

(昭和50年11月日本造船学会秋季講演会において講演)

## コンテナ船の波浪中での限界速度

正員 北 沢 孝 宗\*    正員 黒 井 昌 明\*  
 正員 高 木 又 男\*

Critical Speed of a Container Ship in Rough Sea

by Takamune Kitazawa, *Member*    Masaaki Kuroi, *Member*  
 Matao Takagi, *Member*

### Summary

The critical speed of a high speed container ship in irregular waves is investigated theoretically by strip method and statistical calculations. In this paper, "deliberate loss of speed" is mainly discussed in details.

The purpose of this study is the followings :

- (1) To find the best way of shiphandling in rough sea.
- (2) To inquire into the ship forms which have better seakeeping qualities.

Seven factors of seaworthiness are discussed :

- (1) Vertical Acceleration at F. P.
- (2) Deck Wetness at F. P.
- (3) Slamming
- (4) Vertical Wave Bending Moment
- (5) Propeller Racing
- (6) Lateral Acceleration at S. S.  $8\frac{1}{2}$
- (7) Rolling

The critical values and probabilities of these factors are checked, and the maximum ship speed, below which a ship safely navigates across the rough sea, is determined.

These analyses are possible for all kinds of ships, and they will be useful not only for shiphandlers but also for ship designers who are concerned about seakeeping qualities of ships.

## 1 緒 論

船舶の荒天航行の問題は、操船者ばかりでなく船舶の設計者にとってもやはり重要な問題である。船の操船者にとっては、

「荒海に遭遇した場合、どのような操船を行なえばより安全により速く航行できるか？」

が関心事であろうし、一方設計者にとっては、

「最適な耐航性能を備えた船舶をいかにして設計するか？」

が重要な問題であろう。本研究では両者の間に答えるために、高速コンテナ船を対象として理論計算によって波浪中での船体諸応答を計算し、荒天中での危険回避による限界速度、最良な操船法、耐航性諸要素間のバランスなどについて検討を行なった。

船舶が荒天中を航行する場合、船体動揺、海水打ち込み確率あるいは波浪荷重などがある値以上になると、船体、人命、貨物の安全を確保するために減速、変針などの操船を行なう必要が生ずる。このような危険回避のための船速低下が deliberate loss of speed<sup>1)</sup> といわれるものである。しかし実際の海象は非常に複雑であり、実

\* 日立造船(株)技術研究所

際の操船においては乗組員の経験と勘に負うところが多い<sup>2)</sup>。多くの乗組員の経験から一般性を持った経験則を導き出し、運航マニュアルを作る努力<sup>3)</sup>が続けられているが、まだ不明な点が多いようである。

一方、近年ストリップ法<sup>4,5)</sup>を活用することによって、船舶の耐航性理論はめざましい進歩を遂げてきた。その結果、横揺れの非線形性に対して注意<sup>5,6)</sup>を払えば、規則波中での船体運動<sup>6)</sup>のみならず不規則波中での船体諸応答<sup>7)</sup>も実用にはほぼ十分な精度で推定できるようになった。すでにこれらの理論計算は鋼船構造規則<sup>13)</sup>をはじめ多方面で船舶の設計に応用されている。そこで本研究でもこの理論計算を利用して、先に述べた各種の検討を行なったわけである。

なお波浪中では、風、波そして船体運動のために船体抵抗が増加する。そのため一定の機関馬力に対しては船速は低下せざるを得ない。これが nominal loss of speed<sup>8)</sup> といわれるものである。これについても日本造船研究協会第125研究部会(以後SR125と略す)で、本研究の対象船型について細田<sup>11)</sup>によって計算された結果を利用し、deliberate loss of speed とともに検討を行なった。

## 2 対象船型

本研究の対象船型は  $L_{pp}=175\text{m}$ 、航海速度 22.5 ノットの高速コンテナ船である。主要目を Table 1 に、船型の概略を Fig. 1 に示す。また安全サイドをとる意味で、コンテナはデッキ上3段積みとした。本船型はSR108一軸高速コンテナ船標準船型<sup>9)</sup>(低船首楼型船)と呼ばれる船型であり、各方面で実験や理論計算が行なわれている船型である。

