肥大船の操縦性能に及ぼす 短波長方向スペクトル波の影響の一検討

正員 平 山 次 清* 正員 金 世 殷**

Manoeuvrability of a Full Ship in
Directional Spectrum Waves of Short Wave Length

by Tsugukiyo Hirayama, *Member* Se-Eun Kim, *Member*

Summary

Interim Standards for Ship Manoeuvrability was adopted at 18th IMO Assembly in Nov. 1993, and ship manoeuvrability becomes important from the viewpoint of human life safety and ocean environmental protection. In relation to these conditions, it is necessary to examine manoeuvring performance under the external force of waves.

In this report, Fujii-Takahashi's semi-empirical equation which can calculate the added resistance in short wavelength region is extended to calculate the surge and sway forces and yaw moment caused by directional spectrum waves having short wavelength. By introducing these forces to M. M. G. model, simulation for zigzag test in short wavelength waves is carried out and compared with the free running model experiment in the towing tank of Yokohama National University, in which directional spectrum waves can be generated. Further, manoeuvrability indices are obtained by $K-T$ analysis of simulation results using 1st order approximate equation.

1. 結 言

船の操縦性能は安全運行や経済運行にとって極めて重要な要素である事は論を待たない。その為に従来から活発な研究がなされて来たが、MMG モデルはその成果の一つであり、設計段階での操縦性能推定の有力な方法として定着しつつある¹⁾。

一方、近年の大型タンカーの衝突、座礁事故等を契機として「船舶の操縦性能に関する暫定基準(1993年11月より5年間試用)」が1993年11月にIMO総会において採択され²⁾操縦性能の劣る船舶は排除される方向が示され、個々の船の操縦性能及びその推定は更に重大な関心事となっている。それに伴って個々の船型を考慮出来る実用的な数値シミュレーションの重要性も更に増すものと考えられる。

本研究は短波長の方向スペクトル波による定常波力をMMGモデルに基づく数値シミュレーションに取り込み自由航走肥大模型船実験結果とも比較してその妥当性を検討した上で、IMO暫定基準にも盛り込まれているZ試験における回頭角の推定とも関連して波浪特に方向スペクトル波が操縦性能に与える影響を検討したものである。

波浪が操縦性能に与える影響を検討した従来の研究としてはRydill¹⁰⁾井上¹¹⁾, Perez¹²⁾, 平野¹³⁾, Ankudinov¹⁴⁾等のものがあるが、特に井上らは規則波中の船体運動に基づく定常力をも考慮した詳細な検討を行い有用な結論を得ている。またここで挙げた中で不規則波を考慮したものは文献10, 12, 14)であり、さらに方向スペクトル波を考慮したものは12)であるが、応答のスペクトルを論じており、参考文献全体を含めて操縦性能指数、Z試験でのオーバーシュート角といった論点は無い。

従って本研究では、方向スペクトル波が造波可能な本学の長水槽での実験および数値シミュレーションを実施し、特に方向スペクトル波中のZ操舵における応答性能に注目した。但し波長としては船体運動が比較的小さい、船長の1/2程度以下の短波長領域のみを考慮したが、この結果

* 横浜国立大学工学部

** 韓国三星重工業(株)中央研究所(研究当時横浜国立大学大学院)

は試運転時の操縦性能の波浪影響評価, 波浪修正といった問題を考える場合にも寄与するものと考えている。なお短波長波浪による定常外力については藤井・高橋の半実験式³⁾⁴⁾を拡張して方向スペクトル波中での抵抗増加と旋回モーメント増加を推定し MMG モデルに組み込んだ事, さらに, 得られた結果は実験上の制約から, タンカー模型の満載状態, 速度はサービス速度, 入射波の主方向は向かい波状態, 浅水ではなく深水におけるものである事に注意されたい。

