

# 荒天時操船を考慮した大型肥大船の 搭載主機出力について

正員 門 松 浩 司\* 正員 井 上 義 行\*\*  
正員 寶 田 直之助\*\*

On the Required Minimum Output of Main Propulsion Engine  
for Large Fat Ship with Considering Manoeuvrability in Rough Seas

by Koji Kadomatsu, *Member* Yoshiyuki Inoue, *Member*  
Naonosuke Takarada, *Member*

## Summary

The required minimum output of main engine for large fat ship from the view point of safety navigation is evaluated.

The manoeuvrable sea conditions are evaluated by estimation of ship speeds, drifting angles and check helms in various seas. In this estimation, influences of added resistance, steady lateral force and steady yaw moment in waves are accounted. The characteristics of main engine is also accounted. The evaluated manoeuvrable sea conditions are in good agreement with ones by log data.

Assuming the several cases of output of main engine, the relation between the manoeuvrable sea condition and the output of main engine is evaluated. Using this result, the relation between the unmanoeuvrable probability and the required minimum output of main engine is estimated. The probability that the ship meets unmanoeuvrable condition will be reduced by the increasing of main engine output, however, it shall be limited up to mechanical availability of main engine. Thus the criteria for the required minimum output of main engine shall be set up.

## 1. 結 言

第1次オイルショックを契機に、社会の様々な分野で一段と省エネルギー化が推進されてきた。船舶の分野に於いても、減速運航、船型改良による推進効率の向上等の省エネルギーを目的とした様々な努力がなされてきた。

これらの中で最も効果的な対策は運航速力の低速化であった。所要馬力はほぼ速力の3乗に比例するので、運航速力を約15%低速化すれば、所要馬力は低速化前に比較して約60%となり、消費燃料は約70%で済むことになる。したがって、時間価値の高い貨物の運搬に従事する高速船の一部を除き、低時間価値貨物、特に原料運搬船は低速運航を指向し、船型改良も従来より低速域の抵抗・推進性能の向上に傾注されている。Fig.1は1970年から1988年までに日本で建造されたばら積み貨物船と油槽船の実績から、

船長が200m以上の大型船約380隻の竣工時期と航海速力<sup>1)</sup>の関係を見たものである。同様に、Fig.2は主機の常用出力(NOR)と排水量の比をとり、竣工時期との関係を調べたものである。同図の作成に際して、排水量が公表されていないものは載荷重量から文献2)の方法によって排水量を推定した。両図より、オイルショック後の1978年頃から航海速力が低下し、常用出力/排水量も低下しており、低速運航が指向されていることがわかる。

コンテナ船に代表される高速船は、排水量に比較して搭載主機出力が大きく<sup>3)</sup>、荒天に遭遇した場合には、船体動揺の軽減のため、船速をどの程度低下させれば安全な航海が可能であるかが問題である。すなわち、従来の荒天時の運航限界速力はスラミングによる構造、疲労強度、船首海水打ち込み頻度等から人為的に速力を低下させ安全運航を目標としたもの<sup>4)</sup>である。

一方、低速運航船として設計され、船体主寸法に比較して搭載主機出力が小さい船の場合、高速船に比較して荒天時の船速低下が大きく<sup>3)</sup>、意図した方向に航行できないと

\* 住友重機械工業株式会社 平塚研究所

\*\* 横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室

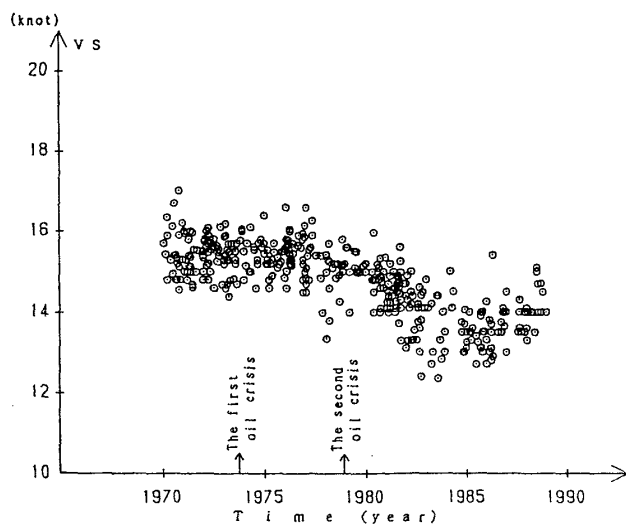


Fig. 1 Trend of service speed

いった操船性の悪化のため、安全性確保が困難となることが推察される<sup>5)6)</sup>。これは、荒天時に安全に運航できる最低船速（最低主機出力）は何ノットか（何馬力か）という問題である。

本論文は、船舶の安全性の面から、後者についての検討を行うものである。即ち、風浪中船速低下及び操船性の面からの検討を行い、船舶が安全な航海を維持するために最低限必要な主機出力の設定を試みるものである。

## 2. 斜航時の釣合方程式

船体重心  $G$  に原点を置き、 $x$  軸は船体中心線上で船尾方向を正にとり、 $z$  軸は鉛直上向きを正にとった右手系の座標  $o-xyz$  を Fig.3 の様に定義する。ここでは、風と波の方向は一致しているものとし、その出会角 ( $\theta$ ) は船体中心線上にある  $x$  軸に対する角度で、右回りを正とする。船体に作用する外力は風浪による定常力（平均抵抗増加、定常横力及び回頭モーメント）だけを考える。

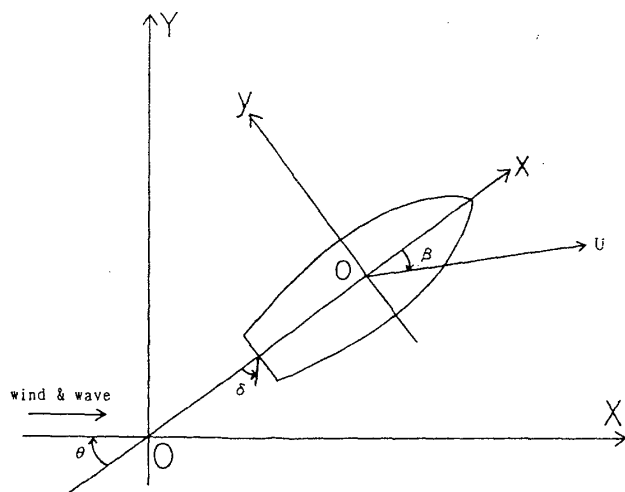


Fig. 3 Coordinate system of manoeuvrability

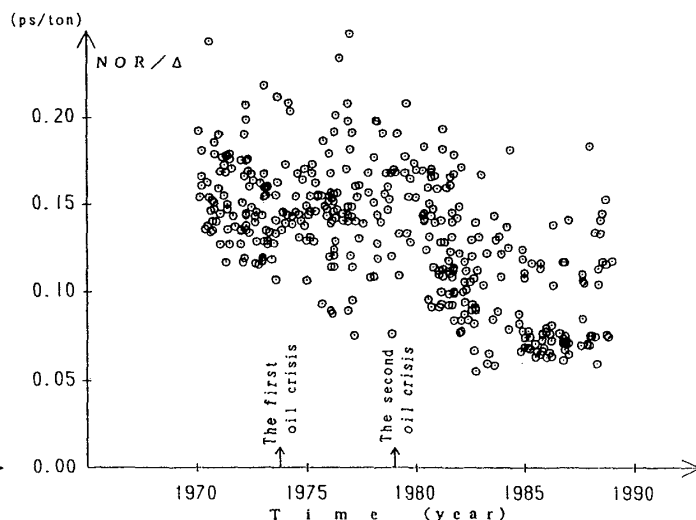


Fig. 2 Trend of power-displacement ratio

船体が出会角  $\theta$  から風浪を受け、船速  $U$ 、横流れ角  $\beta$ 、舵角  $\delta$  で一定の針路を保って航行している場合を考える。 $x$  方向、 $y$  方向、及び  $z$  軸回りの船体に作用する力の釣合方程式は次式で表される<sup>7)8)9)10)</sup>。

$$X_T(1-t) + F_{XH} + F_{XR} + F_{XA} + F_{XW} = 0 \quad (1)$$

$$F_{YH} + F_{YR} + F_{YA} + F_{YW} = 0 \quad (2)$$

$$M_{ZH} + M_{ZR} + M_{ZA} + M_{ZW} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $X_T$  はプロペラ推力であり、 $(1-t)$  は推力減少係数である。また、 $F_x$ 、 $F_y$  はそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸方向の力の成分であり、 $M_z$  は  $z$  軸回りのモーメントである。さらにそれらに対する添え字は、