## 3 耐航性諸要素と限界速度の計算方法

Table 2 に示すように、7項目の限界速度を支配する耐航性諸要素の限界値を調査し検討を行なった。限界速度は Beaufort 海象(6, 7, 8, 9, 10)における短波頂不規則波中での諸要素の限界値の発生確率を計算し、その結果に基づいて定めた。以下に具体的な方法を示す。

船体応答の極大値(または極小値)がある一定値( $x_{crit}$ )を超える確率は、応答の時間的変動量の確率分布が正規分布に従うならば

$$q(x > x_{crit}) = \exp(-x_{crit}^2/2R^2) \quad (1)$$

で与えられる<sup>7)</sup>。

ここで

$R$ : 船体応答の標準偏差

$q(x > x_{crit})$ : ある応答  $x$  が一定値  $x_{crit}$  を超える回数と  $x$  の変動回数との比

そこで各海象において各船速で限界値( $x_{crit}$ )の発生確率( $q$ )を計算し、 $q$ が限界発生確率( $q_{crit}$ )よりも小さい速度域を安全航行域とみなした。なお限界状態における船体応答の有義両振幅( $S_{crit}$ )は(1)式より

$$S_{crit} = 4R_{crit} = 4x_{crit}/\sqrt{-2\ln q_{crit}} \quad (2)$$

で与えられる。Table 2 には各耐航性要素に対する  $x_{crit}$ ,  $q_{crit}$  および  $S_{crit}$  を示した。また各風力階級に対応する風速、平均波周期、波高は、SR108で高石ら<sup>10)</sup>によって仮定された Table 3 に示す値を用いた。なお応答関数の計算は O. S. M.<sup>4,6)</sup> によった。

## 4 諸要素の限界値とその判定基準

### 4.1 F.P. 上下加速度

限界値は JIS(Z 1618—1972)のコンテナ積み重ね強度より 0.8g とした。コンテナは F.P. までは搭載されないが安全サイドである。また限界発生確率は  $10^8$  回に1回とした。縦運動の平均周期を約 7.5 秒とすると、これは約 2 時間に 1 回に相当する。

### 4.2 F.P. 海水打ち込み

限界発生回数は Lewis の提案<sup>9)</sup>を採用して 1 時間に 10 回とした。これを縦運動の平均周期を約 7.5 秒として確率に換算すると  $q=0.02$  となる。海水打ち込み確率を計算する際には、模型実験結果より解析された静水中航走時の相対水位上昇による有効乾舷の低下を考慮した。

### 4.3 スラミング

限界発生回数は同じく Lewis の提案<sup>8)</sup>を採用して1時間に5回とした。確率に換算すると  $q=0.01$  となる。また threshold velocity は越智<sup>9)</sup>によって示された(3)式より推定した。なお計算は S.S.  $8^{1/2}$  で行なった。

$$V_{th.} = 0.09\sqrt{gL} \quad (3)$$

#### 4.4 波浪縦曲げモーメント (Midship)

日本海事協会の鋼船規則<sup>13,14)</sup>では波浪縦曲げモーメントの設計値を近似式で与えている。そこで限界値としてこの設計値を採用した。本船の設計値は  $7.00 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{m}$  となる。また Fig. 2 に示すように北大西洋の長期波浪発現頻度<sup>7)</sup>を利用して向い波での長期累積確率  $Q$  を計算すると、この値はほぼ  $Q=10^{-5}$  に対応している<sup>14)</sup>。さらに、類似船型の実積より本船の強力甲板での断面係数を  $1.15 \times 10^7 \text{ cm}^3$  と推定し応力に換算すると  $\sigma=6.1 \text{ kg/mm}^2$  になる。限界発生確率としては約東京～ロスアンジェルス片道に相当する  $q=10^{-5}$  を採用した。

#### 4.5 プロペラ・レーシング

次の2つの状態が同時に発生した時、激しいレーシングが起こると仮定した。

(1) 中村ら<sup>12)</sup>の実験によるとプロペラの上端が水面に近づくとプロペラ特性に急激な変化が起こるので、プロペラ上端露出を限界状態と考えた。この際に静水中航走時の相対水位上昇を考慮した。

