

## 30 乾舷及び舷弧が波浪中での安全性に及ぼす影響の検討

海上安全研究領域 \*小川 剛孝、石田 茂資、南 真紀子、田口 晴邦

### 1. はじめに

現在、IMO（国際海事機関）において満載喫水線条約の見直しが行われている。既に第1次見直しは終了しており、最小船首高さ式、船首部予備浮力、ハッチカバー荷重等が改正された。これらは2005年1月1日から発効している。今後は乾舷表の見直しを中心に検討を行うこととなっている<sup>1)</sup>。著者らは、これに関連して船舶の安全における乾舷や舷弧の役割を整理する<sup>2)</sup>とともに、その役割を定量的に検討している。

乾舷が船舶の安全のために果たす主な役割に海水打ち込みの制限がある。合理的な安全確保と船舶設計の観点からは、ある程度のレベル（冠水確率）の海水打ち込みを許したうえで、船内浸水防止、船員保護及び甲板上構造物保護のための要件を課すことが適切であるといえる。

この考え方にもとづき、乾舷を設定するためには冠水確率を評価する必要がある。しかしながら、冠水確率だけをもとに安全性を評価することは不十分である。そのため、他の安全性要件や指標との相関にもとづき評価するのが適切であるといえる。具体的には、波浪中での耐航性能とこれに関連する安全基準との関係を検討する必要がある。

乾舷や舷弧のもう一つの役割に予備浮力の確保がある。予備浮力とは十分な復原力を確保するために必要な浮力を意味する。現行条約では、標準舷弧を持たない船舶は舷弧の不足分に応じて乾舷を増やすように定められている。乾舷表の見直しでは舷弧や船楼の役割を検証する必要がある。そのためには、予備浮力が復原性の確保以外に耐航性能に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。このことは、先に改正された船首部予備浮力の検討<sup>3)</sup>においても明確にされていない。

本研究では、これらの検討を目的とした模型実験を行なった。乾舷及び舷弧の異なる3隻のケー

ブサイズバルクキャリアを用いて、波浪中での耐航性能の評価指標である船体運動、上下加速度、波浪荷重、相対水位及び打ち込み水圧を計測した。実験結果をもとに乾舷及び舷弧が波浪中船体応答に及ぼす影響を検討したので報告する。

### 2. 冠水確率と船型要素

はじめに、冠水確率と船型要素との関係について概観する。一例として、図-1に夏期満載喫水に相当する乾舷を適用した船舶のF.P.での冠水確率と船の長さ（ $L_f$ ）の関係を示す<sup>2)</sup>。ここでは、相対水位変動の極大値が乾舷を超えた長期発現確率を冠水確率と定義する。計算対象とした船種は、バルクキャリアとタンカー（オイルとケミカル）である。これらの船舶の乾舷は、基準で規定する乾舷と同じである。冠水確率はA型、B型及び減少B型（B-60型）乾舷毎に示す。縦軸は冠水確率を対数軸で表す。船の長さが大きくなるにつれて冠水確率が相対的に小さくなっており、冠水確率と船の長さの相関が強いことがわかる。また、A型船舶の冠水確率は同じ長さのB型船舶の冠水確率よりも高くなっている。B-60型船舶の冠水確率は、A型船舶の冠水確率とB型船舶の冠水確率の中間の確率となる。乾舷の大きさは、B型船舶の乾舷が最も大きく、次いでB-60型、A型の順番になっている。これらのことから、冠水確率と乾舷の相関が強いこともわかる。

冠水確率が異なることは、打ち込みを制限するレベルが異なることを意味する。よって、B-60型、A型にはそれぞれ別の要件を課すことで同等な安全性を確保するのが現行規則の考え方である。そのためには、乾舷の違いにより生じる冠水確率の差を評価する必要がある。

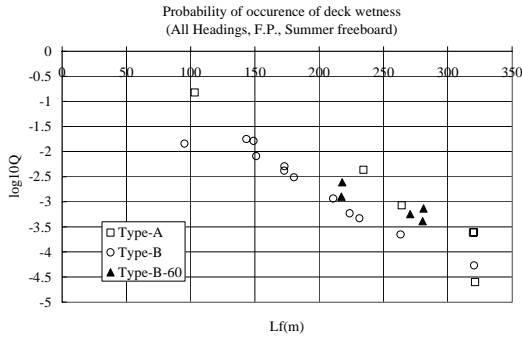


図-1 冠水確率 (F.P.) と船の長さの関係<sup>2)</sup>

### 3. 水槽実験による乾舷及び舷弧の役割の検討

#### 3. 1. 実験条件及び計測項目

乾舷の大小と舷弧の有無が耐航性能に及ぼす影響を検討するために水槽実験を行なった。当所80m角水槽において、規則波及び不規則波中自由航走実験を行った。実験には、船首部水線面上形状が異なる以下の3隻のケーブサイズバルクキャリア(Lpp=280m)を用いた。

