

29 船舶の非損傷時復原性国際基準の動向

海上安全研究領域 *石田 茂資、田口 晴邦、小川 剛孝、沢田 博史、南 真紀子
大阪大学 梅田 直哉

1. はじめに

国際海事機関（IMO）は、非損傷時復原性基準を包括的にまとめたISコード¹⁾を1993年に採択したが、大型旅客船等近年の船舶に対する適用性に問題が提起され、改正作業が行われている。この基準は改正後に一部強化化される予定であり、十分な検討を行っておく必要がある。

本報告では、ISコード全体の改正の動向について述べた後、実験によって安全性を評価する標準試験法について紹介する。また、近年問題となっている向波中パラメトリック横揺れにも触れる。

2. ISコード改正の動向

ISコードの改正は短期、長期の2課題に分けられる。短期的課題は本年9月のSLF48（第48回復原性・満載喫水線・漁船安全小委員会）が目標（当初予定は2004年）、長期的課題は2007年のSLFが目標となっており、コレスポンデンスグループ（以下CGと略す）が設置されて活発な検討が行われている。

2.1 長期的課題

長期的課題は、現コードを抜本的に見直し、物理現象に即したPerformance based criteriaを構築することであり、以下の3課題が挙げられている。

- (1) 波浪中復原力変動に関連する現象
- (2) Dead Ship Condition
- (3) 操縦性に関連する現象

(1)はパラメトリック横揺れや波の山での復原力喪失を対象としている。(2)は機関故障等によって船舶が制御手段を失った場合を想定しており、ISコードのウェザークライテリア（我国のC係数基準に相当、以下WCと略す）がそれに近いが、横波横風状態に限定せずに見直すことになっている。(3)はブローチングを対象にしている。なお、パラメトリック横揺れは、ISコードだけでなく追

波中操船ガイダンス²⁾の改正にも関連している。

これらの項目は本年3月のCG中間会合（著者の内2名が参加）で合意されたもので、具体的審議はこれからである。同会合では検討を促進するためのスプリンターグループの設置も合意され、(1)はドイツ、(2)と(3)は日本が取りまとめ役となった。

2.2 短期的課題

長期的課題には時間が必要なことから、短期的課題として、(1)強制部分を明確にしたISコードの再構成を行うこと、(2)WCと同等な標準模型試験法を開発すること、等が設定されている。

2.2.1 ISコードの再構成

ISコードの再構成は、現コードをPart A（強制部）、Part B（勧告とガイドライン）、Part C（解説）の3部、および付属書に組み替えるものであり、当面内容の大きな変更は伴わない。

Part A（強制部）には、現行ISコードの主要部である一般基準（GM₀、GZ曲線下の面積等）およびWCが含まれる。また、11の船種に対する特別要件のうち旅客船、タンカー*、木材甲板積み船、穀物ばら積み船*、高速船*の5種類が含まれる。ただし、*を付けた3船種はMARPOL 73/78等で、既に強化された他の基準を参照している。

他の6船種はPart B（勧告とガイドライン）に含まれることとなった。その理由は、トレモリノス漁船安全条約が未だ発効していない漁船、不必要に要件が厳しいコンテナ船基準（船長100m以上）のように、国際的合意が得られていないからである。またPart Bには、復原性計算法、転覆を防ぐ操船方法等のガイドラインが含まれている。

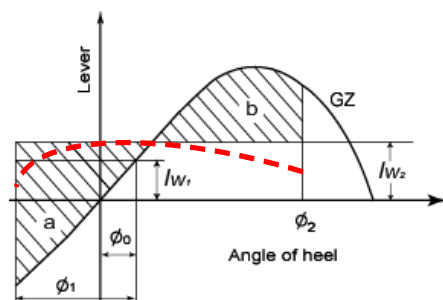
Part Cは解説部であり、用語の定義等の他、現在のISコードが作られた経緯や基礎データについて詳しく解説される予定である。

2.2.2 模型試験によるウェザークライテリアンの評価

風圧側面積の大きい大型旅客船等では WC による制限が不必要に大きいとして、早急な措置が主張されたことから、模型試験による WC の評価を認めることが合意された。これは、近年の機能要件化の一環とも言える。この標準模型試験法は、再構成された IS コードの付属書に Guidelines for alternative assessment of Weather Criterion として記載される予定である。以下、現在 CG で検討されている試験法の概要を紹介する。