(2) ディーゼル・エンジンではプロペラ回転数が急上昇して危険回転数に達すると、ガバナーが作動して燃料噴射を一時シャ断する<sup>15)</sup>。そこでプロペラの平均回転数がある値以上の場合のみ危険回転数に達する激しいレーシングが起こるものと考え、この平均回転数を 90 回転と仮定した。Fig. 3 に細田<sup>11)</sup>による不規則波中でのプロペラ回転数 90 回転に対応する船速を示す。

プロペラ・レーシングの限界発生確率としては、ガバナーが頻繁に作動する  $q=0.1$  を採用した。従来プロペラ露出の限界値としてプロペラ直径の  $1/8$  露出<sup>8)</sup>が一般に採用されているので、これを限界とした場合も参考のために計算した。

#### 4.6 $8^{1/2}$ 左右加速度 (重力成分を含む)

限界値は JIS のコンテナ側壁強度より  $0.6g$  とした。限界発生確率としては F.P. 上下加速度と同様に  $q=10^{-3}$  を採用した。横揺れの平均周期を約 15 秒とすると約 4 時間に 1 回に相当する。左右加速度を計算する際には重力成分の影響を考慮した。また計算位置は Keel 上方 24m であり、これは最上段コンテナのほぼ中間位置である。

#### 4.7 横揺れ

限界横揺れ角は線図より静的復元挺曲線および海水流入角 (Bulwark Top) を計算し、Fig. 4 に示すように C2 示数の考え方<sup>16)</sup>を使って定めた。各風力階級での限界横揺れ角および横風を受けた場合の定常風による heel 角を Table 3 に示す。限界発生確率としては  $q=10^{-3}$  を採用した。これは約 4 時間に 1 回に相当する。

横揺れの非線形性については問題が多いが、比較的大きい一定波高の規則波中で計算された応答関数を用いれば線形重ね合わせ理論に基づく統計的予測が実用的な意味で可能であると仮定して<sup>5)</sup> 計算を行なった。具体的には田才<sup>12)</sup>によって強制動揺試験より解析された非線形横揺れ減衰係数を用いて波高 10m として逐次近似法<sup>17)</sup>で運動方程式を解いて応答関数を計算し、これを用いて統計的予測を行なった。

## 5 計算結果と考察

Fig. 5 より Fig. 12 に各項目について限界速度を計算した結果を示す。また Fig. 13 には細田<sup>11)</sup>による波浪中での主機最大連続出力時の船速を示す。

限界速度曲線はパターンによって次の3グループに分けられる。

- ① F.P. 上下加速度, F.P. 海水打ち込み, スラミング
- ② プロペラ・レーシング, 波浪縦曲げモーメント
- ③  $8^{1/2}$  左右加速度, 横揺れ

危険域は①では向い波付近に、②では向い波および追い波に、③では横波から斜め追い波に現われる。①と③については加速度で他の要素を置き換えられれば実際上都合がよいと考えられる。これについては次章で述べる。

プロペラ・レーシングについて検討を加える。Fig. 10 にはプロペラ直径の  $1/8$  露出を限界とした場合の限界速度を示すが、Fig. 9 に示した回転数 90 回転以上でプロペラ上端露出を限界とした場合とはパターンが非常に異

なる。特に直径の $\frac{1}{3}$ 露出を限界とした場合には、向い波および追い波の低速に危険域が現われている。低速では回転数が低いので危険性は小さいであろう。しかしながらプロペラが直径の $\frac{1}{3}$ 以上も露出すれば非常に大きな負荷変動が起こるのであるから、船の航行には適さない状態であると考えられる。

## 6 相当加速度による置き換え

加速度によって他の要素を置き換えられれば加速度計の値から危険状態が察知できるので実用上都合が良い。Fig. 15には Beaufort 10における F.P. 海水打ち込みおよびスラミング限界と F.P. 上下加速度の対応を示す。また Fig. 16には横揺れ限界と  $8\frac{1}{2}$  左右加速度との対応を示す。スラミング限界および横揺れ限界はほぼ一定の加速度で置き換えられる。しかし F.P. 海水打ち込み限界については出会い角によって対応する加速度がかなり異なるため、一定の加速度で置き換えることには問題がある。

## 7 荒天中での限界速度と操船法

Fig. 14に7項目の耐航性要素について計算した限界速度を組み合わせた結果を示す。すべての項目の危険域に含まれない部分(図のハッチングの部分)が安全航行域である。また Fig. 14には主機最大連続出力時の速力を記入しており、この速力以下の安全域が実際に航行可能な安全域である。