$H$ ；平水中抵抗を含む船体に作用する流体力

$R$ ；舵に作用する流体力

$A$ ；船体に作用する風圧力

$W$ ；船体に作用する平均波浪定常力

を表す。また、船速、横流れ角及び舵角と各々の力の方向は Fig.3 と Fig.4 に示す矢印の方向を正とする。

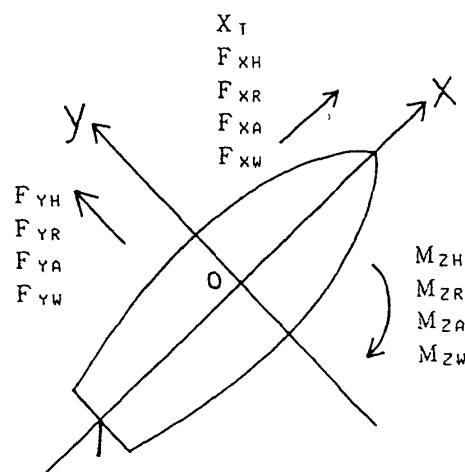


Fig. 4 Definition of each force

(1)式の推力  $X_T$  に主機の運転特性 (制動馬力一定またはトルク一定) の条件を付加し, 推力一致法<sup>11)</sup> による馬力計算を行う。舵角  $\delta$ , 横流れ角  $\beta$  で風浪中を一定速力  $U$  で航行する際の全抵抗を  $R$  とすれば,

$$R = -(F_{XH} + F_{XR} + F_{XA} + F_{XW}) \quad (4)$$

であり, 全抵抗  $R$ , 船速  $U$  で航行する際に要する制動馬力またはトルクを  $X_P$  とすれば, (1)式は,

$$X_P = X_{P0} \quad (5)$$

と表される。ここで,  $X_{P0}$  は制動馬力またはトルクの運転条件である。

船速, 横流れ角, 舵角に適当な範囲を設け, (2)式, (3)式及び(5)式を満足する船速・横流れ角・舵角を求める。ここでは, 船体が横流れすることによって誘起される力を神中の式<sup>12)</sup>及び井上の式<sup>13)14)</sup>により推定し, 舵に作用する流体力を藤井の式<sup>15)</sup>, 舵流入速度を芳村の式<sup>16)</sup>によって推定する。また, 風圧力は Isherwood の回帰式<sup>17)</sup>により求める。

平均波浪定常力は短波頂不規則波中の平均値として次式により算出する。

$$\begin{aligned} F_{XW} &= \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \alpha \int_0^\infty 2S(\omega) F_{Y0}(\theta - \alpha, \omega) / \zeta_a^2 d\omega d\alpha \\ F_{YW} &= \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \alpha \int_0^\infty 2S(\omega) F_{Y0}(\theta - \alpha, \omega) / \zeta_a^2 d\omega d\alpha \\ M_{Z0} &= \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^2 \alpha \int_0^\infty 2S(\omega) M_{Z0}(\theta - \alpha, \omega) / \zeta_a^2 d\omega d\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

Table 1 Principal particulars

|            | SHIP    | MODEL       |
|------------|---------|-------------|
| Lpp (m)    | 285.0   | 2.9113      |
| B (m)      | 50.0    | 0.5118      |
| d (m)      | 18.5    | 0.1890      |
| D. W. (MT) | 200,000 | —           |
| condition  | FULL    | FULL        |
| Note       | —       | with rudder |

Table 2 Principal particulars of main engine propeller, and rudder etc.

|                                                     |                     |
|-----------------------------------------------------|---------------------|
| MCR / $\Delta$ (PS/MT)                              | 0.070               |
| NOR / $\Delta$ (PS/MT)                              | 0.059               |
| VS (15% S.M.) (knot)                                | 12.4                |
| Prop. dia. (m)                                      | 9.3                 |
| Rudder area (m <sup>2</sup> )                       | 81.3 (without horn) |
| Projected area of hull above W.L. (m <sup>2</sup> ) | Trans : 810.0       |
|                                                     | Long. : 2700.0      |

$S(\omega)$  は不規則波のスペクトラムであり, ISSC(1964) のものを仮定する。 $F_{X0}$ ,  $F_{Y0}$ ,  $M_{Z0}$  は抵抗増加, 定常横力及び回頭モーメントの規則波中応答値である。これらの値は次章に示す水槽試験結果を使用する。

ただし, 平水中の抵抗・推進性能は既知であるものとし, 波浪中における自航要素及びプロペラ特性は平水中の値を使用する。

### 3. 荒天時操船可能性

荒天時操船可能性の検討は, 風浪中船速低下が比較的大きい船種である大型ばら積み貨物船の中から一隻を選んで行う。本解析対象船の主要目を, 規則波中波浪定常力の水槽試験を実施した供試模型船の主要目と共に Table.1 に示す。また, 常用出力/排水量, プロペラ要目等を Table.2 に示す。

#### 3.1 規則波中波浪定常力の計測

規則波中波浪定常力の計測は, フルード数  $Fn$  を 0.0 と 0.1 で, 波の出会い角  $\theta$  を  $180^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  及び  $0^\circ$  に変えて行った。また, 波高は 3 cm ( $\approx 1/100L_{pp}$ ) とした。模型