- 夏季満載喫水に相当する乾舷を有する母船型 (実際の乾舷、以下 Base)
  - 母船型から乾舷を小さく (喫水を深く) した船型 (以下 Low Freeboard)
  - 母船型から舷弧修正分の乾舷を除き、かわりに標準舷弧を設置した船型 (以下 Standard Sheer)
- 実際の船舶では、乾舷を小さくする事は積荷を増やすことに相当すると考えられる。そこで、設定した喫水に対する積み付けを母船型とは別に設定した。その結果、乾舷を小さくした船型 (Low Freeboard) の重量分布は他の2船型と異なる。

実験では、正面向波 ( $\chi=180^\circ$ ) 及び斜向波 ( $\chi=135^\circ$ ) における船体運動、相対水位変動、縦及び水平方向の波浪荷重 (曲げモーメントと剪断力)、加速度、打ち込み水圧を計測した。不規則波は実船スケールで平均波周期  $T_{02}=13.1$  秒、有義波高  $H_{1/3}=10.1$ m に設定した。波スペクトルはISSCスペクトルを用いた。出会い波の数は約1000波である。

回転運動は、光ファイバージャイロを用いて計測した。軸方向の運動は、ジャイロアクセロメーターにより加速度を計測して、これを変位に換算した。相対水位変動は、容量式波高計を船首及び船側部7箇所 (S.S. 91/2, S.S. 9, S.S. 8, S.S. 7,

S.S. 5, S.S. 21/2, A.P.) の計8箇所に取り付けて計測した。波浪荷重は、船体を S.S. 71/2 で2分割して取り付けた検力計により計測した。分割部には、防水のために張力を持たないビニールシートを貼り付けた。加速度は、S.S. 91/2 及び S.S. 7 に加速度計を取り付けて、S.S. 91/2 で上下加速度、S.S. 7 では上下及び水平加速度を計測した。打ち込み水圧は、船首楼甲板上の2箇所 (S.S. 9, C.L. から左右に実船スケールで各3.5m) に水圧計を取り付けて計測した。

#### 3. 2. 規則波中実験結果

結果の一例として、斜向波中 ( $\chi=135^\circ$ ) での上下加速度振幅の応答関数を波高毎に整理して図-2に示す。縦軸はフーリエ解析により求めた1次成分であり、加速度振幅  $a$  を波振幅  $\zeta$  及び船長  $L$  の比  $L/\zeta$  で無次元化した値である。同じく図中には、当所で開発した大波高中船体運動推定法NMRIW<sup>4)</sup>による計算結果を線で示す。

加速度振幅の無次元値は、波高が大きくなるにつれて小さくなっており、波高による非線形影響が現れている。この影響は、運動の同調点付近で顕著になる。NMRIWによる計算値は、海水打ち込みが激しく発生する大波高中では過大評価となるものの、波高による非線形影響をよく説明している。このことから本研究で得られた実験値は合理的な結果であることがわかる。

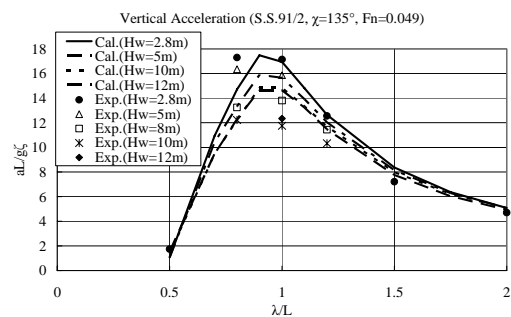


図-2 上下加速度の答関数 (S.S. 91/2、母船型 (Base)、斜向波、Fn=0.049)

船体応答に対する乾舷及び舷弧の影響を調べるために、実験値を波傾斜  $H/\lambda$  の関数として整理した。一例として、縦揺及び縦剪断力の結果を図-3及び図-4に示す。縦揺振幅  $\theta$  は最大波傾斜  $k$   $\zeta$  で、

縦剪断力振幅 $F_V$ は波振幅 $\zeta$ 、船長 $L$ 、船幅 $B$ の積 $BL\zeta$ で無次元化した値である。

これらの図から、Base と Standard Sheer の無次元振幅には有意な差が無いことがわかる。一方、Low Freeboard の無次元振幅は他の 2 船型よりも小さい。積み付け状態の違いから、Low Freeboard の縦運動の同調点は他の 2 船型と比べて長波長側となる。そのため、波長船長比  $\lambda/L=1.0$  の規則波中では、Low Freeboard の振幅は小さくなる。

