海上技術安全研究所報告 第1巻 第1号 (平成13年)総合報告 37

船体周りの非一様流中を伝播する短波長波に関する基礎的研究

上野道雄*,二村 正*,宫崎英樹*,野中晃二*

A Fundamental Study on Short Waves Propagateing in Non-uniform Flow around Ship's Hull

by

MICHIO UENO, TADASHI NIMURA, HIDEKI MIYAZAKI AND KOJI NONAKA

Abstract

In order to evaluate manoeuvrability of ships by analyzing manoeuvrability test at seas, effects of steady wave forces and moment must be estimated correctly since it is inevitable that ships suffer those external forces at seas. Moreover, the fact that short waves induce larger steady wave forces and moment than long waves and short waves exist anytime at seas means steady wave forces and moment have to be taken into account to secure safety of ships at seas. These are among reasons why short waves' effects on ships in manoeuvring motion must be investigated.

One of specific property of short waves is that short waves are easily deformed or refracted by flow around ships. Since flow around ships in manoeuvring motion is more complicated than that in straight running effects of non-uniform flow around ships must be taken into consideration for estimating its steady forces and moment.

Formula for estimating steady wave forces and moment acting on ships in manoeuvring motion which includes effects of non-uniform flow around ships is presented by applying Ohkusu's method for calculating added resistance of ships in head wave condition to manoeuvring condition that includes oblique, turning and their combined motion. Model experiment is carried out to measure steady wave forces and moment acting on a ship in oblique and turning motion in short waves with motion of wave period not constrained.

Calculated results by present method are compared with experimental data and those by other method of calculation. It is found that present method well describes property of steady wave forces and moment acting on ships both in oblique and turning condition. Effects of oblique and turning motion on steady wave forces and moment are discussed based on present calculation.

^{*}運動性能部

原稿受付 平成12年11月28日

審 査 済 平成13年 4月 2日

目次

0

1	緒言		2
2	非一	様流を考慮した定常波力の推定法	3
	2.1	局所域における現象のモデル化	3
	2.2	操縦運動と局所域モデルとの関係 、.	4
	2.3	定常波力と積分範囲	5
3	模型	実験による定常波力の計測	6
	3.1	模型船と実験状態........	6
	3.2	波力測定装置	7
	3.3	実験データの解析手順	7
4	実験	結果と計算結果の比較検討	8
	4.1	比較対象とする計算法	8
	4.2	停止状態の定常波力	9
	4.3	斜航状態の定常波力	9
	4.4	旋回状態の定常波力	9
	4.5	推定計算による斜航および旋回の影	
		響評価	11
5	結言		11

1 緒言

船体動揺を誘起しない程度の波長の短い波は実海 域では常に存在するが、船体の動揺や強度が問題と なる荒天下の波ほどには直接的に航行の安全性に支 障はもたらさないため、通常の航行時において短波 長波の影響が問題とされるのは主に船体抵抗の増加 要因という経済性の面からと考えられる。しかし、 短波長波のもたらす時間定常的な力である定常波力 は抵抗成分だけではなく、船体の左右方向の力や回 頭モーメントの成分も原理的に含まれており^[1]、ま た、これらの成分を含めた短波長波の定常波力が無 視できないものであることが実験的 [2] に確認され ている。このことは、短波長波が誘起する定常波力 の船の操縦性能におよぼす影響が通常の航行安全性 を考える上でも実用上重要であることを意味してい ると考えられる。

一方、衝突や座礁といった船舶の事故が重大な海 洋環境の破壊につながる可能性のあることから、船 の操縦性能に関する基準が国際海事機関によって検

討されている。その暫定基準では実船の操縦性能試 験は静穏な海象で実施することとされているが、風 や波あるいは潮流といった外乱を実海域において除 外することは不可能と考えられる。したがって、実 海域における操縦性能試験によって船固有の操縦性 能を正しく評価するためには、何らかの形でこれら 外乱の影響を考慮した上で試験結果を評価しなくて はならない。実海域における外乱のうち波について は、静穏な海象であったとしても船体の動揺をほと んど誘起しない程度の短波長波は一般に常に存在す ると考えられるため、短波長波の操縦運動への影響 を明らかにすることは実海域の操縦性能試験結果を 正しく評価するためにも必要と考えられる。

短波長波が原因となる定常波力のうちの前後力成 分については、これまで耐航性能分野における抵抗 増加成分として研究が積み重ねられてきており、藤 井ら^[3] による半実験式や Faltinsen ら^[4] の船体近 傍の流れを考慮した推定式、内藤ら [5] の波線理論に よる抵抗増加の推定などの研究がある。これらの研 究例に見られるように短波長波中の前後力に関して は比較的豊富な実験データが報告されており、推定 式の検証もそれぞれなされていると考えられる。ま た、これらの理論は一部左右力や回頭モーメントの 推定にまで発展させて研究 [6] [7] [8] されている。し かし、それらはほとんどが波浪中直進時を対象とし ており、今考えようとしている斜航や旋回を伴う操 縦運動中を対象にして定常波力を検討したものはほ とんどないように思われる。

定常波力が操縦運動におよぼす影響を検討した例 としては、Hiranoら^[9]の停止時定常波力の実験結 果を用いた波浪中の旋回運動の計算、波浪中直進時 のあて舵量等を検討した Asai^[10]の研究、斜航状態 等を検討した和田の実験および計算「7」、藤井らの方 法を拡張して短波長方向スペクトル波の影響を検討 した平山ら^[8]の研究、Newman^[11]の停止時の定常 波力推定式を取り入れた Kijima ら^[12]の波浪中操 縦運動のシミュレーション計算などがある。これら の研究では、前後力だけでなく左右力や回頭モーメ ントに関しても何らかの形で推定をおこなった上で それらの操縦運動への影響を論じているが、操縦運 動時の定常波力推定法の妥当性に関して十分な検証 がおこなわれているとは思われない。