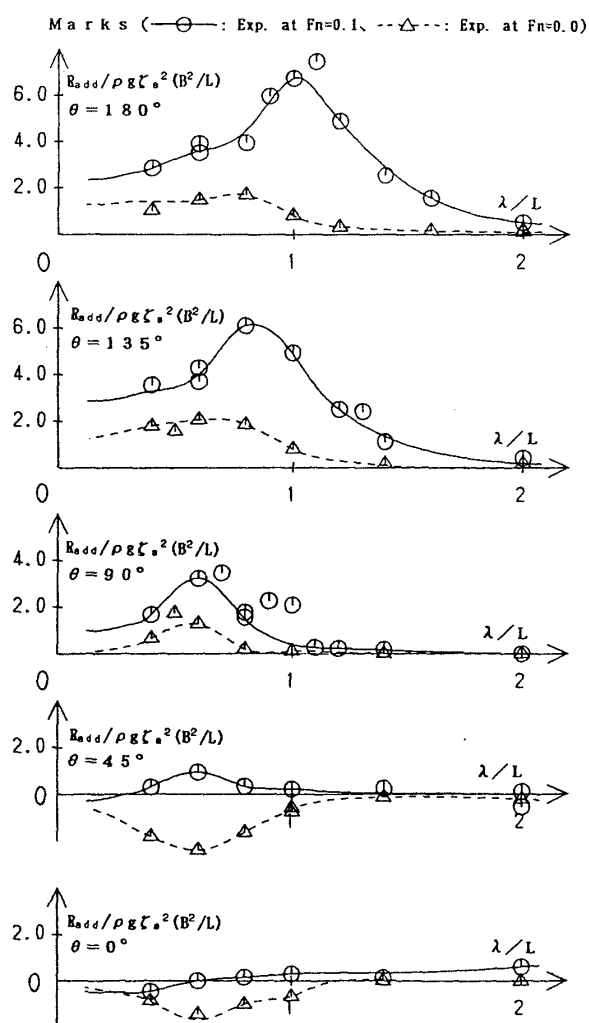


Fig. 5 Resistance increase in regular waves

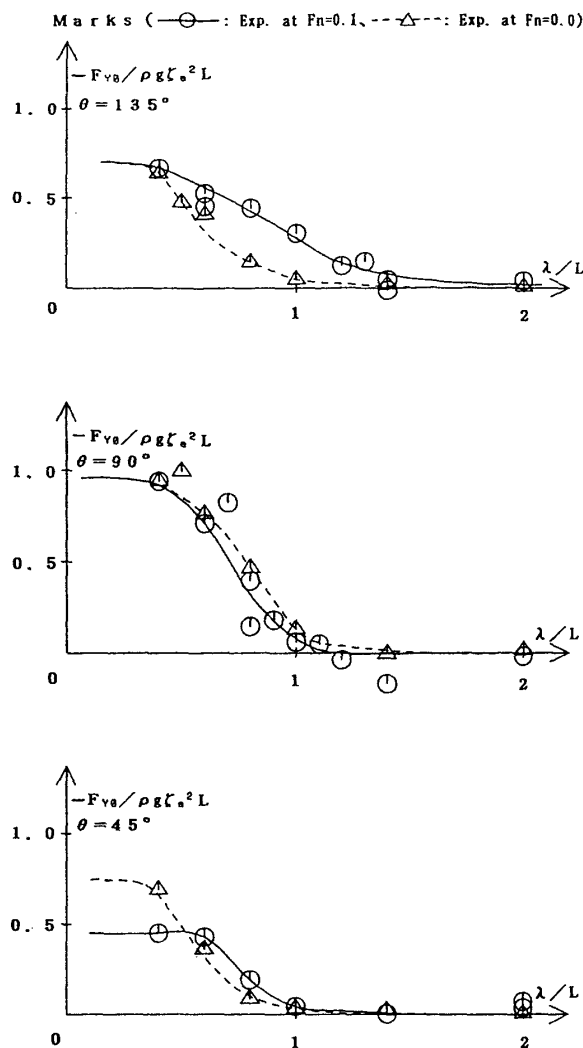


Fig. 6 Steady lateral force in regular waves

船の前後方向と左右方向はゆるいばねで拘束した。また、模型船の方位は強いばねで拘束して、模型船の重心航跡と船首方向が一致する状態<sup>18)</sup>で計測を行った。波浪中抵抗、定常横力及び回頭モーメントはヒービングロッド下部に取り付けた検力計によって計測し、波浪中抵抗増加は波浪中抵抗から平水中抵抗を差し引いて求めた。

Fig. 5 に抵抗増加, Fig. 6 に定常横力, Fig. 7 に定常回頭モーメントの水槽試験結果を示す。図中の○印は  $F_n = 0.1$  の水槽試験結果であり, △印は  $F_n = 0.0$  の水槽試験結果である。Fig. 5 の  $\theta = 180^\circ$  については, 既に著者らが示したものの<sup>27)</sup>を改めて図示した。

定常回頭モーメントは船体前半部と後半部に作用する力の差によって生じるモーメントであり<sup>19)</sup>, 抵抗増加や定常横力以上に計測が難しく, Fig. 7 の定常回頭モーメントの実験値については計測精度に問題があることも考えられるため, 今後さらに検討が必要である。

風浪中船速・横流れ角・当て舵量の計算に必要な平均波浪定常力は, Fig. 5~7 の実線 ( $F_n = 0.1$ ) と破線 ( $F_n = 0.0$ )

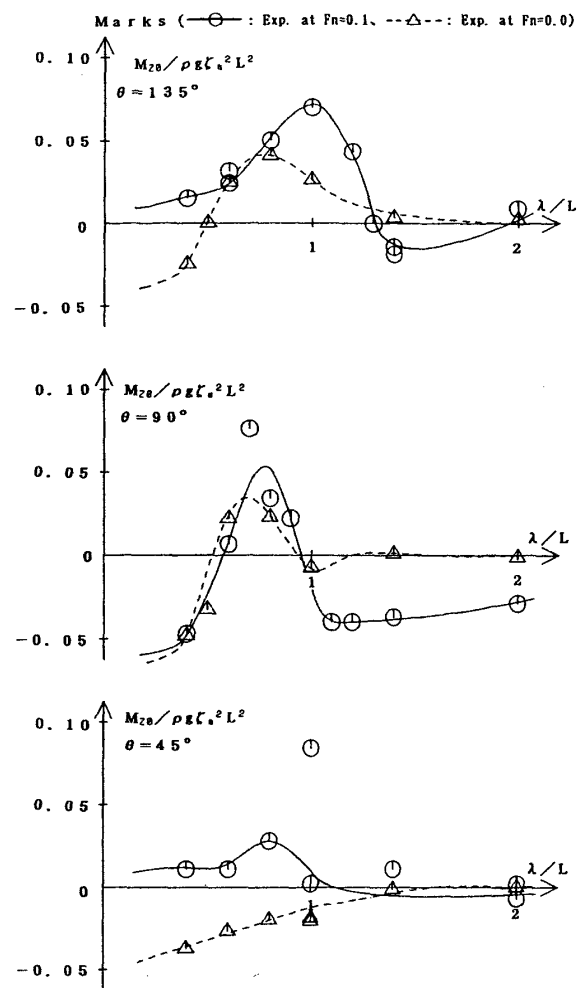


Fig. 7 Steady yaw moment in regular waves

で示す規則波中応答値を用いて(6)式により, 各船速及び波入射角毎に計算し, これを補間して求める。

### 3.2 風浪中の船速・横流れ角・当て舵量

ここでは主機の運転条件を常用出力 NOR のトルク一定とする。Beaufort scale と風速の関係は WMO によって示されている風速範囲<sup>20)</sup>の中央値で規定し, 風速と有義波高の関係は同様に WMO の参考波高<sup>20)</sup>で規定する。これらの関係を Fig. 8 に示す。また, 有義波高と平均波周期の関係は 1969 年の ITTC による関係<sup>21)</sup>を用いる。

Fig. 9 に Beaufort scale 6, 7, 8 の海象中における船速・横流れ角・当て舵量の計算結果を示す。同図において, Beaufort scale 8 の風向  $90^\circ \sim 150^\circ$  では風浪による外力と船体力及び舵力が釣り合う船速・横流れ角・当て舵量の解が得られない状態であり, このような海象中を航行することはできないことを示している。一方, Beaufort scale 6 と 7 の海象中では横流れ角と当て舵量は共に  $10^\circ$  以下であり, 任意の方向に操船が可能である。

風向  $135^\circ, 90^\circ$  及び  $45^\circ$  について, 海象と船速・横流れ角・当て舵量の関係を Fig. 10 に示す。同図より, 向い波中及び