また方向スペクトル波中の操縦運動に伴う船速低下については既に報告している⁶⁾ので本論文では触れない。

2. 操縦運動シミュレーション

2.1 短波長域の抵抗増加及び旋回モーメント増加

入射波の波長が船長の1/2よりも短い短波長域においては, 船体運動はほとんどなくなるため, 波浪中抵抗増加などの定常力は船側部で入射波が攪乱されることによる成分が大部分を占めるようになる。船側部からの反射波に基づく抵抗増加を厳密に計算することはかなり難しい問題であるため実用性も考慮して, ここでは次に示す近似的な計算法を用いた。

短波長域中の抵抗増加に関しては, 船首部に入射してくる波の反射が船体に反力を与えていると考え, Havelock による波長の極めて短い波の中に直立した柱状体に作用する Drifting Force の計算式⁵⁾を基礎にして, 藤井・高橋は有限吃水の影響及び前進速度の影響を表す実験的修正係数を加えて近似的な推定式を提案した³⁾。その後, 高橋は蓄積された実験データを用いて半実験式の見直しを行い, 改訂した半実験式を提案している⁴⁾。

本研究ではこのような短波長域の抵抗増加の藤井・高橋の半実験式を拡張して, 波により船体に作用する前後力, 横力, 旋回モーメントを求め, 操縦運動の数学モデルの外力項に取り入れ操縦シミュレーションを行うことにした。

短波長域による抵抗増加の船の前後 (X)・左右 (Y) 方向の分力は半実験式に基づいて次のように考える。

$$R_{AWX} = \alpha_1(1 + \alpha_2)0.5\rho g \zeta_a^2 B [\sin^2(\beta - \chi)]_X \quad (1)$$

$$R_{AWY} = \alpha_1(1 + \alpha_2)0.5\rho g \zeta_a^2 L [\sin^2(\beta - \chi)]_Y \quad (2)$$

ここで, L は船長, B は船幅, ζ_a は波振幅であり, Fig. 1 に示すように β は水線面が x 軸となす傾斜角, χ は波の入射角である。

船の重心から X, Y 方向の抵抗増加の作用中心位置までの距離を (右舷, 船首方向を正にする) x_{AW}, y_{AW} とすると, 旋回モーメント増加は次式で計算される。

$$N_{AW} = R_{AWX} \cdot x_{AW} - R_{AWY} \cdot y_{AW} \quad (3)$$

ここで, α_1 は有限吃水の影響を表す修正係数で, α_2 は前進速度の影響を表す修正係数である。その係数は次式のように表される。

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 I_1^2(1.5kd)}{\pi^2 I_1^2(1.5kd) + K_1^2(1.5kd)} \quad (4)$$

I_1, K_1 : 変形ベッセル関数

$$\alpha_{2X} = 3.5\sqrt{F_{Nx}}(-\cos \chi) \quad (5)$$

$$\alpha_{2Y} = 3.5\sqrt{F_{Ny}} \sin \chi \cdot \text{sign}(v) \quad (6)$$

d は吃水, F_{Nx}, F_{Ny} は X, Y 方向の船速 (Froude No.) である。

(1), (2) 式の Drifting Force に対する船首部肥大度の影響の大きさを与える bluntness 係数と言われる $[\sin^2(\beta - \chi)]_X, [\sin^2(\beta - \chi)]_Y$ は次式で計算する。

$$[\sin^2(\beta - \chi)]_X = \frac{1}{B} \left[\int_I \sin^2(\beta - \chi) dy + \int_{II} \sin^2(-\beta - \chi) dy \right] \quad (7)$$

$$[\sin^2(\beta - \chi)]_Y = \frac{1}{L} \left[- \int_I \sin^2(\beta - \chi) dx + \int_{II} \sin^2(-\beta - \chi) dx \right] \quad (8)$$

積分領域 I, II は Fig. 1 に示す。また (3) 式の抵抗増加の X, Y 方向の作用中心を次のように求める。

$$x_{AW} = \frac{\frac{1}{B} \left[\int_I \sin^2(\beta - \chi) y dy - \int_{II} \sin^2(-\beta - \chi) y dy \right]}{[\sin^2(\beta - \chi)]_X} \quad (9)$$

$$y_{AW} = \frac{\frac{1}{L} \left[- \int_I \sin^2(\beta - \chi) x dx + \int_{II} \sin^2(-\beta - \chi) x dx \right]}{[\sin^2(\beta - \chi)]_Y} \quad (10)$$