3. 標準模型試験法の概要

WC の概念図を図－1 に示す。この基準は横からの定常風を受けながら不規則横波中で横揺れしている船が、波上側に最大傾斜した瞬間に突風を受けても転覆しない条件を定めたもので、面積 $b > \text{面積 } a$ を要求している。



図－1 ウェザークライテリアン

図中の記号は以下のとおりである。

l_{w1} : 定常風（風速 26m/s）による傾斜偶力てこ

l_{w2} : 突風による傾斜偶力てこ ($l_{w1} \times 1.5$)

ϕ_0 : 定常風による傾斜角

ϕ_1 : 不規則横波中で同調横揺れする時の振幅

ϕ_2 : 海水流入角、 50° 、 l_{w2} とGZ曲線が交叉する傾斜角のうちの最小値

模型試験では、このうち l_{w1} と ϕ_1 を求める。なお、現在の試験法では、この2つの量を傾斜角毎に計測すれば、図－1の破線のように l_{w2} を傾斜角の関数として良いとされている。このことは基準緩和につながる可能性があるが、詳しくはさらに検討が必要である。

3.1 定常風による傾斜偶力てこ (l_{w1}) の試験法

l_{w1} は横から定常風を受けて漂流する際の傾斜

偶力てこで、横風による傾斜モーメント M_{wind} 、漂流による傾斜モーメント M_{water} 、排水量 Δ を用いて次式で定義される。

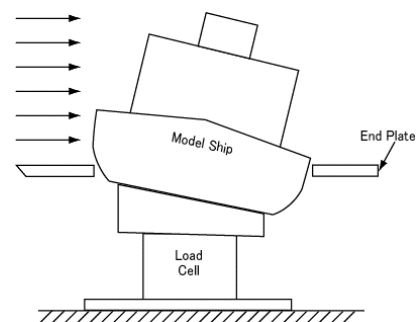
$$l_{w1} = (M_{wind} + M_{water}) / \Delta \quad \cdots (1)$$

これを傾斜角の関数として求めるには、風と漂流による傾斜モーメントを別個に計測する必要がある。その試験法は、当所で考案したものを基本として、以下のようにになっている。

3.1.1 M_{wind} の試験法

定常風による傾斜モーメントは風洞実験で求めるが、風速の均一性が保証されれば送風機を用いても良い。船が傾斜すると一般に喫水が変化するため、その変化量を計算で求めておき、図－2のような装置でモーメントを計測する。

このような計測を行った例は少ないが、日本造船研究協会の報告書³⁾では、傾斜モーメントの最大値が傾斜角 10° 以内で発生している。



図－2 横風による傾斜モーメントの計測法

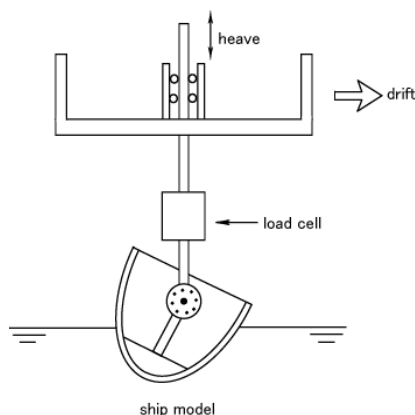
3.1.2 M_{water} の試験法

漂流による傾斜モーメントは、図－3のような装置を用い、台車によって模型船を真横に曳航して計測する。曳航速度は、図－2で計測した抗力係数とISコードの想定風速（26m/s）から求めた風圧力が曳航力と等しくなるように決定する。

漂流時の傾斜モーメントは、水圧中心が喫水の中央深さにあるとして計算することが一般的である。しかし、過去の実験例^{4), 5)}では、船底に作用する水圧分布の影響が大きく、見掛け上の水圧中心（＝傾斜モーメント／漂流力）が船底下や水面上になる場合のあることが分かっている。