短波長波の特徴として長波長波よりも流れの影響 を受けやすいことが上げられる。操縦運動中の船は 斜航運動や旋回運動をしており、直進中よりも船体 周りの流れが複雑となっていると考えられる。した がって、操縦運動する船への短波長波の影響を考え るためには船体周りの非一様流の影響を考慮する必 要があると考えられる。本報告では定常波力を斜航 および旋回を含む操縦運動時に働く準定常的な前後 力と左右力、回頭モーメントととらえ、まず、短波 長波がもたらす定常波力の推定法について船体周り の非一様流の影響を考慮できる Ohkusu^[13] による正 面向波直進中の抵抗増加理論を操縦運動中の船に拡 張して考察する。次に、短波長規則波中で斜航およ び旋回状態を含む操縦運動状態にある船に働く定常 波力を、模型船の波との出会周波数の動揺を拘束せ ずに計測した実験について述べ、さらに、本報告で 述べる推定法による計算結果と実験結果ならびに平 山らの方法、Sakamoto ら^[14]の方法による推定計 算結果を比較検討し考察をおこなった結果について 報告する。

2 非一様流を考慮した定常波力の推定法

短波長波が船体におよぼす力については、前後力 について藤井ら^[3]によって半実験的に推定式が示 され、高橋^[15]によって係数の見直しがなされた。 Falteinsen ら^[4]は船体周りの局所流による波の屈折 を考慮した抵抗増加の推定式を示した。Ohkusu^[13] はFaltinsen らの理論の不合理な点を改良し、向波 直進中の抵抗増加の推定式を導いた。Sakamotoら ^[14]はFaltinsen らの船速が小さい場合の展開式を修 正した推定式を導くとともに、円柱を対象とした具 体的な計算例によって、Faltinsen らの推定式の積分 範囲について明確でない点があることを指摘してい る。内藤ら^[5]やKalske^[16]は波線追跡法を用いた抵 抗増加の計算例を示しており、さらに内藤ら^[6]は左 右力と回頭モーメントについても計算をおこない実 験と比較検討している。

これらの理論はいずれも短波長波による定常波力 の起源を船体を局所的に見た場合の波の反射による ものと考えたものであり、理論的な位置づけとして は、船による波の Diffraction 問題のうちの入射波の 波数が無限大の極限に対応すると考えられる。この ような取り扱いは、平山ら^[8]の例に見られるように 操縦運動中の理論への拡張も比較的容易と考えられ るため、本報告でもこのような考え方を踏襲して斜 航や旋回といった一般の操縦運動中の船に働く短波 長波による定常波力を考えることとする。その際、



図 1: 局所域座標系

操縦運動中の船体周りの非一様流を考慮できる理論 の中から Ohkusu の方法を拡張して考察することと する。

2.1 局所域における現象のモデル化

流れのない深水域における短波長波中を操縦運動 する船を考える。まず、船に働く波の力を局所的に 考えるために水線面の一部を表す座標系を図1に示 す。接線方向に s 軸、内向き法線方向に n 軸をとる こととし、船体外部の領域を船体に接する近傍域と 遠方域に分けて考える。現象は定常であって、かつ n 軸方向のみに変化しているものとする。船体固定 の座標系から見たとき、遠方域には波数ベクトルk、 円周波数ω、振幅(の波とベクトルVで表される操 縦運動に起因する遠方域流れが存在することとする。 波数kと遠方域流れVの方向はs軸正方向から時計 回りにそれぞれ角度 γ_w と γ_V の方向とする。近傍域 にはベクトルVIで表される船体近傍域流れと遠方域 から伝播しこの流れによって変形された波数ベクト $ル k_1$ 、振幅 ζ_1 、円周波数 ω_1 なる波が存在すること とする。近傍域における流れ V1は s軸正方向とし、 近傍域における波数ベクトルk1の方向はs軸正方向 から時計回りに角度 γ_{w1} の方向とする。V、k、 V_1 、 k_1 はそれぞれV、k、 V_1 、 k_1 のスカラー量を表す。 定常状態における波頂の保存則 [18] は、次式のよ うに表される。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \tag{1}$$

ここで、tは時間を表す。(1)式を図1で示す系に適

用すると、次の関係が得られる。

$$\omega = \sqrt{gk} + Vk\cos(\gamma_V - \gamma_w)$$

= ω_1
= $\sqrt{gk_1} + V_1k_1\cos\gamma_{w1}$ (2)

ここで g は重力加速度を表す。

波数ベクトルが非回転^[18]である条件は次式で表 される。

$$\nabla \times \boldsymbol{k} = 0 \tag{3}$$

(3) 式を図1で示す系に適用すると、次の関係が得られる。

$$k\cos\gamma_{w} = k_{1}\cos\gamma_{w1} \tag{4}$$

近傍域の波数 k₁ とその方向 γw1 は (2) 式と (4) 式よ りそれぞれ以下のように求められる。

$$k_1 = \frac{(\omega - V_1 k \cos \gamma_w)^2}{g} \tag{5}$$

$$\gamma_{w1} = \cos^{-1} \left\{ \frac{gk \cos \gamma_w}{(\omega - V_1 k \cos \gamma_w)^2} \right\}$$
(6)