以上で求めた短波長域の抵抗増加と旋回モーメント増加は規則波中のものである。方向スペクトル波中ではこの計算法を用いて抵抗増加と旋回モーメント増加の応答関数を求め, 波の方向スペクトルすなわち周波数スペクトルと方向分布関数を考慮して, 方向スペクトル波中の抵抗増加と旋回モーメント増加を次式のように求めることができる。

$$\overline{R_{AWX}} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty \frac{R_{AWX}(\omega, \theta)}{\zeta_a^2} \cdot S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (11)$$

Fig. 1 Coordinate System for Calculation of Bluntness Coefficient

ここで $S(\omega, \theta)$ は方向スペクトルであり、長波頂不規則中では周波数スペクトル $S(\omega)$ を用いて周波数 ω に対する積分のみを行うことにする。このとき応答関数 $R_{AWx}(\omega, \theta)$ は $R_{AWx}(\omega)$ のようになる。そして $\overline{R_{AWx}}, \overline{N_{AW}}$ も (11) 式の $\overline{R_{AWx}}$ と同じように求められる。以上示した簡易推定法と類似の方法は文献 16) にも示されているが、本法では船側の肥大度係数を導入している点が異なり、また実際に方向スペクトル波中のシミュレーションを実施したのも初めてと考えられる。

以上の方法により藤井・高橋の短波長域の抵抗増加を求める半実験式を拡張して方向スペクトル波中の抵抗増加及び旋回モーメント増加を求めた例を Fig. 2 に示す。計算対象にした船は本研究で使用しているタンカー型肥大船である。上から X 方向の抵抗増加、 Y 方向の抵抗増加、そして旋回モーメント増加である。横軸は船首出合い角で、向い波状態がゼロ、波の主方向に対して船首が右舷に向いたときを正とする。そしてそのとき船にかかる力及びモーメントが正となるように表した。規則波、長波頂不規則波、 S パラメータが 25 の比較的方向分布が狭い方向スペクトル波、 $\cos^2$ 分布といわれる比較的広い方向分布を持つ方向スペクトル波に対して、有義波高 $H_{1/3}=5.0$ cm (実船スケールで 6.4 m)、平均波周期 $T_{02}=0.7$ sec (同 7.9 sec) で計算した結果である。規則波の場合は $H=H_{1/3}/1.6$ 、 $T=T_{02}$ と近似した。

X 方向の抵抗増加は規則波、長波頂不規則波、狭い方向分布の方向スペクトル波の場合船首角が約 40° 付近でピークを持つが、広い方向分布を持つ方向スペクトル波の場合は平滑化されて波主方向が正面のとき最大になる。そしてこの正面波において、同じ有義波高と平均周期では、方向スペクトル波の方が長波頂不規則波中より抵抗増加が大きく、方向スペクトル波においても方向分布が広い方向スペクトル波の場合が抵抗増加が大きくなる。このような結果は、参考文献 6) の方向スペクトル波中の船速低下の結果とも一致している。そして波との船首出合い角が大きくなるにつれて X 方向の抵抗増加は 0 に近づく。

Y 方向の定常力は大体船首出合い角と一緒に増加して横波状態の 90° 付近で最大値を持つ。また X 方向の抵抗増加がピークを持つ 40° 付近までは広い方向分布の方向スペクトル波中の場合が大きく、これより大きい角度では長波頂不規則波中の方が大きくなる。

一方定常旋回モーメントは船首角が約 $30^\circ \sim 40^\circ$ でピークを持ち、全体的な大きさは広い方向分布の方向スペクトル波、狭い方向分布の方向スペクトル波、長波頂不規則波の順になる。柏木ら¹⁵⁾ は Unified Theory により定常横力、定常回頭モーメントを求め実験との比較を行なっている(規則波中)が、その中の実験結果と本簡易計算とはオーダーは合っているが、モーメントについては横波でゼロとはなっておらず傾向は少し異っているようである。なお、本