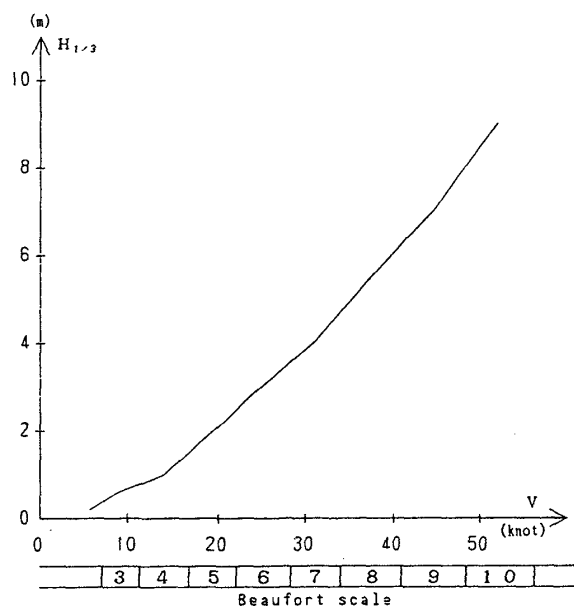


Fig. 8 Relation of mean wind speed and significant wave height

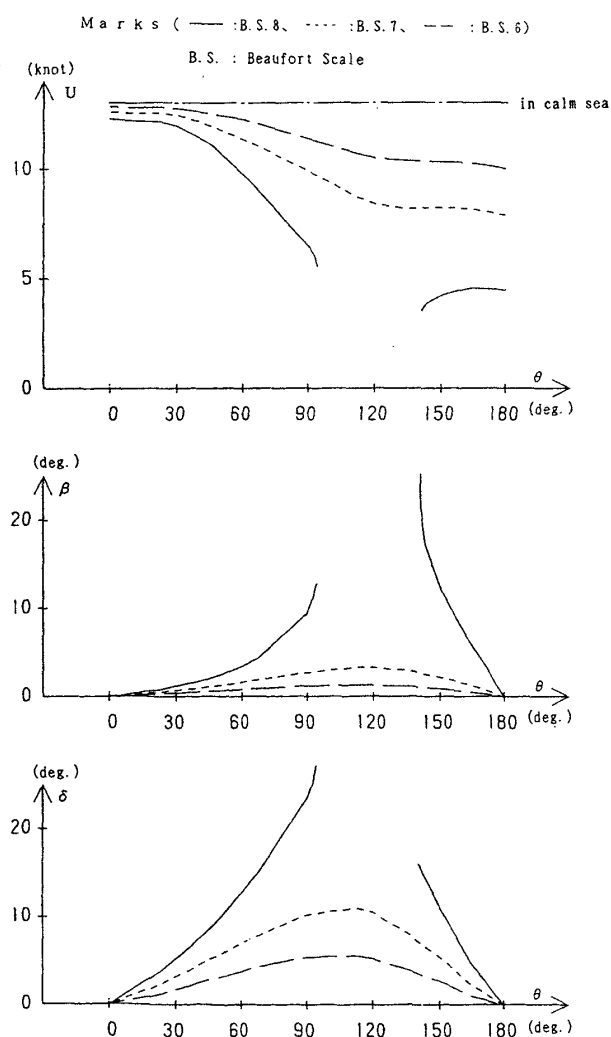


Fig. 9 Ship speeds, drifting angles and check helms

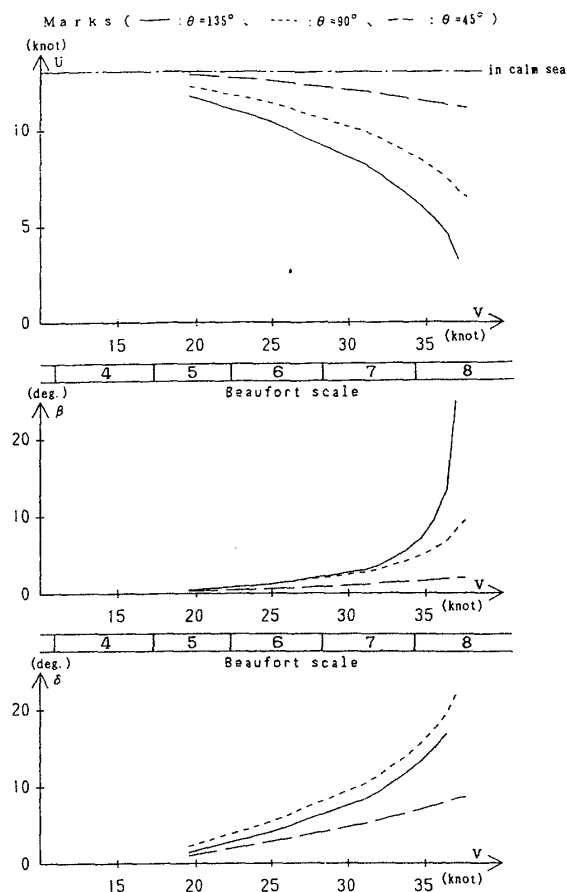


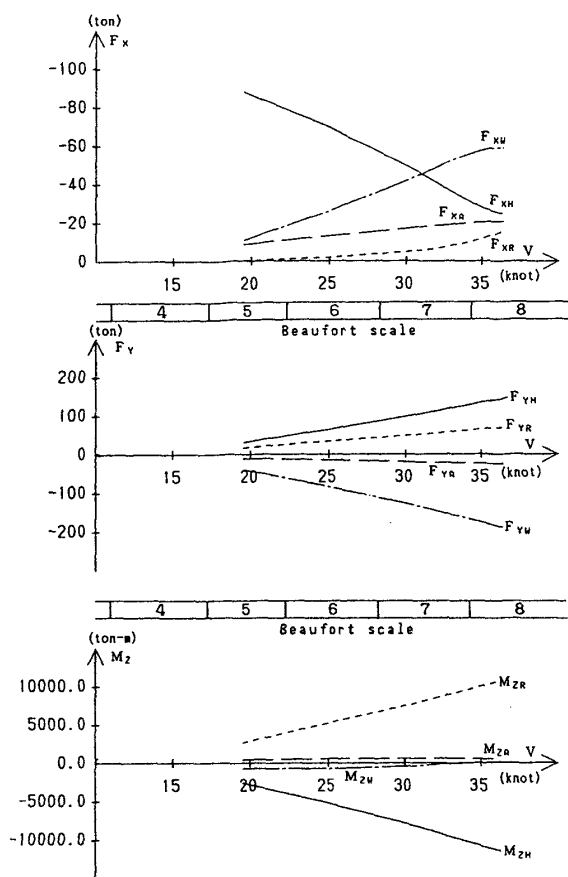
Fig. 10 Influence of sea conditions on ship speeds, drifting angles and check helms

横波中では、Beaufort scale 7 や 8 といった荒天時に船速が低下し、横流れ角と当て舵量が急激に増大している。追い波中では船速低下は顕著ではなく、横流れ角、舵角の増大も激しくない。

Fig. 11 は風向  $135^\circ$  における船体前後方向、横方向及び回頭方向の力の内訳である。同図より、船体横方向の力の釣合は波浪定常力と船体力が支配的であることがわかる。回頭方向では船体力と舵力の釣合が支配的であり、波浪による定常回頭モーメントの影響は少ないものと考えられる。また、風圧力と平均波浪定常力は海象の悪化に対してほぼ直線的に変化している。

風向  $90^\circ$  と  $45^\circ$  については図示していないが、各方向の力の内訳および海象の悪化に対する力の変化は Fig. 11 と同様の傾向を示している。

船体力と舵力は船速の平方に比例し、かつ船体力は横流れ角に、舵力は舵角に比例する。このため、荒天時に風浪による抵抗が増加し船速が低下すると、波浪定常力に釣り合うために、横流れ角と舵角は海象の悪化による波浪定常力の増加分に加え船速が低下する分増加することになる。したがって、海象の悪化に伴って、船速が低下する斜め向い波中及び横波中の横流れ角と舵角は急激に増大する一

Fig. 11 Details of each forces at  $\theta=135^\circ$ 

方、船速があまり低下しない追い波中では横流れ角と舵角は平均波浪定常力の増加と同傾向に直線的に増大し、急激な増大が見られないものと考えられる。

Fig. 12 は風浪中船速に及ぼす横流れと当て舵の影響である。同図中の実線は Fig. 9 に示した横流れと当て舵の影響を考慮した船速であり、破線は風浪による抵抗増加だけを考慮した船速である。Beaufort scale 7 や 8 といった荒天時には、横流れ角と当て舵量が大きくなる風向  $60\sim 150^\circ$  の範囲で船速に差が見られ、このような場合には横流れと当て舵の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

### 3.3 荒天時操船可能性

風浪中の船速・横流れ角・当て舵量の推定を種々の海象に対して行い、操船可能な風浪との方向と海象の関係を調査する。ここでは、横流れ角と当て舵量の許容最大値を高橋・浅井<sup>6)</sup>に倣い  $\pm 20^\circ$  として、横流れ角または当て舵量の一方がこの許容値を上回った場合は操船が不能であるとする。また、主機の運転特性は前節と同様に常用出力のトルク一定とする。