打ち込み水圧の極大値も同様に整理して図-5 に示す。縦軸は、フルード則にもとづき実船スケールに換算した値を表す。Low Freeboard、Base、Standard Sheer の順で乾舷が低くなるにつれて、打ち込み水圧は顕著に大きくなる。Base と Standard Sheer の違いは船体運動や波浪荷重にはあまり影響しないが、舷弧の高さによって船首を乗り上げる波の高さが変わるため、打ち込み水圧には大きく影響する。

### 3. 3. 不規則波中での超過確率

長波頂不規則波中で計測した時系列から極値のヒストグラムを求め、これから超過確率を計算した。斜向波中 ( $\chi=135^\circ$ ) での縦揺、相対水位変動及び縦曲げモーメントの超過確率を図-6 から図-8 に示す。縦軸は超過確率を対数軸で表わす。横軸は船体応答の極値の絶対値を表わす。縦揺は船首上げ、相対水位は水面上昇を正、縦曲げモーメントはサギングをそれぞれ正とする。図-7 の相対水位は実船スケールに換算して、それぞれの船型での乾舷を示す。図-8 には、IACS-UR-S11 で規定される縦曲げモーメントを比較のために示す。

打ち込み水圧の極大値の超過確率についても図-9 に示す。図中には、改正された満載喫水線条約第 16 規則で定義する打ち込み水圧も示す。横軸の打ち込み水圧は、フルード則にもとづき実船スケールに換算した値である。

大波高中で海水打ち込みやスラミングが激しく発生するようになると、正負の極大値の非対称性が大きくなる。とくに、相対水位は大振幅になると波崩れを起こすために縦揺に比べて非対称性が顕著になる。

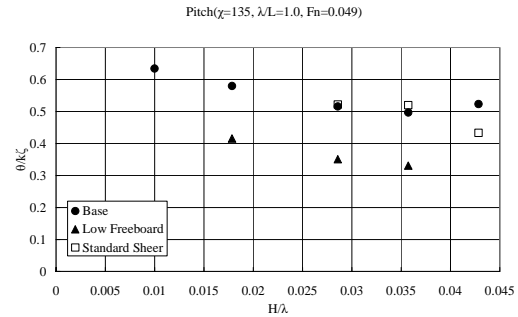


図-3 縦揺に及ぼす波高の影響(斜向波、 $\lambda/L=1.0$ 、 $Fn=0.049$ )

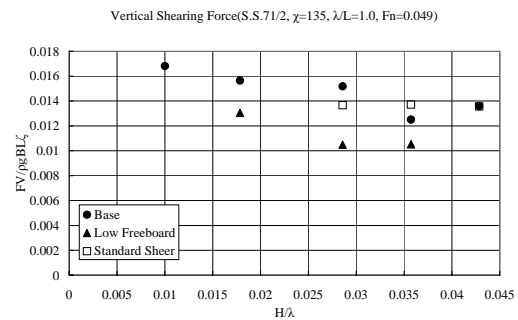


図-4 縦剪断力に及ぼす波高の影響(S. S. 71/2、斜向波、 $\lambda/L=1.0$ 、 $Fn=0.049$ )

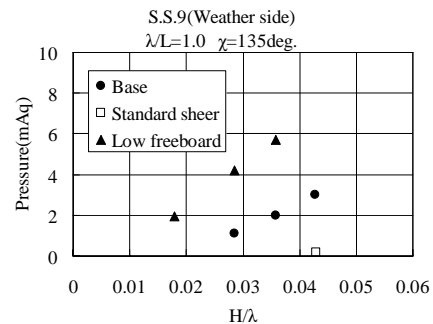


図-5 打ち込み水圧と波高の関係(S. S. 9、斜向波、 $\lambda/L=1.0$ 、 $Fn=0.049$ )

Base と Standard Sheer の違いが確率分布に及ぼす影響は小さい。これに対して Low Freeboard は、他の 2 船型と比べて分布が大きく異なる。積み付け状態の違いから、Low Freeboard の縦運動の同調点は他の 2 船型に比べて長波長側となる。そのため、今回の実験に使用した平均波周期の不規則波中では、Base と Standard Sheer の振幅が Low Freeboard よりも大きくなっている。この関係は規則波中での実験結果と整合する。