Fig. 2 Added Resistance and Added Moment in Short Directional Spectrum Waves

簡易計算において規則波中の場合は波高を有義波高の $1/1.6$ として計算しており、傾向は長波頂不規則波の場合と一致するが定量的に不規則波と直接比較するのは困難であると考えられる。

2.2 短波長域の操縦シミュレーション

本研究では第18回IMO総会で採択された船舶の操縦性能に関する暫定基準の判断基準項目の一つである変針及び保針性能に関連したZ操縦試験を取り上げて、波浪による外乱の影響を調べるために、海上試運転が行われる場合が多いと考えられる短波長域の方向スペクトル波中における操縦運動をMMGモデルにもとづく操縦シミュレーション計算によって行った。MMG(操縦運動の数学モデル検討グループ)モデルの運動方程式は次式で与えられる¹⁾。

$$\begin{aligned} m(\dot{u}-vr) &= X \\ m(\dot{v}+ur) &= Y \\ I_{zz}\dot{r} &= N \end{aligned} \quad (12)$$

式の右辺の船に作用する流体力とモーメントは

$$\begin{aligned} X &= -m_x\dot{u} + X(u) + (m_y + X_{vr})vr \\ &\quad + (1-t)T - F_N \sin \delta \\ Y &= -m_y\dot{v} + Y_vv + (Y_r - m_xu)r + Y_{NL} \\ &\quad - (1+a_H)F_N \cos \delta \\ N &= -J_{zz}\dot{r} + N_vv + N_rr + N_{NL} \\ &\quad - (x_R + a_Hx_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (13)$$

である。このモデルで横方向の力と旋回モーメントの非線形項、 Y_{NL} 、 N_{NL} としては井上ら⁷⁾が提案したモデルの推定式を使用した。

$$\begin{aligned} Y_{NL} &= Y_{|v|v}|v|v + Y_{|v|r}|v|r + Y_{|r|r}|r|r \\ N_{NL} &= N_{|r|r}|r|r + (N_{rrv}r + N_{vrv}v)vr \end{aligned} \quad (14)$$

また各係数も井上らの各種船型に対する模型実験の結果のグラフを用いて、船の基本的な船型要素(L , B , d , C_d)に対する値を求めて使用する。

前節で示した短波長域の抵抗増加と旋回モーメント増加の簡易計算法をこのMMGモデルに取り入れて、操縦運動方程式の外力項すなわち船体に作用する流体力を求めるとき、波の方向と船首角を考慮して船に対する入射波の船首及び船側部での反射に基づく抵抗増加と旋回モーメント増加を加えて計算を行った。

計算は次節での水槽実験を行った船で、第196研究部会⁸⁾の設定したSR196C模型船と同一のタンカー型モデルのSR208模型船($L_{pp}=2.5$ m)を対象にした。模型船の

Fig. 3 Body Plan of Ship (SR 208=SR 196 C)

正面線図はFig.3に示し、主要目をTable1に示す。

波は有義波高 $H_{1/3}=4.0$ cm, 平均周期 $T_{02}=0.7$ sec ($\lambda/L \approx 0.3$)で、長波頂不規則波と、方向分布は $\cos^2$ 分布といわれる比較的広い方向分布を持つ方向スペクトル波すなわち短波頂不規則波を使用した。実際の海上試運転を仮想して船の初期速度を設計速度(14 knots)と一緒にするため、波による船速低下を考慮してプロペラ回転数を上げ、設計速度と等しい初期速度が出るようにした。そして本計算での当舵は実験と同じ 0.5° にした。