Fig. 13 が各風浪の方向について操船不能に陥る限界海象である。実線より下の海象中では当て舵をとって操船可能であるが、上側の海象中では操船不能である。

同図を見ると、本解析対象船は風速 35 ノット、有義波高

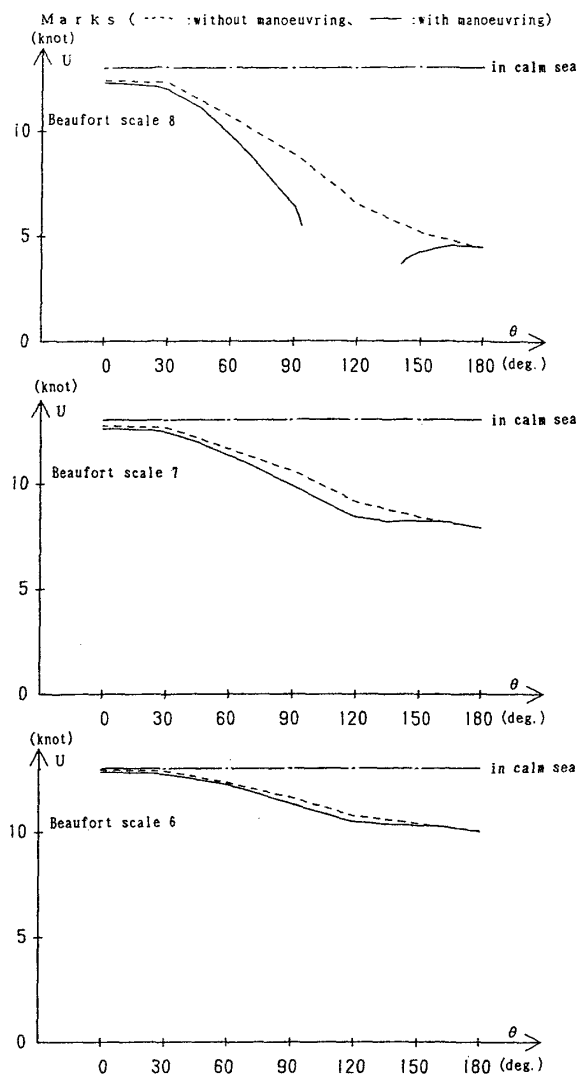


Fig. 12 Influence of manoeuvring on ship speeds

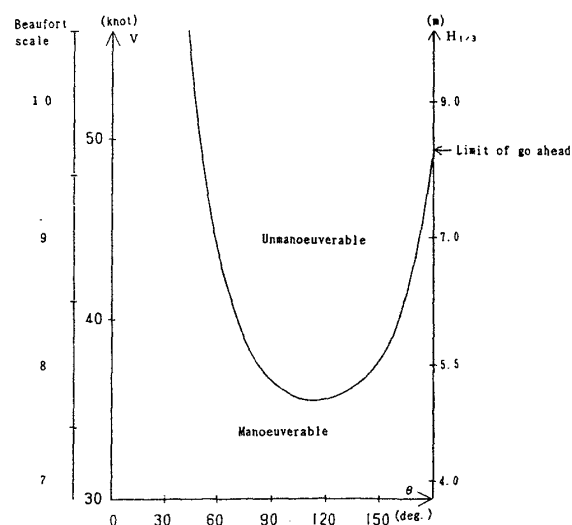


Fig. 13 Critical sea conditions

5 m 以下の海象中であれば風浪をどのような方向から受けても操船が可能である。これより海象が悪化すると風浪を斜め前方である約  $110^\circ$  の方向から受けて操船することが不可能となり、海象の悪化に伴って操船不能となる風浪に対する方向が拡大する。風速 50 ノット、有義波高 8.5 m の海象中では風浪を  $50^\circ \sim 180^\circ$  の方向から受けて操船することは不可能となる。さらにこの場合には、風浪を船首方向から受けても抵抗増加のため前進することができない状態である。

Fig.14 は Fig.13 に示した限界海象中の船速・横流れ角・当て舵量である。主機出力が一定で海象が限界海象より隠やかな場合には、風浪による抵抗増加が少なく、船速は高くなる。したがって、Fig.14 は主機出力が常用出力の場合に操船可能な限界速力(下限)、横流れ角及び当て舵量を表している。

航海便覧<sup>22)</sup>によれば、荒天時の避航操船法として以下の 3 法が挙げられている。

- 1) ち駐法 (heave to) : 船首を風浪に立て、保針可能な最小の速力をもって姿勢を保持し海面の好転を待つ。

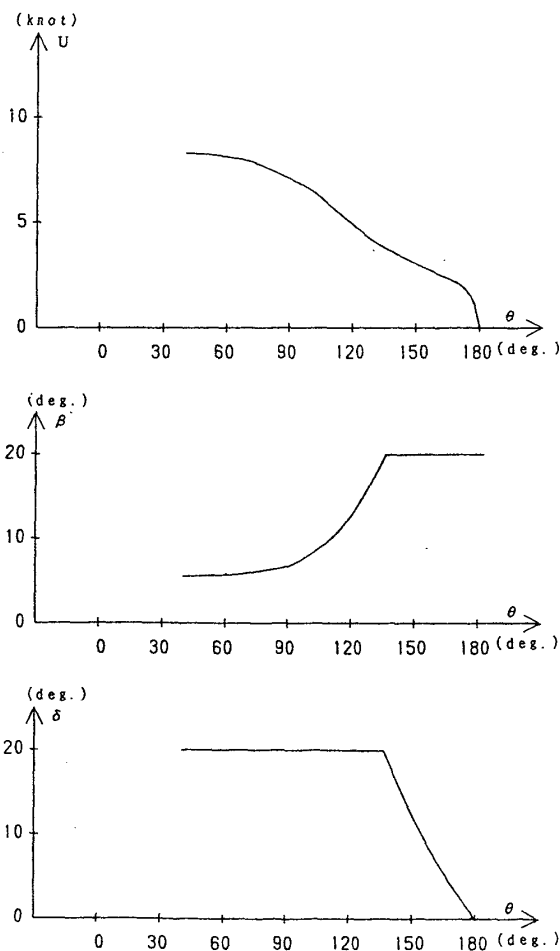


Fig. 14 Critical ship speeds, drifting angles and check helms

- 2) 漂駐法 (lie to) : 機関を停止し風浪にまかせる。

- 3) 順走法 (scudding) : 船尾に風浪を受けて荒天圏外に航走脱出する。

ここで解析の対象とした船は風速 50 ノット以上の荒天時には上記の避航操船法の一つであるち駐法が行えない状態であり、順走法によって荒天を回避する際にもその回避範囲が狭い範囲に制限されることになる。このような状況に陥ると、座礁、他船との衝突等の危険性が增大する。したがって、この船が安全に航行できる海象の限度は風速 50 ノット、有義波高 8.5 m と考えられる。

### 3.4 航海実績との比較

本研究で解析対象としている大型ばら積み貨物船は既建造船であり、建造直後に荒天に遭遇した際の航海記録が得られている。

Fig.15 は最大 Beaufort Scale 10 の荒天に遭遇した際の船速、プロペラ回転数、主機出力、プロペラトルク、船首方向を  $180^\circ$  とした絶対風向及び Beaufort Scale である。同図を見ると、海象が荒天になるに従って、船速だけでなくプロペラ回転数、主機出力も低下している。Fig.16 は主機出力とプロペラ回転数の関係を見たもので、A は主機の連続運転可能範囲であり、B は荒天時などの短時間(最大 2000 時間) 運転可能範囲である。また、NOR トルク一定の破線は平水中の常用出力のトルク値に等しいトルクと

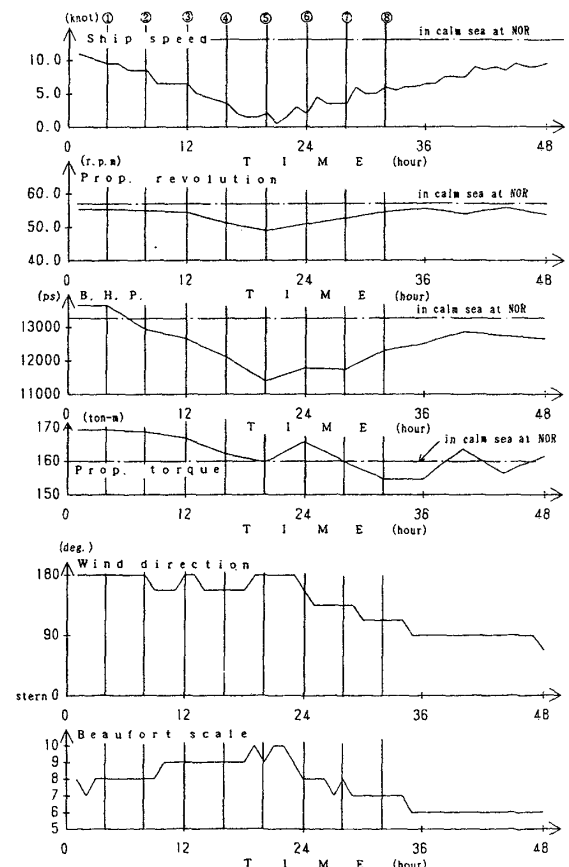


Fig. 15 Log data of huge bulk carrier in rough seas

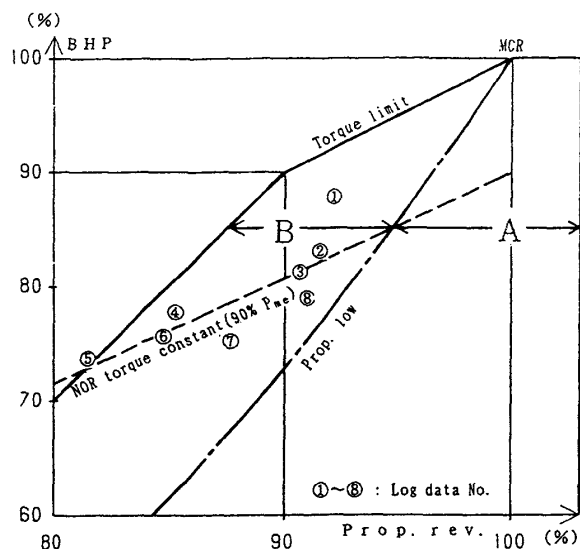


Fig. 16 Propeller revolution and BHP

なる主機出力とプロペラ回転数の関係である。同図中の①～⑧は Fig. 15 の航海実績のデータであるが、これらはほぼ破線付近にあり、この船がほぼ常用出力のトルク一定で運転されていることがわかる。