(5) 式と(6) 式より短波長の波ほど近傍域流れ V₁の 影響、すなわち船体周りの非一様流の影響を大きく 受けることがわかる。

遠方域から近傍域へ伝播する波の変化の様子が十 分緩やかなものであると仮定すると次式で表される wave action の保存則^[18]が成立する。

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{E}{\sigma} (c_g + U) \right\} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E}{\sigma} \right) = 0 \qquad (7)$$

ここで、 σ は空間固定座標から見た遠方域における 波の円周波数であり、 \sqrt{gk} で与えられる。また、Eは波のエネルギー、 c_g は波の郡速度ベクトルを表し、 E/σ が wave action と呼ばれる量である。今考えて いる定常問題に (7) 式を適用すると波振幅に関して 次の関係が得られる。

$$\frac{\zeta_1}{\zeta} = \sqrt{\frac{k_1}{k} \frac{2Vk\sin\gamma_V + \sigma\sin\gamma_w}{\sigma\sin\gamma_{w1}}} \tag{8}$$

遠方域から近傍域に伝播してきた波が船体に正反 射してs軸から反時計回りに γ_{w1} の方向に進んでい くものと考える。近傍域においてn = 0の平面に平 行な面と船体とで囲まれた領域における運動量変化 を考えることによって、水線単位長さあたりの船体 に働くn方向の力の時間平均から静水圧による寄与 分を除いた成分 F_n を求めるとこれは次のように表 すことができる

$$F_{n} = -\frac{\rho}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_{1} \frac{\partial \varphi}{\partial s} \right) \Big|_{z=0}^{2} -\frac{\rho}{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ \left(\frac{\partial \varphi}{\partial s} \right)^{2} - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^{2} + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^{2} \right\} dz$$
(9)

ここで、z は平水面を原点として鉛直下向きにとっ た座標を表し、各項の上部横線は時間平均を取るこ とを表す。φ は近傍域における速度ポテンシャルを φ としたとき次式で定義される速度ポテンシャル成 分であり、遠方域から近傍域まで伝播してきた波と これが船体によって反射された波の成分から構成さ れる。

$$\phi = V_1 s + \varphi \tag{10}$$

具体的には次式で表される。

$$\varphi = \Re \left[\frac{g\zeta_1}{\sigma_1} e^{i\{(k_1 \sin \gamma_{w1})n + (k_1 \cos \gamma_{w1})s - \omega_1 t\}} + \frac{g\zeta_1}{\sigma_1} e^{i\{-(k_1 \sin \gamma_{w1})n + (k_1 \cos \gamma_{w1})s - \omega_1 t\}} \right]$$

$$= \frac{2g\zeta_1}{\sigma_1} e^{k_1 z} \left\{ \cos(k_1 \sin \gamma_{w1})n \right\} \times \cos \left\{ (k_1 \cos \gamma_{w1})s - \omega_1 t \right\}$$
(11)

ここで、ℜは実数部をとることを表す。

近傍域における波の円周波数 ω_1 や波数ベクトル k_1 、振幅 ζ_1 は (2) 式、(5) 式、(6) 式、(8) 式のよう に与えられているからこれらを用いると (9) 式は次 のように表される。

$$F_n = \frac{1}{2}\rho g \zeta_1^2 \sin^2 \gamma_{w1} \tag{12}$$

(12) 式はある角度を持って壁面で反射される波がお よぼす定常波力について Havelock^[17]の与えた式と 形式的に同じであるが、振幅と角度に近傍域流れが考 慮されている点が異なる。ここまでの展開は Ohkusu が正面向波直進中の抵抗増加推定式を求めた場合と 基本的に同じと考えられる。実際、 $\gamma_V = \gamma_w$ とすれ ば Ohkusu の与えた局所的な直圧力の式と等価な式 が得られる。

2.2 操縦運動と局所域モデルとの関係

船の操縦運動と局所遠方域との関連を考える。操 縦運動中の船の座標系を図2に示す。x軸は船首方 向、y軸は右舷方向にとり、原点は船体重心にとる こととする。船は前進速度U、斜航角 β 、旋回角速 度rで運動しているものとする。波との出会角は χ



図 2: 船体運動と定常波力を記述する座標系

とし、定常波力の成分を X_d 、 Y_d 、 N_d で表すことと する。水線に沿った座標 $l(x_{wl}, y_{wl})$ を時計回りに定 義する。lの正方向はx軸正方向から時計回りに θ の方向とする。xy座標系の成分で考えると、局所域 における遠方域流れVと入射波を表す波数ベクトル kはそれぞれ次式で表される。

$$V = (U\cos\beta - y_{wl}r, -U\sin\beta + x_{wl}r) \qquad (13)$$

$$k = (k\cos\chi, -k\sin\chi) \tag{14}$$

水線に沿った座標1の方向のは次式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{dy_{wl}/dl}{dx_{wl}/dl} \tag{15}$$

法線方向単位ベクトルnは θ を用いて次式で表される。

$$\boldsymbol{n} = (-\sin\theta, \cos\theta) \tag{16}$$

接線方向単位ベクトルsは局所近傍域流れV1の方向 であるから、これを局所遠方域流れVの接線方向成 分の正の方向とすると次のように定義される。

$$s = (\cos \theta_s, \sin \theta_s)$$

$$\theta_s = \begin{cases} \theta, & \text{for } (n \times V)_z < 0 \\ \theta - \pi, & \text{for } (n \times V)_z > 0 \end{cases}$$
(17)

