(昭和47年10月日本造船学会秋季講演会において講演)

斜波中の船体に対する波浪強制力について

正員小保方 準* 正員藤野正 隆** 正員前田久明***

On the Wave Exciting Force and Moment for a Ship Advancing in Oblique Waves

> by Jun Obokata, Member Masataka Fujino, Member Hisaaki Maeda, Member

Summary

The wave exciting force and moment for a ship advancing in regular waves have been calculated by the so-called ordinary strip method (O. S. M.) proposed by Prof. Watanabe and Prof. Tasai. Many comparisons between computed values obtained by O. S. M. and experimental data have shown fairly good agreement in case of a ship advancing in head seas.

On the contrary, the computed values for oblique waves have been scarcely compared with experimental data from lack of the testing facilities available for measuring the wave exciting force and moment in oblique waves.

In this paper, the experimental data of the wave exciting force and moment in oblique waves which were measured at the New Seakeeping Basin of Tokyo University are reported and compared with the theoretical values.

The theoretical calculations were carried out by the two different methods, that is to say the ordinary strip method and S. T. F. method. Comparisons between the theoretical values themselves by these two methods are also made.

In consequence of comparison between the experimental data and the computed values, the fairly good agreement for practical purpose was shown with respect to the five components of the wave exciting force and moment except the roll-moment.



斜波中の船体運動の計算には実用性を考慮して Strip 法が用いられている。この計算法の適用性を検証する ためには次の3つの段階をふまなければならない。第一は,船が運動することによって生ずる流体力に関する理 論と実験の対応づけ。第二は,波から受ける強制外力の検討。第三は,重ね合せの原理が成り立つか否かの検 討として,波浪中における船体運動の実験と理論の対応づけである。第一の検討はすでに藤井,高橋¹⁾によって 行なわれ,ほぼ満足すべき結論が得られている。また第三の検討は高石,吉野,高木,斎藤²⁾によって行なわ れ,各種運動性能について実験と計算の対応がなされている。ところで第二の波浪強制力に関する検討は、今ま で試験水槽の制約から斜波中の実験が不可能であった。そこで今回は東京大学船舶航海性能試験水槽において行 なった波浪強制力の実験結果とそれらに対応する理論計算結果を比較し,さらに各種計算法の比較検討を行なっ たので,その概要を報告する。

- ** 東京大学工学部
- *** 東京大学生産技術研究所

^{*} 住友重機械工業

日本造船学会論文集 第132号

2計算法

Strip 法としては特に渡辺³⁾ の理論に基づき田才^{4,5)} の流体力係数を使った Ordinary Strip Method⁷⁾ (以下 O. S. M. と略す) が広く用いられている。また最近になって高木,田才によってポテンシャル理論に基づいた 新しい Strip 法⁹ (以下 N. S. M. と略す) が示され,さらに N. S. M. とほとんど同じであるが,波浪強制力の 項も diffraction potential から厳密に導出している Strip 法が Salvesen, Tuck, Faltinsen に よって示され ている¹⁰⁾。この方法を以下 S. T. F. 法と呼ぶ。

座標軸を Fig.1 のように定める。S. T. F. 法による波浪強制力を fi とおくと^{8,10}

$$f_{j} = \int_{x_{A}}^{x_{F}} (f_{j}^{F}(x) + f_{j}^{D}(x)) dx + (E_{A} - E_{F})$$
(1)
(*i*=2, 3, 4, 5, 6)



Fig.1 座標軸

添字 *j*=2, 3, 4, 5, 6 は順番に Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw 方向を意味する。船体上α断面における単位振幅の波による Froude-Kriloff force *f*_j^F(*x*) は

$$f_j^F(x) = \rho g e^{-ikx \cos \lambda} \int_{C_x} n_j e^{iky \sin \lambda + kz} dl \qquad (2)$$