7項目中スラミングについては船が満載状態であるために危険域が他の項目の場合よりも狭く考慮しなくてよい。また  $8\frac{1}{2}$  左右加速度の危険域も横揺れの危険域に含まれてしまうので考慮しなくてよいと思われる。結局7項目中で限界速度に大きな影響を及ぼすのは F.P. 海水打ち込み、横揺れ、波浪縦曲げモーメントの3項目であった。他の項目の危険域はこれら3項目の危険域に含まれる。

Fig. 14を見ながら荒天中での操船法について考えてみよう。Beaufort 7では危険域は存在しない。Beaufort 8になると向い波に F.P. 海水打ち込み、F.P. 上下加速度、プロペラ・レーシングの危険域が現われる。この点より見ると満載状態では Beaufort 8が荒天操船に移る境界の風力であると言えよう。大型専用船の航海実績を解析した結果<sup>18)</sup>からもこのような結論が得られている。

Beaufort 9になると向い波および追い波に波浪縦曲げモーメントの危険域が、また斜め追い波には横揺れの危険域が現われ安全航行域は急激にせばまる。高速航行が可能なのは追い波と真横から波を受ける場合のみである。Beaufort 10になると安全航行域はほとんど無くなってしまふ。このような状態に遭遇した場合は斜め向い波にして速度を十分落とすか、あるいは主機出力との関係で若干問題はあつたが追い波にして全力離脱するのが船の安全性を確保する方法だと思われる。

## 8 船首楼高さについて

本研究の対象船型は「低船首楼型」のコンテナ船である。これを Fig. 1に示すように「高船首楼型」にすると、耐航性能がどの程度向上するか検討を行なった。船首楼を高くすると海水打ち込みの危険域はせばまる。

Beaufort 8を例にとると Fig. 17に示すように他要素との関連で必ずしもすべてが耐航性能の向上には結びつかないが、それでも船首楼を高くすると向い波では約4ノットのメリットがある。「最適な船首楼高さ」さらには「最適な耐航性能を備えた船型」がこのような検討から決定できると思われる。

## 9 結 言

- (1) 本研究の結果コンテナ船の耐航性能に関して次のような検討が可能になった。
  - a. 波浪中での危険回避による限界速度が船速何ノットという具体的な数値で把握できた。
  - b. 耐航性諸要素間のバランスが明らかになった。
  - c. 荒天中での最良な操船法について検討ができた。
- (2) 本研究の結果を次の2つの方面に応用できる。
  - a. 船舶の荒天運航マニュアルへの応用
  - b. 最適な耐航性能を備えた船舶の設計
- (3) 本研究の対象は高速コンテナ船であったが他の船舶に対しても同様の検討はもちろん可能である。耐航性諸要素の影響が船型によってあるいは載貨状態によってどのように変化するか興味深い問題であろう。

(4) 本研究では7項目の耐航性諸要素を取り上げ検討した。この他にも変動水圧、波浪振りモーメントなどが考えられる。本研究をさらに進めるためにはこれらの要素についても検討が必要であろう。

(5) 本研究で取り上げた項目中にはプロペラ・レーシングのように限界値が必ずしも明確ではないものがある。またストリップ法を用いた場合速度の影響をどの程度まで精度良く推定できるのか、あるいは横揺れの非線形性を統計計算の際にどのように考慮したらよいかなどの本質的な問題も残されている。これらについてもさらに検討する必要があると思われる。