IMOの暫定基準に従ってFig.4の(a)に 10° - 10° Z操舵を、(b)に 20° - 20° Z操舵の短波長域での操縦シミュレーション結果を平水中の結果と一緒に示す。横軸は時間で、各々上図は舵角及び船首角を、下図は旋回角速度を表す。波浪中Z操縦の特徴は平水中より舵を切り替える時間が短くなっていることである。その理由は舵を転舵して船首が変針するとき波の影響で変針速度が早くなったためと思われる。また旋回角速度を見ると波浪中の旋回角速度の方が平水中より大きいことが分かる。

次に、Fig.4から第1オーバーシュート角と第2オーバーシュート角を見ると平水中と比べて波浪中の方が若干大きくなっている。具体的に 10° - 10° Z操縦では、平水中は各々 4.6° , 12.6° であり、長波頂不規則波中では 4.9° , 13.7° , 方向スペクトル波中では 4.7° , 13.8° である。そして 20° - 20°

Table 1 Principal Dimensions of Ship (SR208=SR196C)

Ship Name: SR208 (=SR196C)
w/ bilge keel

ITEM	SHIP	MODEL	
		Specified	Measured
L_{PP}	320.0 (m)	2.50 (m)	2.50 (m)
B	53.3 (m)	0.4164 (m)	0.4164 (m)
T_F	19.3 (m)	0.1508 (m)	0.1508 (m)
T_A	19.3 (m)	0.1508 (m)	0.1508 (m)
∇	263904. (m ³)	0.1258 (m ³)	0.1259 (m ³)
C_B	0.8017	0.8017	
C_M	0.9952	0.9952	
C_P	0.8056	0.8056	
C_W	0.8560	0.8560	
S	24759. (m ²)	1.5112 (m ²)	
S_{BK}	245.8 (m ²)	0.015 (m ²)	
L_{BK}	80.0 (m)	0.625 (m)	
B_{BK}	0.768 (m)	0.006 (m)	
$L_{CB} (\%L_{PP})$	-2.59	-2.59	
K_M	21.792 (m)	0.1703 (m)	
K_G	15.0 (m)	0.1172 (m)	0.1168 (m)
GM	6.792 (m)	0.0531 (m)	0.0535 (m)
k_{yy}	80.0 (m)	0.625 (m)	0.625 (m)
k_{zz}	80.0 (m)	0.625 (m)	0.628 (m)
$T_\theta (v=0)$	11.450 (sec)	←	1.012 (sec)
$T_\phi (v=0)$	15.047 (sec)	←	1.330 (sec)
λ		1/128

Fig. 4 Simulation of Zigzag Manoeuvre in Short Directional Spectrum Waves ($V_i = \text{const.}$)

Z 操縦の場合、平水中では 11.0° , 17.3° であり、長波頂不規則波中は 11.0° , 18.3° 、方向スペクトル波中は 11.5° , 18.5° である。

一方、次節の実験に沿って見てみると、平水中でサービス速度の出る一定の回転数を保持する場合は抵抗増加のため船速が低下して波浪に出会った時の初期速度が低くなる。このような状態を想定して操縦シミュレーションを行った結果を Fig. 5 に示す。この場合は先程とは逆に転舵の時刻歴が平水中より少し遅くなる傾向が見られる。

3. 水槽実験

本実験は前節で操縦シミュレーション計算の対象としたタンカー型モデルの SR 208 模型船 ($L_{pp} = 2.5 \text{ m}$) により、

Fig. 5 Simulation of Zigzag Manoeuvre in Short Directional Spectrum Waves ($rps = \text{const.}$)

曳航水槽で PCM 方式の無線操縦により行なわれた。

自由航走や方向制御に必要な装置は追跡台車にある制御用パソコンを除いてすべて模型船に設置されている。Fig. 6 に計測装置の概略を示す。模型プロペラは DC モータによって回転され自航動力計によりプロペラ回転数及び参考としてスラスト、トルクを計測する。プロペラ回転数は方向スペクトル波中船速低下を求めるために実施された自航模型実験⁶⁾で使用了回転数 (17.08 rps) でサービススピード ($F_n = 0.127$, 0.6365 m/s) に合わせた。