ここで、()_z は図2の座標系を右手系と見たときの z 方向成分を表す。図1に示した局所遠方域流れの 方向 γ_V と入射波の波数ベクトルの方向 γ_w は次の ように表される。

$$\gamma_V = \arg V - \theta_s \tag{18}$$

$$\gamma_w = \arg k - \theta_s = -\chi - \theta_s \tag{19}$$

局所近傍域流れの強さ、すなわち操縦運動に起因す る船体周りの非一様流の強さV₁については、二重模 型周りのポテンシャル流計算による方法やSakamoto らが用いた水線面と同じ断面形状を持った柱体周り の流れの計算による方法などが考えられるが、ここ ではFaltinsen ら、Ohkusuに倣って簡単化して次式 のように定義する。

$$V_1 = \boldsymbol{s} \cdot \boldsymbol{V} \tag{20}$$

2.3 定常波力と積分範囲

今求めようとしている定常波力 $X_d \ge Y_d$ 、 N_d は (12) 式で表される F_n を次式のように水線上で積分して得られる。

$$\begin{cases} X_d = -\oint F_n \sin\theta dl \\ Y_d = \oint F_n \cos\theta dl \\ N_d = \oint F_n (x_{wl} \cos\theta + y_{wl} \sin\theta) dl \end{cases}$$
(21)

正面向波直進中の場合の積分範囲については、Ohkusu は船首部の入射波に面した領域としている。斜波中 の場合の積分範囲については、局所的な力の推定法 は異なるものの、高橋、Faltinsen ら、Sakamoto ら はいずれも、図3に示すように、入射波の進行方向 に面している船体表面領域として定義している。し かし、斜波中直進時のみならず斜航や旋回を伴う操 縦運動中を考えると図3のような定義は曖昧な点 を含んでいると考えられる。物理的には波のエネル ギーが相対的に船に向かってくる領域を積分範囲と 定義すべきであると考えられる。実際、局所近傍域 で波が船体に反射するためには近傍域における波数 ベクトルの方向 γ_{w1} は、まず次の関係を満足しなく てはならない。

$$0 < \gamma_{w1} < \pi \tag{22}$$

さらに、(22) 式を前提として(8) 式で示す近傍域に おける波振幅が計算可能であるため、すなわち(8) 式右辺の根号の内部が正であるためには次の関係が 満足されなくてはならない。

$$V\sin\gamma_V + c_g\sin\gamma_w > 0 \tag{23}$$

ここで、*cg* は空間固定座標系から見た遠方域における入射波の郡速度を表す。(23) 式は遠方域において流れの中にある波のエネルギーの法線ベクトル*n*方向成分が正、すなわち波エネルギーが局所域において相対的に船体に向かってくるという条件を要求し



図 3: 入射波と船の位置関係による積分範囲の定義

ていると解釈することができる。(23)式中の遠方域 流れの強さ V には(13)式に示すように船体の操縦 運動が考慮されているから、たとえ斜波中直進時で あっても図3のように波の進行方向と船の位置関係 だけで積分範囲を定義することはできないと考えら れる。

積分範囲に関してもう一点考慮すべき点は (6) 式 で与えられる γ_{w1} が存在する条件である。これは次 式で表される。

$$|k\cos\gamma_w| \le \frac{(\omega - V_1k\cos\gamma_w)^2}{g} \tag{24}$$

(24) 式の右辺は(5) 式より k1 に等しいから、この条 件は近傍域における波数 k1 がある一定値よりも小 さくならないことを要求していることになる。とり うる最低値となった場合、すなわち(24)式で等号が 成り立つ場合は(4)式より γ_{w1} が0か π となる場合 であって、これは近傍域流れ V1によって波線が船体 に平行になるまで曲げられたものと解釈され、(22) 式の条件を満足できない場合に相当する。この場合、 波線は船体に到達することはできないため(12)式 で定常波力を評価することはできず、したがって積 分範囲からは除外されることとなる。ただ、この場 合は(23)式の条件を満足しない場合、すなわち遠方 域において波エネルギーが相対的に船体に向かって こない場合とは異なり、向かってきた波線が操縦運 動に伴う船体周囲流場の影響によって曲げられたこ とが原因であるから、本来は船体周囲流場の運動量 変化など何らかの形で船体への影響は考慮されるべ きであるが、本推定法ではただ単に積分範囲から除 外して考えることとする。

なお、波頂と直交する波線と波のエネルギーの進 む方向は流れの中の波を考えた場合には一般に一致 しないことから、(24)式の条件と(23)式の条件は 異なると考えられ、したがって両者が除外する積分 範囲は一致しないと考えられる。

表	1.	植型船主要寸法
1	1.	(火土加工女う)(ム

Length (L)	2.970(m)
Breadth	0.5383(m)
Draft	0.1791(m)
Displaced volume	0.23215(m ³)
Transverse	0.060(m)
metacenter height	
Yaw gyration radius	0.240 × L
Center of buoyancy	0.0253 × L
(fore from midship)	

積分範囲に関連する事項として、内藤ら^[6]は波線 追跡法によって定常波力の推定をおこなった場合に 追波状態で遠方からの波線が船体まで到達しないた め計算できない出会角があることを報告している。 上述の波線に関する議論はこれと類似するものと考 えられるが、後述の計算結果を見る限り本推定法で は内藤らが示したような計算できない状況はないも のと思われる。