最後に、この研究は SR125 研究部会の昭和 49 年度の研究の一環として実施されたものであることを記し、種々ご討論いただいた中村部会長を始め SR 125 委員の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 田才福造他：肥大船の耐航性能に関する研究，西部造船会々報，第 37 号(昭和 44 年 2 月)。
- 2) 植竹正雄他：荒天避航の実例，日本航海学会，船舶の荒天運航に関するシンポジウムテキスト(昭和 48 年 2 月)。
- 3) 谷 初蔵：大型専用船運航マニュアル，日本航海学会，船舶の荒天運航に関するシンポジウムテキスト(昭和 48 年 2 月)。
- 4) 高木又男：耐航性理論の展望(その現状と問題点)，(その 2)，日本造船学会誌，第 537 号(昭和 49 年 3 月)。
- 5) 福田淳一：船体波浪荷重の設計値推定について，日本造船学会誌，第 549 号(昭和 50 年 3 月)。
- 6) 田才福造，高木又男：規則波中の応答理論および計算法，日本造船学会，耐航性に関するシンポジウムテキスト(昭和 44 年 7 月)。
- 7) 福田淳一：船体応答の統計的予測，日本造船学会，耐航性に関するシンポジウムテキスト(昭和 44 年 7 月)。
- 8) 中村彰一：耐航性の諸要素，日本造船学会，耐航性に関するシンポジウムテキスト(昭和 44 年 7 月)。
- 9) 日本造船研究協会第 108 研究部会：高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究，研究資料，No. 110 (昭和 45 年 3 月)。
- 10) 日本造船研究協会第 108 研究部会：高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究，研究資料，No. 125 (昭和 46 年 3 月)。
- 11) 日本造船研究協会第 125 研究部会：超高速コンテナ船の耐航性に関する研究，研究資料，No. 188 (昭和 49 年 3 月)。
- 12) 日本造船研究協会第 125 研究部会：超高速コンテナ船の耐航性に関する研究，研究資料，No. 211 (昭和 50 年 3 月)。
- 13) 日本海事協会：船級登録及構造検査等に関する規則集(昭和 49 年 7 月)。
- 14) 日本海事協会：昭和 47 年度版鋼船規則改正およびその他の技術規則の解説。
- 15) 水島一祐他：ディーゼル船主機の実船運転状態の解析，日本船用機関学会誌，第 9 巻 10 号(昭和 49 年 10 月)。
- 16) 土屋 孟：漁船の復元性能の理論的解析法について，漁船研究技報，第 25 巻(昭和 46 年 3 月)。
- 17) 高石敬史他：斜め波中における船側の相対水位変動について，日本造船学会論文集，第 132 号(昭和 47 年 12 月)。
- 18) 鞠谷宏士：荒天運航の実状，日本航海学会，船舶の荒天運航に関するシンポジウムテキスト(昭和 48 年 2 月)。

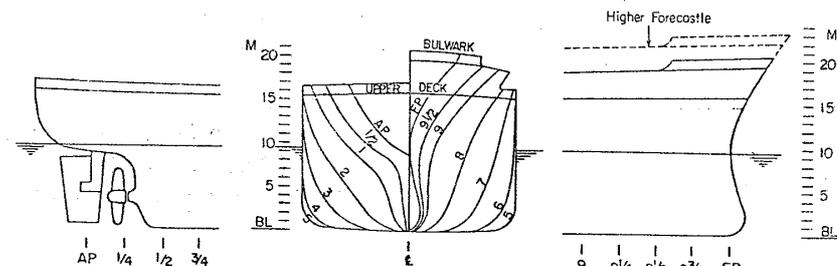


Fig. 1 Body Plan and Profile of S7-175

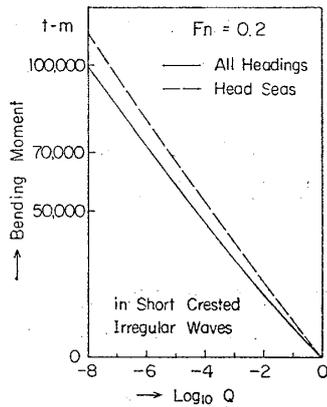


Fig. 2 Long Term Distribution of Vertical Wave Bending Moment at  $\bar{x}$  in the North Atlantic Ocean