本実験では取扱いが難しい方位ジャイロを使用せず、模型船の船首角を得るために模型船の重心位置から一定距離の位置 ($\pm 50 \text{ cm}$) に小さいランプのターゲットを付けて、台車の高い位置でモノクロ CCD カメラでその動きをとらえる。TV 画面上の 2 点を画面処理装置 (Percept Scope) によって TV 画面上の 2 方向 (X, Y) の座標をリアルタイムで読み取る。このターゲットの変位の X 方向成分, Y 方向成分から, $\arctan$ の簡単な計算で船首角が求められる。このような角度の求め方は陸上でのキャリブレーションによって検証した。またこれらより船の重心点の変位を計算して模型船の台車に対する相対変位を求める。原理的にはここで求めた船首角を時間で微分することによって旋回角速度も求められるが、その計算に時間がかかって操縦制御が遅れる恐れがあり、また角度のわずかなノイズが極めて短い時間での微分によって拡大される可能性もあって、旋回角速度はレートジャイロで直接計測した。船速は以上で求められた模型船の台車との相対変位から船の進行方向成分を時間で微分することによって求められる。

Fig. 8 Modified Zigzag Manoeuvre in Short Directional Spectrum Waves (10°-5°)

Fig. 9 Modified Zigzag Manoeuvre in Short Directional Spectrum Waves (15°-5°)

の妥当性が確認される。

4. 操縦性指数

短波長を想定した操縦シミュレーション計算で比較的良好な結果が得られたため、シミュレーション計算によって波

 Fig. 10 Maneuverability Indices K' , T' in Short Directional Spectrum Waves

浪中特に方向スペクトル波中の操縦性指数の変化の推定を行う。即ち Z 操縦シミュレーションの結果から次の一次近似の運動方程式を用いて操縦性指数 K' , T' を求める。

$$T \frac{dr}{dt} + r = K(\delta_m + \delta_r) \quad (15)$$

δ_r は $\delta_m=0$ で直進するための補正項で当て舵量である。ここで無次元値 K' , T' , r'_m は次式のように定義される。ただし L は船の長さ、 U は船速である。

$$K' = KL/U, \quad T' = TU/L, \quad r'_m = r_m \times \frac{\pi}{180} \frac{L}{U} \quad (16)$$

(15) 式をシミュレーション結果に適用して K , T を求めるには連立方程式法と最小自乗法が用いられるが、ここでは標準とされる連立方程式法を使用した。具体的な計算方法は参考文献⁹⁾を参照されたい。操縦性指数のうち K は旋回力の指数で、 K が大きいほど旋回力が強いことを示す。 T は追従安定の指数で、小さいほど減衰が早く方向安定性が良い。波浪中での Z 操縦試験から求めた K , T には波浪の影響が含まれるため平水中とは異なった値を示す。

5°, 10°, 15°, 20° Z 操縦シミュレーションを平水中と波浪中で行い、その結果から操縦性指数 K' と T' を求めた結果を Fig. 10 に示す。計算の対象にした波は有義波高 $H_{1/3} = 4.0$ cm (実船換算 5.12 m)、平均周期 $T_{02} = 0.7$ sec (同 7.9 sec) ($\lambda/L \approx 0.3$) の短波長の長波頂不規則波と方向スペクトル波である。 K' は実線で、 T' は点線で示した。丸印は平水中の結果で、三角印は長波頂不規則波、四角印は短波頂不規則波すなわち方向スペクトル波の結果である。そして各 Z 操縦に対する r'_m の所に Z 操縦角度の値を示した。従来から知られているように全体的に Z 操縦角度が小さくなるほど操縦性指数が大きくなる。波浪中の操縦性指数 K' ,

T' は平水中より大きくなり、同じ波高と周期でも方向スペクトル波の方が長波頂不規則波より大きくなる。このことから波浪中の船舶の操縦性能は旋回力は強くなり、追従安定性すなわち針路安定性は弱くなると言えよう。そして長波頂不規則波中よりも方向スペクトル波中でこのような特性がより著しく見られる。

