMOでは、風と波を分離してそれぞれ別個に安全性を評価する提案もなされているが、風波共存時を想定するWCの枠組みを維持することが必要と考えられる。

6. 模型実験を用いた安全性評価

今後出現する新形式船にも対応するためには、模型実験や数値計算によって個船毎の安全性を直接評価する枠組みが必要になる。このことは、WCに限らずIMOの他の基準についても検討課題となっている。しかし、現在の数値計算の精度は基準に用いる上で十分とは言えない。

そこでIMOでは、WCの諸係数を模型実験によって評価することが検討されており、国際的に統一のとれた安全レベルを確保するための標準試験法案を作成中である。当所ではその一部として、横風による傾斜モーメントレバーを推定するための模型試験法のガイドライン案[6]をまとめたので、その主要点について述べる。

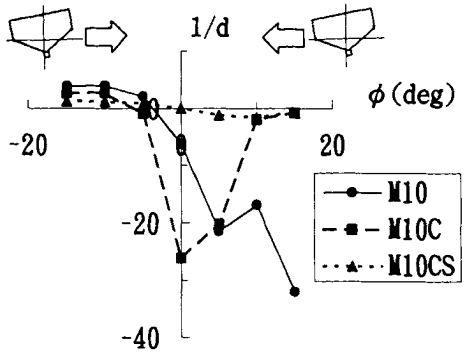
横風による傾斜モーメントM_{wind}を求めるためには、(1)式に示すように、水面上の船体に作用する風圧力F_{wind}とその着力点l_{wind}、水面下の漂流力の着力点l_{water}をそれぞれ求める必要がある。なお(1)式では、漂流力はF_{wind}と同一としている。

$$M_{wind} = F_{wind} \cdot \left(l_{wind} + l_{water} \right) \qquad (1)$$

(1)式において、F_{wind}とl_{wind}は風洞試験により求めるが、傾斜角の関数であるため、正確な評価には複数の模型を製作するか、模型を傾斜させる機構が必要になる。その際、傾斜によるトリムや浮上を反映する必要がある。ただし、一般に傾斜モーメントは傾斜角ゼロ付近で最大となることが多いため、安全側の評価として、直立時の結果を全傾斜角に用いても良いと考えられる。

一方、l_{water}は通常仮定される喫水の中央位置ではなく、場合によって船底下や水面上になることが知られているたとえば[7]（図-5参照）。これは、船底における水圧分布が大きな傾斜モーメントを発生するからである。従って、l_{water}を評価するため

には、模型船を水槽で横に曳航する試験が必要となる。前記のガイドラインでは、その際の留意点についてまとめている。



図－5　見掛けの水圧中心位置[7)]
（喫水で無次元化、船底勾配角 10°の 2 次元模型）
（M10：ラウンドチャイン船型、M10C：ハードチャイン船型、M10CS：ハードチャイン船型＋スケグ）

7. まとめ

巨大旅客船について、いくつかの積み付け条件（KG）で転覆確率を計算した結果、以下のことがわかった。

(1) 長い横揺周期を持つ巨大旅客船の転覆確率は KG に関わらず小さい。ただし供試船では、WC の規定する KG 付近で転覆確率が大きく変化する結果が得られた。

(2) 横波のみ（風なし）の状態では転覆確率は極めて小さくなる。従って、大きな風圧側面積を持つ巨大旅客船に及ぼす風の影響は大きく、風波共存時を想定する WC の枠組みは重要である。

また、WC の諸係数のうち、横風による傾斜モーメントレバーを推定するための標準模型試験法案について、主要点を紹介した。

ここでの研究成果は、IMO 第 46 回復原性・満載喫水線・漁船安全に関する小委員会（SLF46、2003 年 9 月）に日蘭共同提案文書[8)]及び日本提案文書[6)]として提出された。検討が行われた結果、WC の想定する状態が dead ship condition として維持されることや、模型試験による基準認証を認める方向性が了承されることとなった。

最後に、本研究の一部は 2002 年 11 月に海上技術安全研究所とオランダ海事研究所(MARIN)で締結した研究協力に関する包括的な協定に基づく共同研究により実施されたことを付記し、R&D 部長 J.O. DeKat 博士をはじめとする MARIN の関係者及び国内関係各位に厚く御礼申し上げます。

また、本研究の一部は(社)日本造船研究協会 RR-S202 基準部会（日本財団助成事業、平成 15 年度）との共同研究として実施したことを付記し、関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) Italy : Weather Criterion for the large passenger ships, IMO/SLF45/6/5, 2002
2) N. Umeda, Y. Ikeda and S. Suzuki: Risk Analysis Applied to the Capsizing of high-Speed Craft in Beam Seas, Proceedings of the 5th International Symposium on the Practical Design of Ships and Mobile Units, Vol.2, 1992
3) B. H. Iskandar and N. Umeda: Capsizing Probability of an Indonesian RoRo Passenger Ship in Irregular Beam Seas (Third Report), Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 190, Dec., 2001
4) J.O. De Kat : Irregular waves and Their influence on extreme ship motions, Proceedings of 20th Naval Hydrodynamics Symposium, 1994
5) N. Umeda and K. Yoshinari, Examination of IMO Weather Criterion in the Light of Capsizing Probability Calculation, Proceedings of the Society of Naval Architects of Japan, No.1, 2003.
6) Japan : Direct Estimation of Coefficients in the Weather Criterion, IMO/SLF46/6/14, 2003
7) 石田茂資他：小型船の二次元断面模型に作用する左右流体力の計測、日本造船学会論文集第 178 号、1995
8) Japan and the Netherlands : Assessment of the Weather Criterion for a Large Passenger Ship, IMO/SLF46/6/12, 2003