3 模型実験による定常波力の計測

3.1 模型船と実験状態

実験は回転盤つきのいわゆる xy 台車を備えた水 槽でおこなった。実験に用いた模型船の主要目を表 1 に示す。本模型船は VLCC 模型である。舵とプロ ペラは装着した状態で、プロペラは固定状態にある。 実験状態は表 2 に示すとおりである。短波長波を考 えるため波長 λ は船長 L の 0.2 倍の状態とし、波振 幅 ζ は波が崩れない程度に大きくした値である。実 験状態には斜航および旋回状態に加えて比較のため 停止状態も含まれている。なお、表中の χ_{σ} は船の 進行方向と入射波の進行方向のなす角度を表し、図 4 に示すように、次式で定義される量である。

$$\chi_{\upsilon} = \chi - \beta \tag{25}$$

斜航状態において χ_v が 0deg あるいは 180deg の 場合では対称性を考慮して斜航角は正の状態のみを 実施した。また、旋回状態のうち、無次元旋回角速 度 r' が 0.3 の場合は旋回半径が水槽の大きさに比 べて大きくなりすぎるため、半周ずつ分けて計測を おこなった。旋回は右旋回とし、旋回中の斜航角は 0deg と+10deg または+18deg とした。

λ/L	0.2			
ζ (cm)	1.5	1.1		
U(m/s)	0.0	0.372		
Fn	0.0	0.069		
r'=rL∕U		0.0	0.3	0.6
β (deg)	-	+18,	+10,	· +18,
		0,	0	0
		-18		
χ (deg)	0, 10, 20,	-		
	, 180			
$\chi_{\rm u}({\rm deg})$	-	0, 15, 30,, 180		

表 2: 実験状態



(a)Oblique motion (b)Turning motion with oblique angle

図 4: 斜航および旋回状態における X₁₁ の定義

3.2 波力測定装置

短波長波中においては船体は波との出会周波数の 動揺をほとんどしないと考えられるので、模型船を 固定して力を計測しても実海域における定常波力の 特性をほぼ再現できると考えられるが、今回の実験 では模型船をできるだけ拘束しない形での計測をお こなった。波との出会周波数の船体動揺を拘束せず に曳航して定常波力を計測するためには、平水中の 曳航力と定常波力に相当するだけの反定常力を加え る必要がある。計測に用いた波力測定装置は、図5 に示すように、3つの定トルクモーターを備えてお り、これらが電気的にバネと重りに相当する力を発 生することによって平水中曳航力と反定常波力発生 の役割を受け持つ機構となっている。この機構によっ て従来の機械的なバネと重りを用いた装置[19]より も設定した実験状態を容易に実現することができる ようになり、斜航状態や旋回状態における定常波力 の計測が可能となった。本装置の仕様を表3に示す。 6種類の動揺はポテンショメータで、前後力と左右 力、回頭モーメントは模型船との接続箇所に設置さ



図 5: 波力測定装置

れた3分力計によってそれぞれ計測する。クランプ 装置は模型船が6自由度で動揺するため、模型の4 点をワイヤーで斜めに引き上げる機構となっている。 ワイヤーの巻き取りおよび繰り出し速度は実験状態 に応じて可変である。

停止状態と斜航状態で用いた電気的バネ定数は、前 後揺れについては 0.956N/cm(0.0975kgf/cm)、左右 揺れについては 1.65N/cm(0.168kgf/cm)、船首揺れ については 0.274Nm/deg(0.0279kgf-m/deg) と十分 小さな値である。旋回状態における電気的バネ定数つ いては、船首揺れのみについて 15.13Nm/deg(1.544 kgf-m/deg)という強い電気的バネ定数に変更した。 これは、斜航状態では簡単なフィードバック系を用 いて船首揺れの反定常波力を設定していたため弱い 電気的バネでも制御できていたが、旋回状態の場合 は時々刻々波との出会周波数が変化するため斜航時 に用いていたフィードバック系が利用できなかった という理由による。ただ、これだけ電気的バネ定数 を強くしても船首揺れが大きくなる波長の長い状態 での船首揺れ振幅は電気的バネ定数の小さい場合と ほとんど変化しないことを確認している。本装置を 用いた結果、波長船長比 0.2 の状態で、旋回状態の 斜航角設定誤差は計測中最大でも 0.4deg 程度であっ た。実験に使用した波力測定装置に関する詳細な仕 様や計測精度等については停止時の定常波力に関す る著者らの報告 [20] で述べているとおりである。

3.3 実験データの解析手順

停止状態では計測された力あるいはモーメントの 時間平均をとって定常波力データとした。斜航状態

Motion /Force	Range of motion	Range of forces	Range of spring constant	Mass of moving carriage
Surge	±200mm	±29.4N (3kgf)	Min: under 0.0294N/mm	8.9kg
Sway	±200mm	±68.6N (7kgf)	(0.003kgf/mm), Max: over 4.9N/mm (0.5kgf/mm)	18.4kg
Yaw	±30deg (additional ±20deg for anti- st-s. wave moment)	士39.2Nm (4kgf-m)	Min: under 0.0294Nm/deg (0.003kgfm/deg), Max: over 4.9Nm/deg (0.5kgfm/deg)	
Heave	±150mm			12.8kg
Roll	$\pm 30 \deg$			
Pitch	±20deg			