一方、Low Freeboard、Base、Standard Sheer の順で船首高さが小さくなるにつれて、同じ確率

で発生する打ち込み水圧は顕著に大きくなっている。水圧0での確率に相当する冠水確率も大きく異なることがわかる。

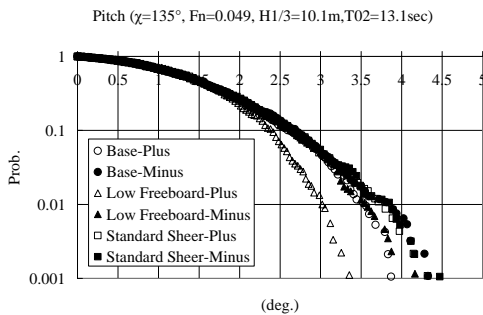


図-6 縦揺の超過確率(斜向波、有義波高 10.1m、平均波周期 13.1 秒、Fn=0.049)

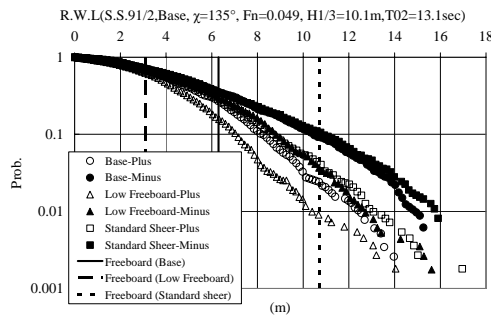


図-7 相対水位変動の超過確率(S. S. 91/2、斜向波、有義波高 10.1m、平均波周期 13.1 秒、Fn=0.049)

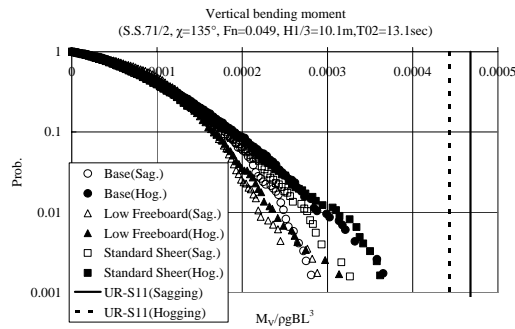


図-8 縦曲げモーメントの超過確率(S. S. 71/2、斜向波、有義波高 10.1m、平均波周期 13.1 秒、Fn=0.049)

これらの実験結果から、舷弧の有無は船体運動にあまり影響を及ぼさないが、舷弧の高さによって船首を乗り上げる波の高さが変わるために打ち込み水圧が異なることがわかる。

これに対して、乾舷の違いはそれに伴う重量分布の違いと合わせて船体運動に影響を及ぼす。さらに、乾舷の高さの違いが打ち込み水圧に及ぼす影響も大きい。

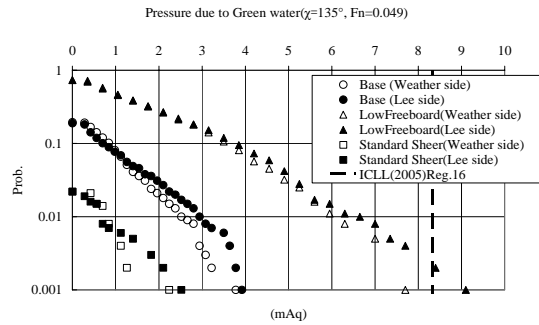


図-9 打ち込み水圧の超過確率(S. S. 9、斜向波、有義波高 10.1m、平均波周期 13.1 秒、Fn=0.049)

#### 4. まとめ

乾舷及び舷弧の異なる3種類の船型を用いた実験結果から、乾舷及び舷弧が船体運動や海水打ち込みに及ぼす影響が明らかとなった。これにより、乾舷や舷弧は打ち込み水圧を適切に抑制するように設定する必要があるといえる。舷弧は船体運動に及ぼす影響は小さいことから、主に復原力と打ち込み水圧の観点から規定すればよいといえる。

今後は、本研究で得た知見にもとづき定量的な検討をさらにすすめる予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、日本財団の助成事業として(社)日本造船研究協会(現(財)日本船舶技術研究協会)が設立した「乾舷規則の改正案の作成に関する調査研究プロジェクト(RR-SP3)」の一環として実施したことを付記し、関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) IMO/SLF : Report to the Maritime Safety Committee, IMO, 2004.
- 2) Y. Ogawa et.al. : Methodology for the rational revision of the load line convention from the technical point of view, Proc. of 2<sup>nd</sup> International Maritime Conference on Design for Safety, 2004.
- 3) 小川剛孝:海水打ち込み、JTTC シンポジウム「実海域における船舶性能に関するシンポジウム」第3-1章、2003.
- 4) Y. Ogawa et.al. : The effect of a bow flare shape on the water impact pressure, Proceedings of 16th ISOPE, 2005.