Fig. 17 上段は Fig. 11 に示した操船可能限界海象の図に航海実績の①～⑧のデータの風向と風速をプロットしたものである。また、Fig. 17 下段は Fig. 14 に示した限界速力の図に航海実績の風向と船速をプロットしたものである。航海実績の海象は Beaufort scale で記録されており、具体的な風速及び有義波高が不明である。また風向についても 16 方位で記録されている。このようなことから、Fig. 17 上段の限界海象の図中の航海実績データ①～⑧については Beaufort scale に対応する風速と風向に範囲を設けて示してある。Beaufort scale に対応する風速の範囲は WMO による関係<sup>20)</sup>で設定し、風向の範囲は 16 方位に対応する  $\pm 11.25^\circ$  とする。

この船については日本海事協会が新造時から 3 年間にわたり航海記録の収集を行っている<sup>23)</sup>。収集された実績値には主機出力関係のデータが含まれておらず風向も 8 方位で記録されており実績データ①～⑧に比較して不備な点もあるが、参考として Fig. 17 上段の図中には斜線で示し、Fig. 17 下段の図中には  $\Delta$  で示した。尚、この日本海事協会によるデータの内、実績データ①～⑧と重複するものについては除いてある。

Fig. 17 において、実績データは推定される操船可能海象中かまたは操船可能限界海象付近に分布している。また実績船速は限界船速以上かまたは限界速力付近に分布している。推定された操船可能限界海象が妥当なものであれば、実績データは Fig. 17 上段図中の実線の上側には存在しないはずである。また Fig. 15 下段の図において、実績船速は実線で示す限界速力の下側には存在しないはずである。こ

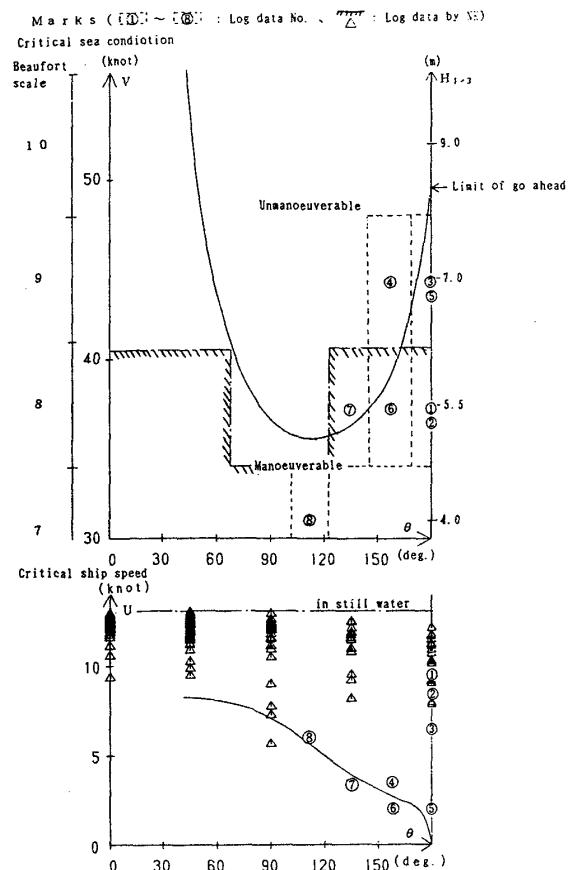


Fig. 17 Comparison of critical sea conditions and ship speeds between prediction and log data

この意味から、推定された操船可能限界海象と限界船速は実航海の状況をほぼ表しており、本研究で行った荒天時操船可能性の推定法は妥当な結果を与えていると考えられる。

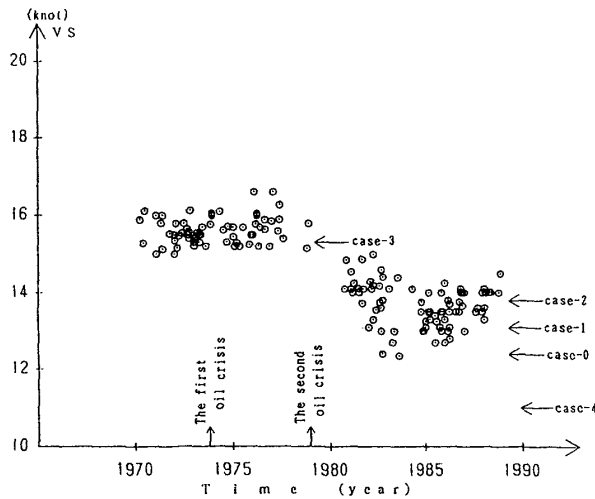
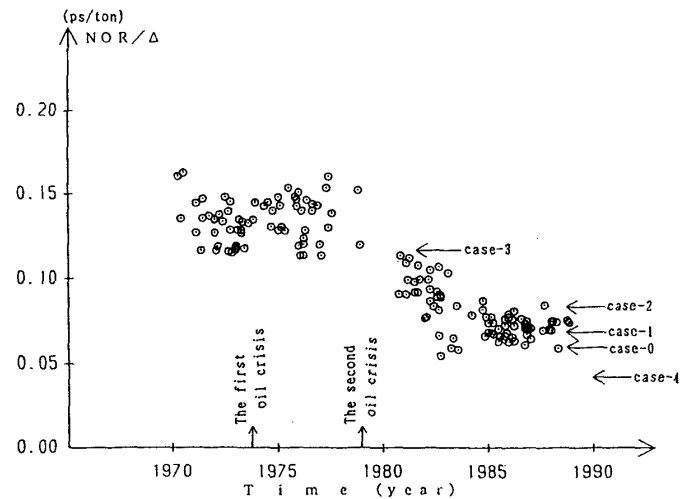
#### 4. 必要最低主機出力

本章では、これまでに示した荒天時操船可能性の推定法を用い、数種の主機出力に対して、Fig. 13 に示したような風浪の方向によっては操船不能となる海象(操船制限海象, limited manoeuvrable sea condition)と、風浪を正面から受けても定位置に留まることができない海象(操船不能海象, Unmanoeuvrable sea condition)を風速と有義波高の組合せで示す。

次に、風浪の長期発現頻度表を用いて操船制限海象と操船不能海象に遭遇する確率を算出し、これらを操船制限確率及び操船不能確率として主機出力との関係を明かにする。操船不能確率に対して許容確率を仮定することにより、安全な航海を維持するために最低限保持すべき主機出力を設定する。

##### 4.1 主機出力と操船不能海象

Fig. 18 は船長 260 m～320 m の油槽船とばら積み貨物船について最近 20 年間の航海速力を調査したものである。

Fig. 18 Trend of service speed ( $L_{pp}=260\sim320$  m)Fig. 19 Trend of power-displacement ratio ( $L_{pp}=260\sim320$  m)

同様に Fig. 19 は常用出力/排水量である。同図中には本章で設定した 5 ケースの主機出力を矢印で示してある。case-0 は現状の常用出力であり、過去の建造船の中で航海速度、主機出力/排水量共に最も低い水準である。case-1 は現状の連続最大出力で、主機出力/排水量は最近の建造船の平均的な水準である。case-2 は低速運航船が数多く現れはじめた 1982 年頃の水準であり、case-3 はそれ以前の水準である。また、case-4 は現状よりさらに主機出力を低下させた場合である。Table.3 にこれらのケースについて設定した主機出力（常用出力 NOR）/排水量とその主機出力に対応する速力、シーマージンを 15% とした航海速度を示す。

Fig. 20 は 3 章と同様に横流れ角と当て舵量の許容最大値を  $\pm 20^\circ$  として、5 ケースの主機出力について操船不能となる風浪の方向と海象の関係を推定した結果である。主機出力の増大に伴って操船不能となる海象が荒天側(上側)に移ることがわかる。

この解析は風速と有義波高を一意的に定めて行ったものであるが、実海域における風速と有義波高の関係は一意的なものではない。そこで、操船制限海象と操船不能海象を風速と有義波高の組合せで示す。

Table. 3 Variation of engine output.