表 3: 波力測定装置仕様

では波浪中に計測した力のデータの平均値からあら かじめ平水中航走時の力のデータを差し引いて定常 波力データとした。旋回状態は厳密な意味では定常 状態ではないため波浪中の計測データは斜航状態の ように平均することはできない。定常波力データを 得る方法としては、斜航状態のように波浪中に計測 された力の時系列データから平水中の力の平均値を 一律に差し引く方法も考えられるが、今回は波浪中 の時系列データから平水中の時系列データを時々刻々 差し引く方法を採った。これは次のような理由によ る。模型船は xy 台車によって曳航されるが、旋回 状態では x 台車あるいは y 台車の曳航方向が変わ る点が出てくる。この点での台車の運動が十分滑ら かではないため台車固有の振動が発生して力の計測 データにどうしてもその影響が出てしまう。台車の 運転はプログラム化されているためこの振動成分は 波浪中も平水中も同じように出ていると考えられる。 したがって、時系列データとして時々刻々波浪中の データから平水中データを差し引くことによってこ の台車の振動による成分をほぼ除去したことになる と考えられる。なお、差し引いた時系列データに χ_{II} で20deg分に相当するデータ幅の加重移動平均化処 理をおこなって最終的な定常波力データとした。

4 実験結果と計算結果の比較検討

4.1 比較対象とする計算法

実験結果および本報告で示した推定法と比較する 計算法として、平山ら^[8] が示した方法と Sakamoto ら^[14] が示した方法をとりあげることとする。平山 らの方法は藤井ら^[3] の方法をもとにして操縦運動 中の前後力と左右力、回頭モーメントに対する推定 式を与えたものであるが旋回運動の影響は考慮され ていない。Sakamoto らが示したのは Faltinsen ら ^[4] の示した直圧力の式の船速が遅い場合の展開式で あって操縦運動中の定常波力の式を与えたわけでは ないが、ここでは Sakamoto らの示した展開式に、 本推定法と同じように(13)式および(20)式を考慮 して定常波力の3成分を計算することとした。

元々の式では平山らの方法のみが高橋^[15]の示し た喫水影響係数を含んでいるが、今回の比較では、 藤井らが示した次式で定義される係数 α₁ によって 喫水影響を考慮することとし、これを平山らの方法 および Sakamoto らの方法による計算に共通に適用 した。

$$\alpha_1(kd) = \frac{\pi^2 I_1^2(kd)}{\pi^2 I_1^2(kd) + K_1^2(kd)}$$
(26)

ここで、kは入射波の波数、dは船の喫水、 I_1 、 K_1 は変形ベッセル関数である。本推定法に関しては (26)式のkを(5)式で表される k_1 に置き換えた係数 $\alpha_1(k_1d)$ を(12)式の F_n に乗じることで喫水影響 を考慮することとした。喫水影響に関しては上述の ようにいずれの方法にも係数 α_1 の形で考慮するこ ととしたが、今回の計算対象は波長船長比が 0.2 で あるため、実質的にはこの係数はほぼ1になってい ると考えられる。

平山らの方法を用いるにあたっての積分範囲は平 山らが示したとおり入射波の進行方向に面している 船体表面とした。Sakamoto らは船速が遅い場合の 展開式を求める前の Faltinsen らの示した式を横波 中を移動する円柱に適用して入射波の進行方向に面 している物体表面でも力の評価ができない領域があ ることを指摘している。このことは船体近傍におけ る波数の存在条件に関するものとして (24) 式の条 件を満たさない状況と類似の状況と考えられるが、 Sakamoto らは具体的な積分範囲については述べて いない。実際、Sakamoto らも指摘しているように、 船速が遅い場合の展開式を用いる場合はこのような 問題は発生しない。そこで、Sakamoto らの方法を 適用するにあたっても、平山らの方法の場合と同様 に、図3で定義される入射波の進行方向に面してい る表面で力の積分をおこなうこととした。



図 6: 停止状態における定常波力

4.2 停止状態の定常波力

斜航や旋回といった操縦運動時の定常波力を検討 する前に前進速度影響のない停止状態の定常波力を 比較検討することとする。図6に停止状態の定常波 力の実験結果と計算結果を示す。横軸は波との出会 角 χ を表す。前進速度のない場合、本推定法と平山 らの方法、Sakamotoらの方法はいずれも同じ推定 値を与える。前後力と左右力は定量的にもよい一致 を示していることがわかる。回頭モーメントについ ては定性的にはほぼ一致しているものの斜め追波お よび斜め向波状態で定量的な差が見られる。原因と しては、特に船尾部の喫水が小さくなっている部分 に働く左右方向の力を過大に推定している可能性が あると考えられる。いずれにせよ、3種類の推定法共 通の問題として、前進速度とは関係しない回頭モー メントの推定誤差があることがわかる。

4.3 斜航状態の定常波力

斜航状態の定常波力の実験結果および計算結果を 図7に示す。図7には3組の結果が含まれている。 左の列は平山らの方法による計算結果、右の列は Sakamotoらの方法による計算結果、真ん中が本推 定法による計算結果を示しており、実験点はいずれ

海上技術安全研究所報告 第1卷 第1号 (平成13年)総合報告 45

も同じものである。横軸は船の進行方向と入射波の 進行方向のなす角 χ_v として斜航角毎に分けてデー タを図示した。

前後力に関しては平山らの方法とSakamotoらの 方法による推定計算結果は類似の傾向を示している。 本推定法は斜め向波状態で他の2つの方法よりも斜 航角の違いを大きく表現しておりこの点で実験結果 を定性的にはよく表現しているものと考えられる。 定量的には本推定法が一番実験結果に近いもののそ れでも斜め向波状態などで抵抗増加量として過小評 価する結果となっている。

左右力に関しては実験結果は明確に斜航角の影響 を示しており、向波状態から横波状態にかけてその 影響が大きく出ていることがわかる。逆に斜め追波 状態から追波状態では斜航角の影響は小さいことが わかる。3つの推定計算結果はこのような傾向をい ずれも定性的にはよくとらえたものとなっている。 定量的には本推定法が最も実験結果に近いがそれで も全般的に絶対値としては実験結果を少し下回る値 を示している。