ただし、 $\rho = 密度$ 、g = 重力加速度、k = 波数、 $\chi = 船の波に対する斜行角$ 、 $n_j = 広義の法線ベクトル$ $n_5 = -xn_3$ 、 $n_6 = xn_2$ (3)

 $C_x = x$ 断面における contour

同様に diffraction force は

$$f_{j}^{D}(\boldsymbol{x}) = \rho \omega e^{-ik\boldsymbol{x}\cos\boldsymbol{\lambda}} \int_{c_{\boldsymbol{x}}} e^{ik\boldsymbol{y}\sin\boldsymbol{\lambda}+k\boldsymbol{z}} \left[(i\boldsymbol{n}_{3}-\boldsymbol{n}_{2}\sin\boldsymbol{\lambda}) \phi_{j}^{R} \mp \left\{ \frac{U}{i\omega_{e}} (i\boldsymbol{n}_{3}-\boldsymbol{n}_{2}\sin\boldsymbol{\lambda}) \phi_{3,2}^{R} \right\}_{j=5,6} \right] dl \qquad (4)$$

ただし、 ω =入射波の円周波数、 ω_e =船と入射波との出会円周波数、 ϕ_j^R =radiation potential $\phi_5^R = -x \phi_3^R$ 、 $\phi_6^R = x \phi_2^R$

(4)式の { } の前の符号は j=5 のとき負, j=6 のとき正をとる。

(1)式の第二項は end effect を表わすもので

$$E_{A,F} = \rho h_{W} U \frac{\omega}{i\omega_{e}} \left[e^{-ikx_{A,F}\cos \chi} \int_{C_{A,F}} e^{iky\sin \chi + kz} (in_{3} - n_{2}\sin \chi) \phi_{j}^{R} dl \right]$$
(6)

ただし、 x_A , x_F は船長方向の積分領域の端点で、 C_A , C_F はそれぞれの端点での 断面上の contour を意味する。h=波の振幅、U=船速。

さて, end effect について考察してみよう。O.S.M., N.S.M., S.T.F.法間 の運動方程式中の諸係数,波浪強制力計算式の相違については田才⁶⁾ によってく わしく述べられている。それによると(1)式で diffraction force に関してみる と, heave, Pitch の場合は平均吃水を T_m とおくと $z=-T_m$ とし, Sway,



(5)

Fig.2 C_A, C_F断面

Yaw, Roll の場合には z = -T/2, y = 0 とおくと得られる式は $E_{A,F}$ を除いて N.S.M. と一致し O.S.M. と もほぼ一致している。そこで end effect のみに注目すると、一般にはこの項を省略するか、 船尾、 船首の断面 積が零となる x 座標を x_A , x_F としておりこの項を取り入れた計算は見当らない。O.S.M., N.S. M. における end effect に相当する項は次のようになる。

a) N.S.M. の場合

Sway の場合を例にとると、高木⁹⁾、 田才の方法により文献 6)の(3·37)式より求まる波浪強制力から前進 速度に関係するものを取り上げると

$$F' = 2 \rho U \int_{x_A}^{x_F} \int_{-T}^{0} \bar{v}_{\eta} \frac{\partial \phi_{S'}}{\partial x} dz dx - 2\rho \omega U \int_{x_A}^{x_F} \int_{-T}^{0} \eta_W \frac{\partial \phi_{A'}}{\partial x} dz dx$$
(7)

ただし、T=吃水、 $\phi_{s'}, \phi_{A'}$ =radiation potential の実部虚部、波の orbital velocity の y 方向成分は

$$\bar{v}_{\eta} \doteq -h_{W} \omega e^{-kT/2} \sin \chi \sin \left(k x \cos \chi + \omega_{e} t\right)$$
(8)

Sub-Surface 12

$$\eta_{w} = h_{w} e^{-kT/2} \sin \chi \cos \left(kx \cos \chi + \omega_{e} t\right) \tag{9}$$