| Case no. | N O R / $\Delta$<br>(PS/MT) | Speed in still water (knot) |          |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------|
|          |                             | NOR                         | NOR/1.15 |
| 0        | 0.059                       | 13.0                        | 12.4     |
| 1        | 0.070                       | 13.7                        | 13.1     |
| 2        | 0.083                       | 14.5                        | 13.8     |
| 3        | 0.114                       | 16.0                        | 15.3     |
| 4        | 0.042                       | 11.5                        | 11.0     |

Fig. 21 が各主機出力に対する操船制限海象であり、Fig. 22 が操船不能海象である。主機出力の変化に対する操船制限海象の変化は有義波高で 5 m 程度であるが、操船不能海象は有義波高で 10 m 以上変化している。操船不能海象は安全に航行できる海象の限界でもある。したがって、主機出力を増加させることによって航行の安全性が増加するものと考えられる。

#### 4.2 主機出力と操船不能確率

操船不能確率及び操船制限確率は、北太平洋全域における通年の風速と波高の結合頻度表<sup>24)</sup>を用いて算出する。この結果を Fig. 23 に示す。主機出力の低下に伴って操船不能及び操船制限の両確率共に大きくなっている。また、操船不能確率は操船制限確率の 1/10 程度と小さい。

操船制限海象中では操船可能な方向が制限される。したがって、操船制限確率が大きい場合には運航上問題である

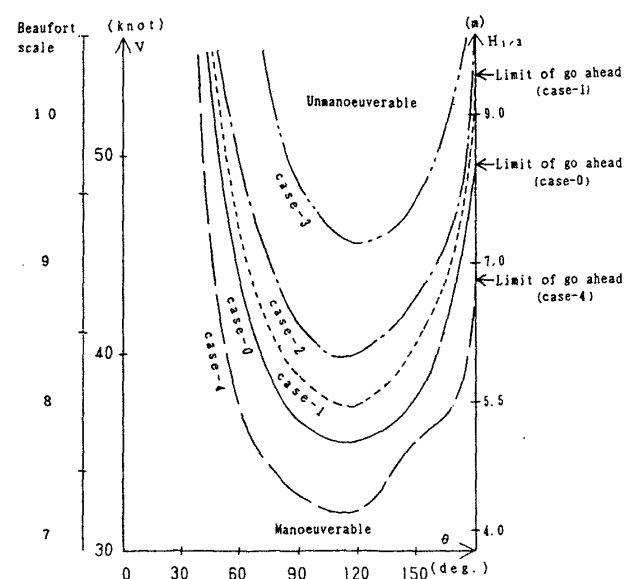


Fig. 20 Critical sea conditions at various NOR

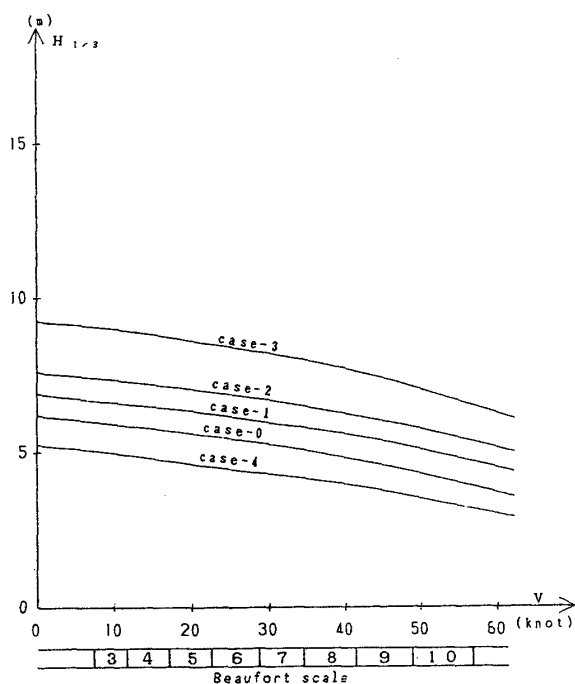


Fig. 21 Limited manoeuvrable sea conditions at various NOR

が、安全航海を維持するという観点から考えると避航できる範囲は十分ありあまり重要な問題ではないと推察される。一方、操船不能確率は操船可能な方向が極狭い範囲に限定され、風浪に対して船首を立てて定位置を維持することもできない状態になる確率であり、安全性の観点から主機出力を論ずる場合にはこの操船不能確率に許容値を設けることが妥当であると考えられる。

本研究で推定した操船不能確率は風浪による外力が大きいため船舶がその能力をすべて発揮しても操船が不可能になる確率であり、外的要因によるものである。一方、操船不能に陥る要因はこの他に推進機関系が故障により停止した場合、操舵機系が故障により作動不能になった場合等の内的要因が考えられる。これに関連して、推進機関系の故障については橋本・石塚<sup>25)</sup>によって実績値が調査されている。同調査は載荷重量6万5千トン級ディーゼル油槽船5隻、載荷重量13万トン級タービン油槽船6隻について約4年間にわたり事故追跡を行ったものである。寶田<sup>26)</sup>はこの結果を元に、推進機関系の信頼度を調査している。同調査では、直接推進に影響するものを重大事故と非重大事故に分け、さらに重大事故を主機停止と減速事故の2つに分けている。重大事故の内、主機停止の主機運転時間に対する時間率を Availability I として次式で定義している。

$$\text{Availability I} = 1 - \frac{T_1}{T_i} \quad (7)$$

ただし、

$T_1$ : 主機停止時間

$T_i$ : 主機運転時間

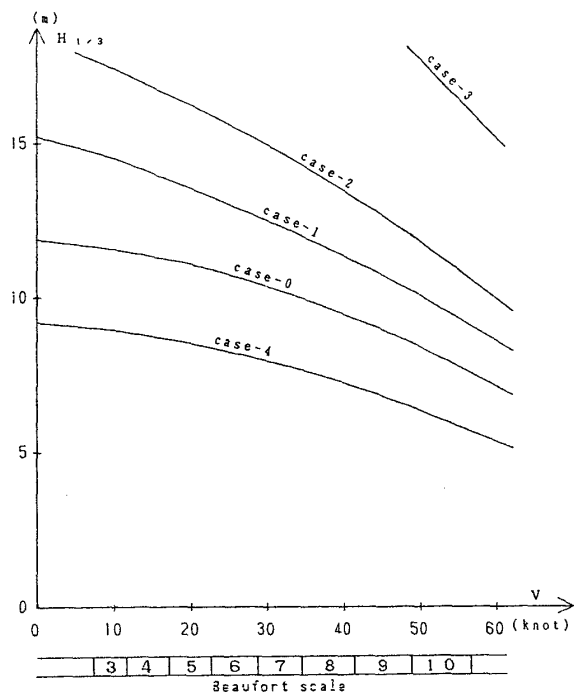


Fig. 22 Unmanoeuvrable sea conditions at various NOR

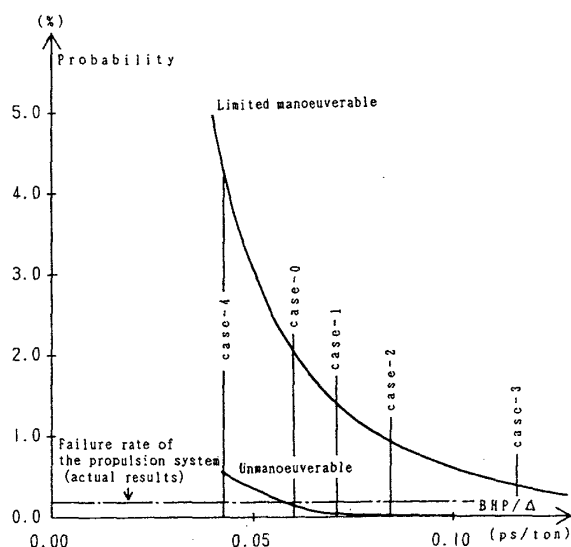


Fig. 23 Probability of limited manoeuvrable and unmanoeuvrable

である。また、停止事故も含んだ総減速事故の主機運転時間に対する時間率を Availability II として次式で定義している。

$$\text{Availability II} = 1 - \frac{(T_1 + T_2)}{T_i} \quad (8)$$

ただし、

$T_2$ : 減速事故時間

である。同調査によれば、主機運転時間を航海時間として、Availability I は 0.99820, Availability II は 0.99776 である。これより主機停止事故率 ( $F_1$ ) は 0.00180, 停止事故