その場合には、 l_{w1} 及び l_{w2} が現行基準からかなり

変化する可能性があり、また真横に曳航した時の流体力データが国際的に極めて少ないことから、当所でもさらに検証実験を行う予定である。



図－３ 漂流による傾斜モーメントの計測法

3.1.3 l_{w1} の評価

以上述べた試験は煩雑なため、簡易評価として、①風圧計測を直立時のみで行うこと、②曳航試験を行わず水圧中心深さを喫水中央として扱うこと、が選択肢として考えられている。その時の l_{w1} の評価は以下の案に従い、 l_{w2} は現在と同じく l_{w1} の1.5倍として扱う。

- (1) 2種類の流体力試験を十分大きな傾斜角まで行い、 l_{w1} を傾斜角の関数とする。
- (2) 上記①と②の簡易評価を組み合わせ、 l_{w1} を傾斜角に対して一定とする。
- (3) 流体力試験（傾斜状態を含む）と簡易評価の組み合わせの扱いは主管庁判断とする。

3.2 同調横揺れ振幅（ ϕ_1 ）の試験法

ϕ_1 は不規則横波中で同調横揺れする時の横揺れ振幅で、ISコードでは $\phi_1=0.7\phi_{1r}$ と仮定している。 ϕ_{1r} は規則波中における同調横揺れ振幅で、想定する波呺度は横揺れ固有周期（以下 T_ϕ と略す）の関数として規定されている。 ϕ_{1r} を求める試験法は、各国の提案を取り入れ、以下の3種類のどれを選んでも良いとされている。

3.2.1 直接法

規定された波呺度を持つ横波中の動揺試験から ϕ_{1r} を直接求める。直感的に分かりやすい方法であるが、大波高中で実験する必要があるため、造波能力の問題や、ガイド装置を使わない場合に模

型船の回頭が生じ横波状態を保持できない可能性等、必ずしも確実に実施できる方法とは言えない。また、大振幅運動の非線形性を考慮して、 T_ϕ 付近の複数の波周期での実験が必要とされている。

3.2.2 組立法

現在のWCを定めた際と同様の方法であり、大阪大学を中心にまとめられた。 ϕ_{1r} は次式で表されることから、横揺れ減衰係数 N と有効波傾斜係数 r を別個に求める。ここで s は波呺度である。

$$\phi_{1r} = \sqrt{90\pi r s / N} \quad \dots(2)$$

N は 20° 以上の初期傾斜を与えた自由横揺れ試験によって求める。別法として、周期 T_ϕ の強制横揺れをさせ、計測されたモーメントから減衰力成分を評価しても良い。

r は周期 T_ϕ の横波中の横揺れ振幅から求める。基本的に線形理論で十分とされるため、波呺度が高い必要はなく、用いる波は1種類で良い。これも別法として、模型船の横揺れを固定した状態で、波浪強制モーメントを計測しても良い。

3.2.3 パラメータ同定法（PIT）

以下に示す非線形方程式のパラメータ（ ω_0 , μ , β , δ , γ_3 , γ_5 , α_0 , α_1 , α_2 ）を横揺れ試験結果から求めた後、方程式を解いて ϕ_{1r} を決定する。

$$\begin{cases} \ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot c(\phi) = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot r \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ d(\dot{\phi}) = 2\mu \cdot \dot{\phi} + \beta \cdot \dot{\phi} |\dot{\phi}| + \delta \cdot \dot{\phi}^3 \\ c(\phi) = \phi + \gamma_3 \cdot \phi^3 + \gamma_5 \cdot \phi^5 \\ r \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{\omega}{\omega_0} + \alpha_2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \end{cases} \quad \dots(3)$$

d ：横揺れ減衰係数、 c ：復原力

ω_0 ：横揺れ固有角周波数、 ω ：波の角周波数

この方法は組立法より理論的に厳密と考えられ、また波呺度は直接法よりも小さくて良いが、2種類の波呺度で実験する必要があるため、実験工数は直接法の2倍になる。また、解析は複雑になる。