斜波中の船体に対する波浪強制力について

また,附加質量 Ms,減衰係数 Ns は次のように定義される。

$$2\rho \int_{-T}^{0} \phi_{S}' dz = -M_{S} \tag{10}$$

139

$$2\rho \int_{-T}^{0} \phi_A' dz = N_S / \omega_e \tag{11}$$

以上を(7)式に代入すると

$$F' = - \underbrace{U[\bar{v}_{\eta}M_{S}]_{x_{A}}^{x_{F}}}_{x_{A}} + \underbrace{U\int_{x_{A}}^{x_{F}} \frac{\partial \bar{v}_{\eta}}{\partial x}}_{x_{A}} \cdot \underbrace{M_{S}dx - \frac{\omega U}{\omega_{e}} \left[\eta_{W} \cdot N_{S}\right]_{x_{A}}^{x_{F}} + \frac{\omega U}{\omega_{e}} \int_{x_{A}}^{x_{F}} \frac{\partial \eta_{W}}{\partial x}}_{x_{A}} \cdot \underbrace{N_{S}dx}_{x_{A}}$$
(12)

が得られる。ここで --- を付した項に(8),(9)式を代入したものは,(6)式で $d^R = d^R + i d^R$

$$\phi_2^R = \phi_{C2}^R + i \phi_{S2}^R \tag{13}$$

とおいて

$$\int_{C_z} n_2 \phi_{C_2} \, dl = \frac{N_S}{\rho} \tag{14}$$

$$\int_{C_x} n_2 \phi_{S2} dl = \frac{\omega_e M_S}{\rho} \tag{15}$$

として附加質量と減衰係数を定義し, y=0, z=-T/2 での値で近似したものと全く一致する。 他の方向の波強制力についても全く同様である。

b) 0.S.M.の場合

やはり Sway の場合を例にとると、文献 6)の(3·9)式より、波浪強制力のうち前進速度に関係するものを とると

$$F'' = -U \int_{x_A}^{x_F} \bar{v}_{\eta} \frac{\partial M_S}{\partial x} dx = -U [\bar{v}_{\eta} M_S]_{x_A}^{x_F} + U \int_{x_A}^{x_F} \frac{\partial \bar{v}_{\eta}}{\partial x} \cdot M_S dx$$
(16)

(16)式において ~~~~~ を付した項は(12)式第一項に一致している。しかし(12)式の第三項に相当する項は 0. S. M. にはない。

次に O.S.M., N.S.M. では波浪強制力を計算する場合次に述べるような cross term は含まれない。すなわち(4)式を計算する場合,左右対称な船型と仮定すると,O.S.M. の近似として

j=3のとき $z=-T_m$, y=0 とおくと

$$-\int_{C_{x}} n_{2} \sin \chi e^{i k y \sin \chi + k z} \phi_{3}^{R} dl = -e^{-kT_{m}} \sin \chi \int_{C_{x}} n_{2} \phi_{3}^{R} dl = 0$$
(17)
(∵ $n_{2} \phi_{3}^{R}$ は奇函数)

となる。

j=2のときには、z=-T/2、y=0とおき j=3の場合と同様の議論が成立し

$$i \int_{C_{x}} n_{3} e^{i k y \sin \chi + k z} \phi_{2}^{R} dl = i e^{-k \frac{T}{2}} \int_{C_{x}} n_{3} \phi_{2}^{R} dl = 0$$
(18)

となる。ところが O.S.M. の近似をしない場合、 $\chi \neq 0$, 180°のとき、(17)式、(18)式の左辺の被積分函数が奇函数とならないことにより、これらの cross term は一般的に零とはならない。

文献 7)の計算式に基づいた 0.S.M. と文献 10)の S.T.F. 法を用いて,以上に述べた両計算法の相違点に 着目して波浪強制力の理論計算を行なった。ここで S.T.F. 法というのは(1)式を計算する場合,断面まわり を片側 16 分割し各区間を直線で近似して積分する方法とする注¹⁾。また,単に S.T.F. 法と呼 ぶ場合 end effect を含めないものとする。O.S.M. と S.T.F. 法の計算はともに AP から FP まで21分割し,各断面の 波浪強制力を求め,これを船の長さ方向にシンプソン法によって加え合わせて全体の波浪強制力を求めた。断面 形状は O.S.M., S.T.F. 法とも Lewis Form で近似し,断面の流体力係数,速度ポテンシャルは田才^{4,5)}の方 法により求めた。