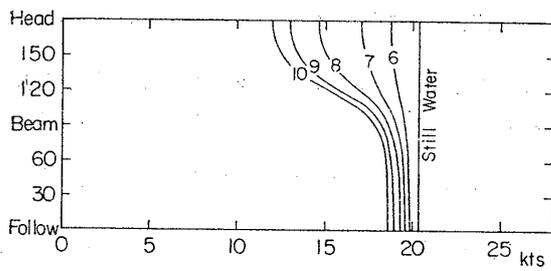


Fig. 3 Ship Speed at Propeller r.p.m. 90

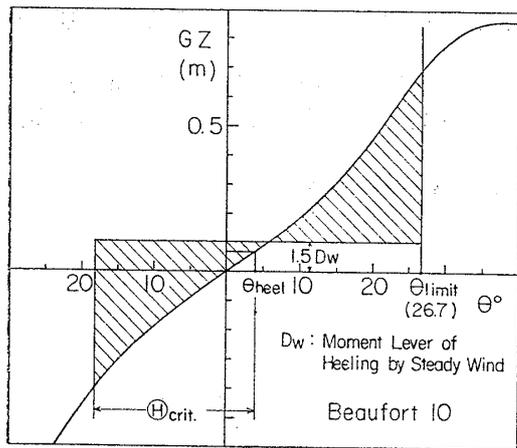


Fig. 4 GZ Curve and Critical Rolling Angle of S7-175

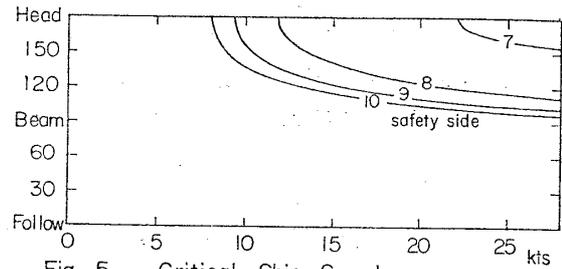


Fig. 5 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Significant Double Amp. of Vertical Acceleration at F.P.  $\leq 0.86g$ )

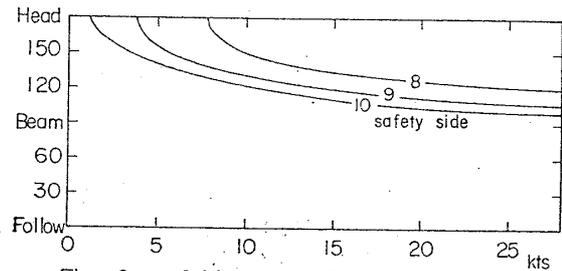


Fig. 6 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Probability of Deck-Wetness at F.P.  $\leq 0.02$ )

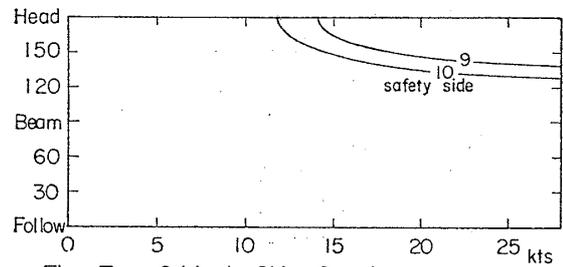


Fig. 7 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Probability of Slamming  $\leq 0.01$ )

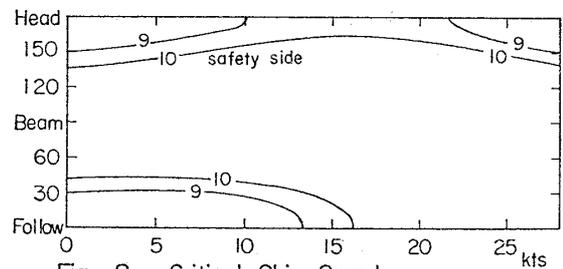


Fig. 8 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Significant Double Amp. of Vertical Bending Moment at  $\bar{x} \leq 58,000t-m$ )

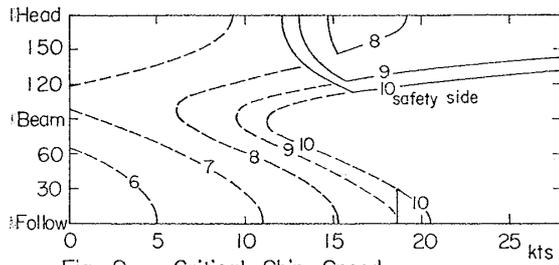


Fig. 9 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Probability of Propeller-Top Emersion  $\leq 0.1$  --- include static swell-up or Propeller r.p.m.  $\leq 90$ )

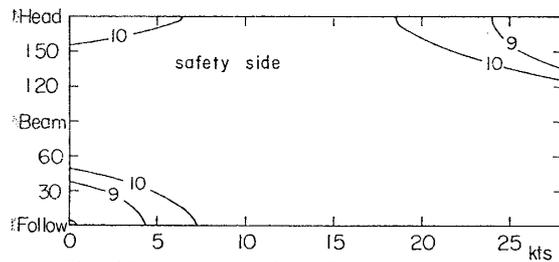


Fig. 10 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Probability of Propeller  $1/3D$  Emersion  $\leq 0.1$  --- exclude static swell-up)