3.3 標準模型試験法のまとめ

以上述べた模型試験は主管庁の承認が必要とされており、実施に当たっては船舶検査官等のスキルアップが必要となろう。

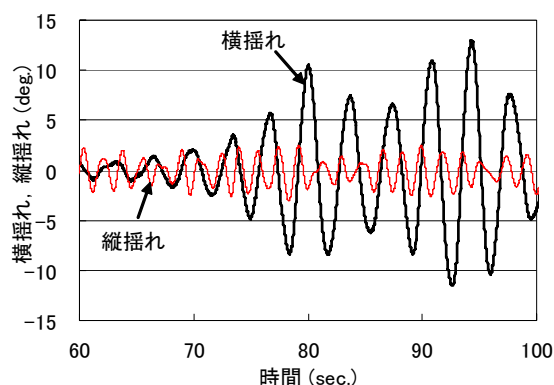
ϕ_{1r} の計測法は、各国の提案を取入れて 3 つの手法が併記されている。簡単に述べると、直接法は分かりやすいが実施不能となる可能性がある。組立法は厳密さに欠けるが少ない工数で確実に実施できる。PITはより厳密であるが工数が多く解析も複雑である。これらの方法の優劣や同等性について、さらに検討が必要と思われる。また、先に述べた漂流時の傾斜モーメントについても、現行基準による評価との比較検討が必要である。

また、3.2.2では日本提案の組立法を述べたが、理論的厳密性を重視するイタリアと意見の違いを生じており、模型スケール等他の問題を含め、意見調整が SLF48 まで続くものと考えられる。

4. 向波中パラメトリック横揺れ

パラメトリック横揺れは、波との出会い周期が横揺れ固有周期の 1/2 の時に発生する現象で（図－4）、その原因は波浪中復原力変動と考えられている。追波中では転覆の可能性があることから、IMOの追波中操船ガイダンス²⁾においても、この現象を防ぐための操船方法が示されている。

一方、近年問題となっている向波中パラメトリック横揺れは、1998 年に北太平洋で発生したポストパナマックスコンテナ船のコンテナ流出事故から注目されるようになった。IMOには上記事故⁶⁾の他、2003 年から 2004 年にかけて北大西洋上の自動車運搬船でパラメトリック横揺れが発生した際の船体運動の記録等⁷⁾が報告されている。



図－4 パラメトリック横揺れの時間波形

IMO では、この問題を IS コードの長期的課題として扱う他、追波中と同様な操船ガイダンスに

よる対応を検討することが合意されている。

この現象については、近年各国で精力的に研究が進められている。当所や大阪大学においても模型実験等を行い、運航状態、波浪条件と発生限界、最大横揺角との関連等について検討を行っているところである⁸⁾。その結果、波高が増加しても横揺れ角は頭打ちになる等、重要な知見が得られている。

5. まとめ

本報告では、現在審議されている IS コード改正の全体的な動向とウェザークライテリオンを評価する標準試験法について述べた。特に、標準試験法は最終化に向けて活発な議論が行われているが、解決すべき点が残されており、検証実験等により検討を続ける予定である。また、向波中パラメトリック横揺れについても、転覆につながる現象か否かを含め、今後も検討を行う予定である。

最後に、本研究の一部は（社）日本造船研究協会 RR-SP4 プロジェクト（日本財団助成事業、平成 16 年度）として実施したことをここに付記し、関係各位に御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments、A.749(18)、1993
- 2) Guidance for Masters to Avoid Dangerous Situations in Following and Quartering Seas、MSC/Circ.707、1995
- 3) 日本造船研究協会：船舶の波浪中における復原性に関する研究、SR17 報告書、1959
- 4) 菱田俊男、富武満：規則波上の風圧モーメント、造船協会論文集、第 108 号、1960
- 5) 石田茂資、藤原敏文：小型船の二次元断面模型に作用する左右揺流体力の計測、日本造船学会論文集、第 178 号、1995
- 6) Head sea parametric rolling and its influence on container lashing systems、submitted by The United States、SLF 45/6/7、2002
- 7) Recordings of head sea parametric rolling on a PCTC、submitted by Sweden、SLF47/INF.5、2004
- 8) 日本造船研究協会：RR-SP4 非損傷時復原性基準の改正案の作成に関する調査研究（平成 16 年度報告書）、2005
- 9) 小川剛孝、石田茂資：横風横波中における船舶の復原性基準の研究、第 4 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2004