Lewis Form を Fig.3 に示す。計算要目は速度について $F_n=0\sim0.3$ で 0.1 きざみ, $\chi=0^{\circ}\sim180^{\circ}$ で 30° き ざみ, 波長船長比 $\lambda/L=0.25\sim3.0$ で 0.25 きざみとした。計算結果の一部を Fig.8~47 に示した。S.T.F. 法 で前に述べたような cross term の項を含めない場合の計算も行ない結果を Fig.5~6 に示した。

ここで O.S.M. と S.T.F. 法の主な相違は一つには O.S.M. では波の orbital motion の速度をある深さの







値で代表させるのに対して, S.T.F. 法では各深さの 点での入射波の速度ポテンシャルの値をそのまま用い ていることであり,二つには,前述の cross term を O.S.M. は含まず, S.T.F. 法では含んでいるという ことである。このうち後者に関する差が前者に比べて 大きい。なお, Surge 方向の波浪強制力については本

論文では理論計算をしていない。参考として実験値のみを示す。

3 計算値と実験値の比較検討

東大船舶航海性能試験水槽において,拘束模型による六分力波浪強制力試験を行なった。本実験は日本造船研 究協会108部会において,筆者らが行った実験と同じもので,装置に若干の改良と解析の修正をしたために追試 という形で行なったものである。結果は今回のもののみを示してある。



模型船の要目を Table 2 に示す。実験装置の概要を
Fig.4 に示す。roll モーメント用以外の各ピックアッ
プはロッドを介して支柱に固定される。互いの方向の

Table 2 模型船主要目 (m) 2.5 L_{pp} В (m)0.3629 d_m (m) 0.1214 dr (m) 0.1143 0.1286 d_a (m) C_b 0.559 \overline{V} (cm³) 61.872×10³ L.C.B. (m) 0.0452 (aft.) KG 0.1341 (m)KM(m) 0.1484 GM(m) 0.0143 0.25 k_l/L_{pp} T_{τ} 2.1514 (sec)

力の干渉をなくすために接続部分はボールジョイントを使っている。heave, pitch, sway, yaw に関しては差動 トランスで力を検出し加算器を通してそれぞれの力を求めている。surge 力は strain gauge で測定した。また, roll モーメントは磁歪管で測定し,磁歪管と支柱とは上下,左右には自由になるようにT字形ロッドとロッドを 斜波中の船体に対する波浪強制力について

用いて接続してある。

実験要目は、速度 $F_n=0\sim0.3$ で 0.1 きざみ、 $\chi=0^\circ\sim180^\circ$ で 30° きざみ、 $\lambda/L=0.5$ 、0.75、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 とした。また、波高はすべて 30mm で行なった。

なお、航走中の船体は sinkage があるので拘束試験の場合、船体を固定したまま であると排水量が減少する。したがって、各速度に応じて sinkage 分だけ船体を沈 めておく必要がある。sinkage を Table 3 に示す。さて、ここで理論計算値と実験 値の比較をしてみよう。O.S.M. と S.T.F. 法による計算値を比較すると前進速 Table 3Sinkage F_n sinkage (mm)000.10.60.23.50.38.0

度が小さい時は heave, pitch では両者の差が小さく sway, yaw, roll では差が大きい。この差は Fig. 5, 6 からわかるようにほとんど cross term の影響である。また前進速度が大きい時, pitch, yaw に関して両者の 差が大きいが, これは田才⁶⁾ によって示されたように強制力計算式中の前進速度に関する項の相違によるものと 考えられる。