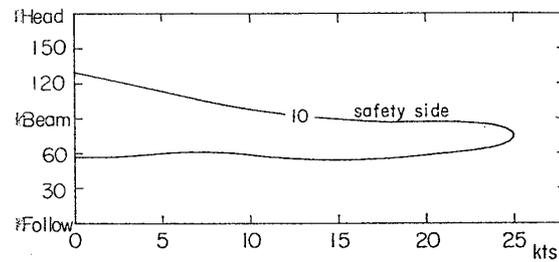


Fig. 11 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Significant Double Amp. of Lateral Acceleration at S.S.  $8\frac{1}{2} \leq 0.64g$ )

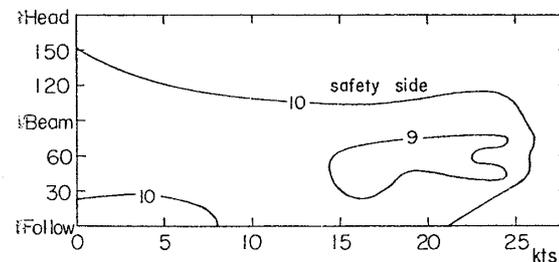


Fig. 12 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves (Critical Rolling Angles are Shown in Table 3)

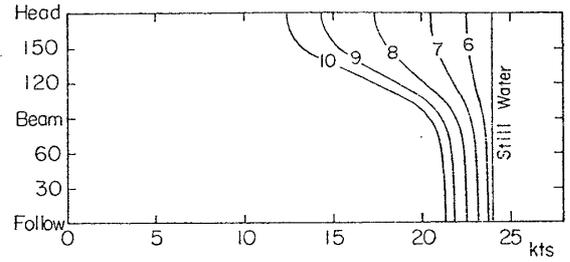
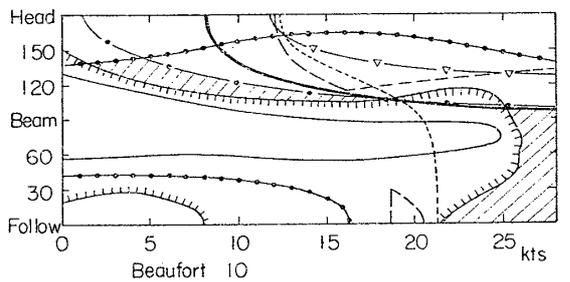
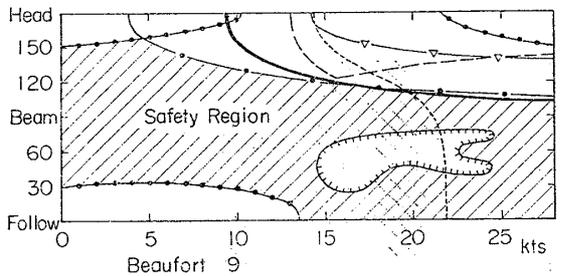
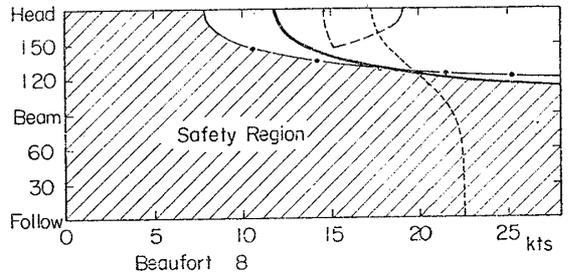
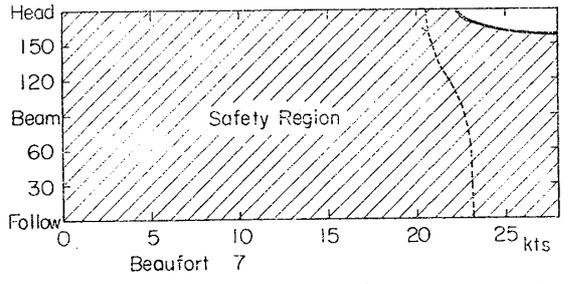