回頭モーメントに関しては、左右力よりも実験結 果を表す点はばらついているものの、やはり実験結果 には斜航角の影響が大きく表れていることが伺える。 本推定計算結果と Sakamoto らの方法による結果は ほぼ同じ定性的傾向を示しているが平山らの方法に よる計算結果だけは若干異なる傾向を示している。 本推定法と Sakamoto らの方法として示した計算結 果はいずれも操縦運動の影響を(13)式および(20)式 の同じ形で考慮したものであるが、平山らの方法で は前後方向と左右方向のフルード数をそれぞれ前後 力と左右力に考慮しこれらを組み合わせる形で回頭 モーメントの推定式を構成している。このような違 いが計算結果の傾向の違いに表れたものと見ること ができる。定量的な評価は実験点が左右力に比べて ばらついているため難しいが、向波から斜め向波状 態では本推定法、横波に近い状態では Sakamoto ら の方法が実験結果に近い値を示していると思われる。

4.4 旋回状態の定常波力

旋回時の定常波力に関しては、平山らの方法が旋 回運動を考慮していないこと、Sakamotoらの方法 として示している方法では本推定法と同じ操縦運動 の考慮の仕方をしていること、さらに斜航状態での 比較より本推定法とSakamotoらの方法がほぼ同じ

(45)



図 7: 斜航状態における定常波力

傾向を示していることから、本推定法による計算結 果のみをとりあげて実験結果と比較検討することと する。図8と図9にそれぞれ無次元旋回角速度r'が 0.3と0.6の場合の図を示す。横軸は船の進行方向と 入射波の進行方向のなす角度 χ_v であるが、実験結 果は実質的に時系列データと見なしてよい。推定計 算結果は時々刻々の状態を定常状態として計算した 結果である。前章で述べたように、無次元旋回角速 度が 0.3 の場合を示す図8ではデータは2つの計測 をつなぎ合わせており χ_v が270deg 付近にデータ の境目がある。

無次元旋回角速度が 0.3 の場合をまず比較すると、 前後力、左右力、回頭モーメントいずれについても、 推定計算結果は追波中では斜航角の影響が比較的小 さく向波に近い状態ほどその影響が大きくなるとい う前節の斜航状態で示したと同様の傾向を旋回中も 示しており、実験結果もほぼこれに一致する定性的 傾向を示しているように見える。定量的には前後力 と左右力において χ_v が 270deg、データの境目付近 に大きな差が見られる。しかし、たとえば左右力の この実験結果は図 9 に示す無次元旋回角速度が 0.6 の場合の同じ χ_v 付近の値よりも大きな値を示して いることから、この付近で模型船が造波装置に近く なりすぎて反射波の影響を受けている等データの信 頼性が低下していることも考えられる。また、停止 状態あるいは斜航状態で計算結果と実験結果に比較 的差が見られた回頭モーメントについても実験デー タのゆらぎの程度を考慮すれば、複雑な操縦運動状 態にあるにもかかわらず本推定法は前後力、左右力、 回頭モーメントにおいておおむねよい推定値を与え ていると思われる。

無次元旋回角速度が0.6の場合は0.3の場合よりも 運動が強いため、実験データは雑音成分が多くなっ ている。しかし、この無次元旋回角速度が0.6の場合 でも旋回中の斜航角の影響が向波から横波にかけて 大きくなるという傾向は無次元旋回角速度 0.3 の場 合と同様に実験結果および計算結果に表れていると 見ることができる。無次元旋回角速度が0.3の時に 斜航角が 10deg なのに対し、0.6 では 18deg のため 斜航角の有無の差は計算結果では無次元旋回角速度 0.6の場合の方が大きい。実験結果では比較的データ が安定している左右力にこの計算結果と一致する傾 向が見られる。定量的には前後力においては χ, が 300deg 付近で実験結果と計算結果に差が見られる が、これも造波装置からの反射波の影響かどうかは 現時点では不明である。左右力では無次元旋回角速 度が 0.3 の場合にも若干見られた χ₁₁ が 100deg 付近 から 200deg 付近にかけての差が無次元旋回角速度 が 0.6 の場合にやや大きくなるようである。このこ とは斜航状態で左右力の計算結果がやや過小に推定

海上技術安全研究所報告 第1巻 第1号 (平成13年)総合報告 47



図 8: 旋回状態における定常波力 (r'=0.3)

されていたことに対応すると考えられる。回頭モー メントの斜航角が正の場合の実験データには χ_v が 150deg付近で信頼性に疑問のある挙動が見られ、そ の部分で定量的な差が大きい。しかし、これら以外 の部分では、本推定法は著しく不合理な推定値を与 えていると思われない。

今回の実験では無次元旋回角速度が0.3 と0.6 の 場合を実施し、図8と図9に示すように一定の傾向 をつかめる実験データが得られた。しかし、前後力 と左右力、回頭モーメントを含めて旋回角速度の大 きさの違いが定常波力にどのように表れているかを 図8と図9に示す実験データの比較から把握するこ とは計測精度の問題から困難と思われる。実験的に 明確に旋回角速度の大きさの影響を把握するために は計測精度の向上と、より大きな旋回角速度での計 測が必要と考えられる。

4.5 推定計算による斜航および旋回の影響評価

ここまでの実験結果との比較によって本推定計算 法が操縦運動中の定常波力の傾向をほぼ表現できる ことがわかった。そこで、本推定計算を用いて斜航 と旋回という操縦運動を構成する運動成分が前後力 と左右力、回頭モーメントの定常波力3成分にどの ように影響をおよぼしているかを調べることとする。 図 10 に斜航角が 0deg と 18deg、無次元旋回角速度 が 0.0 と 0.6 の場合の各組合わせの状態を横軸に船の 進行方向と入射波の進行方向のなす角度 χ_v をとっ て示す。