を含む主機減速事故率( $F_{11}$ )は0.00224である。主機が停止した場合には、海象に無関係に操船が不能となる。したがって、主機の停止事故率 $F_1$ は内的要因による操船不能確率の実績値と考えられる。

外的要因による操船不能確率と内的要因による操船不能確率は互いに独立であり、内的要因による操船不能確率の実績値は操船不能確率の一つの目安と考えられる。そこで、本研究においては上述の推進機関係の信頼性の調査結果から、停止事故率を操船不能の許容確率と仮定することにする。

Fig. 23の一点鎖線はこの許容確率である。同図において各主機出力における操船不能確率と許容確率を比較すると、case-1～case-3は許容確率以下であり、このような場合には外的要因による操船不能より内的要因による操船不能の方が問題である。case-4は許容確率以上であり、このような主機出力は外的要因によって操船不能に陥る確率が高く、安全航海の面から問題である。case-0の操船不能確率は許容確率に最も近く、現状の常用出力は安全な航海を維持するために最低限必要な主機出力(必要最低主機出力)に近い出力である。

同図中の主機出力と操船不能確率の関係から、本解析対象船の許容確率に対応する主機出力/排水量を読み取ると0.058となる。

Fig. 19を見ると、既建造船の常用出力/排水量の最低値は上記の最低必要主機出力を与える主機出力/排水量に近い値である。この船と船体主寸法が同様な大型低速船の平水中抵抗推進性能及び風浪による定常外力等がこの船と大差ないものと仮定すると、本研究で得られた最低必要主機出力を与える主機出力/排水量はこのような大型低速船の最低必要主機出力の概略値と考えられ、大型低速船の主機出力をこれまでの実績以上に低下させることは、航海の安全性の面から問題であると考えられる。

## 5. 結 言

大型ばら積み貨物船を対象に規則波中の抵抗増加、波浪定常横力及び回頭モーメントを水槽試験から求め、これを基に風浪中船速・横流れ角・当て舵量の推定を行った。種々の海象に対しこの推定を行い、荒天時の操船可能性について考察した。さらに、主機出力と荒天時の操船可能性の関係を調査し、安全な航海のため最低限保持すべき主機出力を設定した。これらの検討によって得られた結論を以下に記す。

- 1) 荒天時の船速を推定する場合には風浪による定常横力及び回頭モーメントの影響を考慮する必要がある。
- 2) 非常に激しい荒天時には、避航操船法の一つであるち駐法(heave to)が行えない状態になり、安全航行の面から航行限界海象が設定できる。ここで解析の対象とした大型ばら積み貨物船が安全に航行できる海象の限

度は風速50ノット、有義波高8.5mである。

- 3) 本研究の荒天時操船可能性の推定結果は実航海の状況とほぼ一致し、本推定法の有効性が検証された。
- 4) 本研究で取り上げた大型ばら積み貨物船について、推進機関係の故障率の実績値を基にした操船不能確率の許容値を用いて安全な航海を維持するために最低限必要な主機出力を求めると、主機出力/排水量で0.058であり、現状の常用出力は最低限必要な主機出力に近い値である。

現在では、原油価格の安定により一時の急激な低速、低燃費競争に歯止めがかかり、低出力化も本研究で得られた最低限必要な主機出力程度のレベルで推移している。しかし、今後原油価格の再高騰等により低出力化推進の必要性が高まった場合、航海速力及び主機出力決定においては荒天時の操船性に十分留意する必要がある。また、本研究で得られた最低限必要な主機出力は、推定される荒天時操船性能と確率論的な検討を行う際に使用する統計値に左右される。したがって、荒天時操船性能の推定精度の向上と同時に、海象データ(平均風速、有義波高等)の充実及び操船不能確率の許容値についての一層の検討が今後必要である。

最後に、日本海事協会技術研究所寺田泰治元所長には、航海実績データの借用に関して御配慮頂きました。また、本研究の実験に於いては、住友重機械工業(株)平塚研究所佐々木紀雄氏、桜井仁氏に多大の御協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

尚、本研究は文部省科学研究費補助金の援助を受けて実施したものであることを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 船の科学, 船舶技術協会
- 2) 造船テキスト研究会; 商船設計の概要, 成山堂書店, p. 101
- 3) 門松浩司, 井上義行, 宝田直之助; 風浪中における船速低下に関する船型要素の影響, 日本造船学会論文集 164号, (昭和63年11月), p. 85-93
- 4) 北沢孝宗, 黒井昌明, 高木又男; コンテナ船の波浪中での限界速度, 日本造船学会論文集第138号, (昭和50年12月), p. 269-276
- 5) 金 順甲, 内藤 林, 中村彰一; 波浪中における低速船の推進性能に関する研究, 関西造船協会誌第196号, (昭和60年3月), p. 113-126
- 6) 高橋 雄, 浅井 滋; 大型低速肥大船の荒天時運航特性に関する実験的研究, 西部造船会々報第65号, (昭和58年3月), p. 51-61
- 7) 日本造船研究協会第210研究部会第3分科会; 数値水槽に関する調査研究, (平成元年3月)
- 8) 井上正祐, 石橋賢論; 操縦性に対する風の影響(I), 西部造船会々報第44号, (昭和47年9月), p. 111-128
- 9) Shigeru Asai; A Study on Check Helms for Course Keeping of a Ship under Steady External

- Forces 日本造船学会論文集第150号, (昭和56年12月), p. 245-253
- 10) Masayoshi HIRANO, Junshi TAKASHINA, Yoshifumi TAKAISHI, Toshihiko SARUTA; Ship Turning Trajectory in Regular Wave, 西部造船会々報第60号, (昭和55年9月), p. 17-31
  - 11) 中村彰一, 内藤 林, 井上 昭; コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究 (第5報), 関西造船協会誌第162号, (昭和51年9月), p. 67-77
  - 12) 神中竜雄, 深瀬 彊, 湯室彰規, 山崎慎昭; 高速船型の旋回に関する二三の問題, 造船協会論文集第111号, (昭和37年6月), p. 59-72
  - 13) 井上正祐, 平野雅祥, 平川雄二, 向井一浩; 等吃水船体の操縦微係数について, 西部造船会々報第57号, (昭和54年3月), p. 13-19
  - 14) 井上正祐, 平野雅祥, 向井一浩; 操縦時船体に働く横力・モーメントの非線形項について, 西部造船会々報第58号, (昭和54年9月), p. 153-160
  - 15) 藤井 斉, 大森秀夫; カジ特性に関する実験的研究 (その1), 新三菱重工技報 Vol. 4, No. 2, p. 165-183
  - 16) 芳村康男, 野本謙作; 増減速を伴う操縦運動の取扱について, 日本造船学会論文集第144号, (昭和53年12月), p. 57-69
  - 17) Isherwood, R. M.: Wind Resistance of Merchant Ships, Trans RINA, Vol. 115, (1973), p. 327-338
  - 18) 高橋 雄, 溝口純敏, 足達宏之, 井上隆一; 波浪中抵抗増加, 推進性能に関する実験技術, 運動性能研究委員会第1回シンポジウム波浪中推進性能と波浪荷重, (昭和59年12月), p. 13-36
  - 19) 内藤 林, 溝口純敏, 香川和彦; 斜波中を航走する船体に働く波浪定常力, 関西造船協会誌第213号, (平成2年3月), p. 45-50
  - 20) 関西造船協会; 造船設計便覧第4版
  - 21) 山内保文; 海洋波中の応答, 日本造船学会耐航性に関するシンポジウム, (昭和44年7月), p. 53-97
  - 22) 航海便覧編集委員会; 航海便覧, 海文堂, (昭和47年4月), p. 648-649
  - 23) 湯浅通史 他; 実船の就航時の船体応答について (第2報大型ばら積貨物船の船体応答), 日本造船学会論文集第161号, (昭和62年5月), p. 293-303
  - 24) 日本造船研究協会; 北太平洋の風と波の統計図表, (1980年3月), p. 9
  - 25) 橋本 武, 石塚邦典; 信頼性から見たタンカーの運航実績の統計的解析と考察, 日本舶用機関学会誌, Vol. 6, No. 10, (1971年10月)
  - 26) 寶田直之助; 舶用推進機関系の信頼性と軸数の関係について, 住友重機械技報 Vol. 22, No. 65, (1974年10月), p. 1-8
  - 27) 門松浩司, 井上義行, 宝田直之助; 低速域における波浪中抵抗増加と船速低下について, 日本造船学会論文集第166号, (平成元年12月), p. 217-223