Fig. 13 Maximum Continuous Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves



- Vertical Acceleration at F.P.
- Deck-Weiness at F.P.
- ▽— Slamming
- Vertical Wave Bending Moment at  $\bar{\alpha}$
- Propeller Racing
- Lateral Acceleration at S.S.  $8\frac{1}{2}$
- Rolling
- Maximum Continuous Speed

Fig. 14 Critical Ship Speed in Short-Crested Irregular Waves

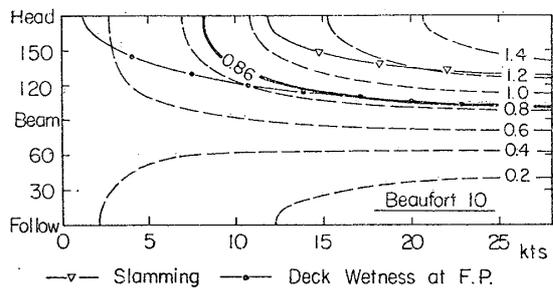


Fig. 15 Equivalent Vertical Acceleration at F.P. (Significant Double Amp.)

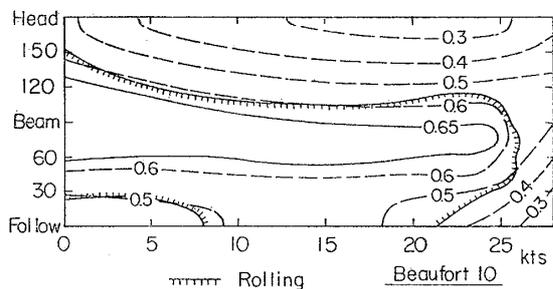


Fig. 16 Equivalent Lateral Acceleration at 8 1/2 (Significant Double Amp.)

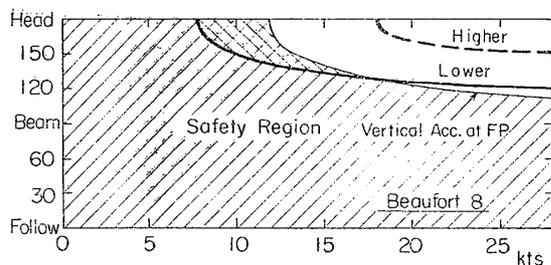


Fig. 17 Effectiveness of Higher Forecastle

Table 1 Principal Particulars

Length between Perpendiculars (L)	175.0	m
Breadth (B)	25.4	m
Depth (D)	15.4	m
Draught (α)	9.5	m
Displacement (Δ)	24,742	t
Block Coefficient (C <sub>B</sub> )	0.572	
Midship Coefficient (C <sub>M</sub> )	0.970	
Metacentric Radius (GM)	1.0	m
Rolling Period (T <sub>R</sub> )	18.0	sec.
Sea Speed	22.5	kts.
Main Engine	M.C.R. 27,500 PS	at 114 rpm

Table 2 Factors of Seaworthiness

No.	Factor	Limit	Maximum Probability	Maximum Significant Double Amp.
1	Vertical Acceleration at F.P.	0.8 g	10 <sup>-3</sup>	0.86 g
2	Deck Wetness at F.P.	—	0.02	—
3	Slamming	—	0.01	—
4	Vertical Wave Bending Moment	70,000t-m	10 <sup>-5</sup>	58,000t-m
5	Propeller Racing	—	0.1	—
6	Lateral Acceleration at S.S. 8 1/2	0.6 g	10 <sup>-3</sup>	0.65 g
7	Rolling	22.2°~25.8°	10 <sup>-3</sup>	23.9°~27.8°

Table 3 Critical Rolling Angles

Beaufort Number	6	7	8	9	10
Wind Velocity (m/sec)	12.4	15.5	18.9	22.6	26.4
Wave Height (m)	3.9	5.3	7.1	9.2	11.5
Wave Period (sec)	7.6	8.9	10.3	11.7	13.1
Heeling by Steady Beam Wind	0.9°	1.4°	2.0°	2.9°	4.0°
Critical Rolling Angle	25.8°	25.2°	24.5°	23.6°	22.2°
Maximum Significant Double Amp.	27.8°	27.1°	26.4°	25.4°	23.9°