次に実験値との比較をすると, strip 法による強制力計算は斜波中でも向波中と同程度の精度を与えることがわかる。前進速度が零のときは S. T. F. 法の方が O. S. M. より実験値に近い値を与えるが, 前進速度があると きに O. S. M. の方が実験値と一致する場合もあり, 実用的には斜波中の波浪強制力計算はすべて O. S. M. で十 分であると思う。

end effect に関しては, heave, pitch の場合, 計算の上でほ とんど影響がないのでグラフには示していない が, sway, yaw, roll の場合 Fig. 24~Fig. 47 からわかるように無視できない大きさを持つことがわかる。しか し, end effect を含めて計算をしても計算値が実験値と一致するよりも, むしろ離れる場合の方が多く, 今後さ らに船型による相違や前後断面の与え方による相違を考慮して検討を加えなければならないと思われるが, 本船 に関する計算では効果を認めることができなかった。なお end effect を考えない場合には断面積が零になる点 を両端として計算をしなければならないが, 本船では FP, AP 前後の残余体積はほとんどないので, その部分 に働く強制力は省略できると考えられる。

次に各方向の強制力について検討してみる。

heave 力の場合, O.S. M. と S. T. F. 法による計算値はほとんど一致しており, 実験値とも良く一致している。前進速度が大きい場合実験値の方が大きくなる傾向があるが. この原因としては航走中には船首尾で吃水が深くなりそのために特に船尾附近で水線面幅が著しく増大するためであると考えられる

Pitch モーメントの場合,前進速度が小さい範囲では O.S.M. と S.T.F. 法の計算値の差は小さいが前進速 度が大きくなると両者の計算式中の速度に関係する項の相違により差がでてくる。実験値との比較では S.T.F. 法の方が良い値を与える。前進速度が大きいとき実験値が計算値よりもかなり大きい場 合 が あ る が, これ は heave 力のところで述べた原因と同じものであると思われる。また,モーメントの最大値は実験値の方が小さく なる傾向にあるが,これは船体によって波形がくずれるためであろうと思われる。

sway 力の場合, cross term の影響によって波の入射角が 90° に近い程 O.S.M. と S.T.F. 法に差異が現われるが,実験値と比較した場合有意な差とは認められず両計算値とも良い結果を与えていると言える。

yaw モーメントの場合,前進速度が大きい程 O.S.M. と S.T.F. 法の計算値に差が出るが, 差はあまり大

14**T**

€н .0.€

10.4

+0.2

10

きくない。実験値と比較すると両計算とも良く一致しているが前進速度が大きい場合、横波で実験値の方が小さ くなる。

roll モーメントの場合, cross term の影響によっ て 0.S.M. と S.T.F 法の計算値に差がある。実験 値と比較すると両計算とも他の方向の強制力に比べて 差異が大きい。 strip 法のような二次元理論では限界 があるように思われる。しかし、order 的には実験値

	X (deg)							1
字 驗	0	30	60	90	120	150	180	1
	0	Δ	a	х	•	▼	٥	\wedge
	0.S.M							
計算	s.T. F (without end-effect)						fect	Y~
ur 3,	" (with end-effect)						ct)	1~

Fig.7 グラフ要目

と合っており目安をつける意味では strip 法による計算も有効であろう。





Fn = 0.1

120

1.0



Fig. 12





Fig. 14

λ/L 3.0

180°

2.0

Fig. 11



















Fig. 24~31 sway force



日本造船学会論文集 第132号













CR

3.0

2.0

1.0







Fig. 43





Fig. 44 Fig. 40~45 roll moment







Fig. 45

斜波中の船体に対する波浪強制力について



Strip 法による波浪強制力の計算の有用性に関して以下の結論が得られた。

1) 波浪強制力のうち roll モーメントを除いた heave, pitch, sway, yaw 方向の強制力の 値は O.S.M. によってほぼ実用的な値が得られる。