5. 結 言

本研究では従来検討例の無かった、肥大船の操縦性能に及ぼす短波長方向スペクトル波の影響、およびその評価を数値シミュレーションによって検討しうる可能性について調べる為に、方向スペクトル波による定常回頭モーメントの簡易推定法を組み込んだ数値シミュレーションを実施した結果について報告した。また数値シミュレーション手法確認の為に自由航走模型試験も実施した。模型はタンカー船型、満載状態、船速はサービス速度である。検討項目としては Z 操舵及びそれに基づく操縦性指数の変化、オーバーシュート角に特に注目した。平均波周期により定義した波長船長比 $1/3 \sim 1/2$ 程度、波高波長比 $1/20$ 程度の船体運動の小さい短波長不規則波中（波との主出合い角は向かい波状態）での特性に関して得られた結果は以下の通りである。

1. 短波長の方向スペクトル波による定常力の簡易推定法を組み込んだMMGモデルによる変形 Z 操舵の数値シミュレーションは、実験結果と比較的良好一致を示した。
2. 波浪の影響を操縦性指数の変化として捉えると一次系近似での指数 K , T はいずれも平水中より大きくなり方向スペクトル波中の方が長波頂不規則波中より更に大となる結果となった。
3. 前項の結果から予想される事ではあるが、IMO 暫定基準との関連で見ると、波浪中の方が平水中よりも Z 試験における転舵の時期が早まり、第一、第二オーバーシュート角度は大きくなるがその変化は1度程度の値であった。

なお今回の検討は模型船レベルでかつ限られた範囲のものであり、推定の信頼性および精度を上げるためには実船との相関の検討も含めて更に種々の条件下での検討の積み重ねが必要である。

謝 辞

本研究における実験、解析等に関して本学浮体研究室の

宮川清、高山武彦両氏に御助力を頂いた。厚く御礼申し上げます。そして本実験を担当された平成5年度本研究室の大学院生、4年生に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会試験水槽委員会、1981
- 2) 運動性能委員会・第10回シンポジウム：船舶設計時における操縦性能の推定と評価、日本造船学会、1993
- 3) 藤井 斉、高橋 雄：肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究、日本造船学会論文集、第137号、1975
- 4) 高橋 雄：波浪中抵抗増加の実用的推定法とその船型計画への応用、西部造船会会報、第75号、1988
- 5) Havelock, T. H.: The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle, P. R. S. Series A, No. 963, Vol. 175, 1940.
- 6) 竹沢誠二、平山次清、金 世殷、サザノ・アルベルト：方向スペクトル波中の船速低下に関する自航模型実験、日本造船学会論文集、第172号、1992.
- 7) 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、西部造船会会報、第58号、1979
- 8) 第196研究部会、船尾形状設計法(粘性流場)に関する研究報告書、日本造船研究協会、1986
- 9) 第2回操縦性シンポジウム、日本造船学会試験水槽委員会、1970
- 10) Rydill, L. J.: A Linear Theory For The Steered Motion of Ships in Waves, Trans. TNA, Vol. 101, 1959, pp. 81-112
- 11) 井上正祐、村橋達也：波中の旋回に関する一計算、西部造船会会報、第31号、1965, pp. 77-99
- 12) Perez, L.: Simulation Analysis of Ship Motion in Waves, JSR, Vol. 18, No. 1, 1974, pp. 32-45
- 13) Hirano, M., Takashina, J., Takaishi, Y. & Saruta, T.: Ship Turning Trajectory in Regular Waves, 西部造船会会報、第60号、1980, pp. 17-31
- 14) Ankudinov, V.: Simulation Analysis of Ship Motion in Waves, Proceedings, International Workshop on Ship and Platform Motions, UC Berkeley, 1983, pp. 384-403
- 15) 柏木 正、大楠 丹：波浪による定常流体力に関する研究、日本造船学会論文集、第173号、1993, pp. 185-194
- 16) 浜本剛実、野中晃二、溝口純敏：船体に働く流体力の推定法、運動性能研究委員会第4回シンポジウム、日本造船学会、1987