前後力については、斜航角なしの直進状態と斜航



図 9: 旋回状態における定常波力 (r'=0.6)

直進状態を比較すると単に波との出会角が斜航角 分ずれただけではない影響が波形の違いに表れてい ることがわかる。旋回の影響も斜航の影響とは異な る形で表れており、斜航角付旋回の場合はこれら両 者の影響が重ね合わさった形で表れているように見 える。

左右力については、斜航の影響が単に斜航角分だ けずれただけではないことは前後力の場合と同じで あるが、少なくともこの程度の旋回角速度では旋回 の影響がほとんど表れていないことが特徴的である。

回頭モーメントについては、斜航の影響はおもに 斜航角分よりもやや多きいずれとなって表れている ように見える。旋回の影響は回頭モーメントの値が 全般的に小さい方向にずれる形で表れている傾向が 見られ、斜航角付旋回の場合は両者の影響が重ね合 わさった形に近い傾向が見られる。

5 結言

操縦運動中の船に働く短波長波の定常波力を操縦 運動に伴う船体周りの非一様流の影響を考慮するこ とによって考察した。船体周りの非一様流を考慮し うる理論として正面向波直進中を対象にOhkusuが 示した理論を拡張することによって、短波長波が操 縦運動中の船に誘起する定常波力の推定式を求めた。 また、波との出会周波数の船体動揺を拘束せずに短 波長波中の停止状態と斜航状態、旋回状態で曳航実 験をおこない、前後力と左右力、回頭モーメント各 成分の定常波力を計測してその傾向を実験的に明ら



図 10: 定常波力に対する斜航運動とと旋回運動の影響比較

かにした。

本推定計算結果を実験結果ならびに平山らの方法、 Sakamoto らの方法による推定計算結果と比較検討 し、本推定計法による計算結果が斜航、旋回といっ た操縦運動の影響をほぼ表現していることを確認し た。また、本推定計算法を用いて斜航と旋回といっ た操縦運動を構成する運動成分が前後力、左右力、 回頭モーメントの定常波力成分にどのように影響を およぼしているかを明らかにした。

本推定法については、船体近傍の流れの強さの設 定や波線が屈折して船体にとどかない場合の力の評 価方法など、実験結果との定量的な差の改善ととも に今後さらに検討する必要がある点を残してはいる ものの、実海域に常に存在すると考えられる短波長 波の操縦運動に対する影響を操縦運動のシミュレー ション計算等で検討する際の一つの有力な手段にな りうるものと考えられる。

参考文献

- 野中晃二: 波浪中の操船運動について,西部造船会会報,第80号, (1990), pp. 73-86.

- [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),pp.132-137.
- [4] Faltinsen O. M., Minsaas K. J., Liapis, N., Skjørdal S. O.: Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway, Proceedings of Thirteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, (1980), pp. 505-529.
- [5] 内藤 林, 中村彰一, 西口 映: 肥えた船首をも つ船の短波長波における抵抗増加に関する研究, 関西造船協会誌, 第 197 号, (1985), pp. 39-45.
- [6] 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,(1990), pp. 45-50.
- [7] 和田洋二郎: 斜波中航走時の船速低下に関する
 一考察,西部造船会会報,第81号,(1990), pp.
 113-128.
- [8] 平山次清,金 世般:肥大船の操縦性能におよぼ す短波長方向スペクトル波の影響の一考察,日 本造船学会論文集,第176号,(1994), pp. 129-136.
- [9] Hirano, M., Takashina, J., Takaishi, Y., Saruta, T.: Ship Turning Trajectory in Regular Waves, Transaction of The West-Japan Society of Naval Architects, No. 60, (1980), pp. 17-31.
- [10] Asai, S.: A Study on Check Helms for Course Keeping of a Ship under Steady External Forces, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No. 150, (1981), pp. 245-253.
- [11] Newman, J. N.: The Drift Force and Moment on Ships in Waves, Journal of Ship Research, Vol. 11, No. 1, (1967), pp. 51-60.
- [12] Kijima K., Furukawa Y.: Ship Manoeuvring Performance in Waves, Proceedings of Third International Workshop on Theoretical Advances in Ship Stability and Practical Impact, (1997)
- [13] Ohkusu M.: Added Resistance of Blunt Bow Ships in Very Short Waves, Journal of The

(48)

Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 202, (1986), pp. 39-42.

- [14] Sakamoto T., Baba E.: Minimization of Resistance of Slowly Moving Full Hull Forms in Short Waves, Proceedings of Sixteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, (1986), pp. 598-613.
- [15] 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, (1987), pp. 75-95.
- [16] Kalske S.: Unsteady Bow Wave Field and Added Resistance of Ships in Short Waves, Thirteenth International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, (1998), pp. 59-62.
- [17] Havelock, T. H.: The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle, Proceedings of Royal Society of London, Series A, No. 963, Vol. 175, (1940), pp. 409-420.
- [18] Mei, C. C.: The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, World Scientific, (1992), pp. 59-108.
- [19] 原口富博,二村 正: 曳船およびバージの波漂
 流力計測,船舶技術研究所報告,第31巻,第3
 号, (1994), pp. 19-39.
- [20] 上野道雄、二村 正,宮崎英樹,野中晃二,原口 富博:停止時の船に働く定常波力に関する模型 実験,関西造船協会誌,第235号,(2001),(予定)