2) roll 方向の波浪強制力の計算法は今後検討を要する。

3) O.S.M. と S.T.F. 法の差異は主に cross term と end effect によって生ずるが、これら両計算法による値の間には実験値と比較した場合有意な差は認められない。

終りに、本論文を作製するに当りご指導を賜わりました東京大学元良誠三教授に深く謝意を表するとともに、 実験、図面作製にご協力いただいた東京大学船舶工学科小柳雅志郎氏、和田哮氏、東京大学生産技術研究所鈴木 文博氏、大学院生土岐直二氏ならびに計算のご指導をして頂いた IHI 技術研究所梶田悦司氏、宇喜多宣家氏に感 謝いたします。なお計算には東大大型計算機センター HITAC 5020 E と IHI UNIVAC 1108 を使用した。

参考文献

- 1) 藤井 斉,高橋 雄:強制動揺法による横方向運動方程式の係数の計測結果,日本造船学会論文集第 130 号 (1971).
- 2) 高石敬史,吉野泰平,高木又男,斎藤公男:一軸高速コンテナ船の斜め波中における動揺特性,日本造船 学会論文集第129号 (1971).
- 3) 渡辺恵弘:船の上下動及び縦揺の理論に就て,九大工学集報31巻1号(1958).
- 4) 田才福造:船の上下揺並びに縦動揺に於ける減衰力及び附加質量について,造船協会論文集第105号 (1959).
- 5) F. Tasai: Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface, 九大応力研英文報告, Vol. XIV, No. 48 (1961).
- 6) 田才福造: Short Crest Wave 中における Sway, Yaw および Roll の運動について、西部造船会々報 42 号 (1971).
- 7) 福田淳一, 永元隆一, 小沼守, 高橋実: 波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する 理論計算, 日本造船学会論文集第129号 (1971).
- 8) T.F. Ogilvie and E.O. Tuck: A Rational Strip Theory of Ship Motions Part I, The University of Michigan, No. 013 (1969).
- 9) 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 (1969).
- 10) N. Salvesen, E. O. Tuck and O. Faltinsen : Ship Motions and Sea Loads, SNAME (1970).

注 1) S. T. F. 法による計算法の一例 (4)式より *j*=2 のとき

$$f_2^D(x) = \rho \omega e^{-ikx \cos \chi} \int_{C^x} e^{iky \sin \chi + kz} (in_3 - n_2 \sin \chi) \phi_2^R dl$$

そこで

 $f = R_e \{ f_2^D(x) \cdot e^{i\omega t} \}$ $\phi_2^R = \phi_{C2} + i\phi_{S2}$ $K_x = kx \cos \chi$ $K_y = ky \sin \chi$ 日本造船学会論文集 第132号

とおくと

 $f=f_C \cos \omega t + f_S \sin \omega t$

$$f_{C} = 2 \rho \omega \left\{ \cos K_{x} \left(-\int_{-b}^{0} \sin K_{y} e^{kz} \phi_{C2} dy + \sin \chi \int_{0}^{-T} \cos K_{y} e^{kz} \phi_{C2} dz \right) \right. \\ \left. + \sin K_{x} \left(-\int_{-b}^{0} \sin K_{y} e^{kz} \phi_{S2} dy + \sin \chi \int_{0}^{-T} \cos K_{y} e^{kz} \phi_{S2} dz \right) \right\} \\ f_{S} = -2 \rho \omega \left\{ \cos K_{x} \left(\int_{-b}^{0} \sin K_{y} e^{kz} \phi_{S2} dy + \sin \chi \int_{0}^{-T} \cos K_{y} e^{kz} \phi_{S2} dz \right) \right. \\ \left. + \sin K_{x} \left(-\int_{-b}^{0} \sin K_{y} e^{kz} \phi_{C2} dy + \sin \chi \int_{0}^{-T} \cos K_{y} e^{kz} \phi_{C2} dz \right) \right\}$$

ここで、船体断面を Fig.52 に示すように折線で近似をすると、m番目の 線分の方程式を

$$z = p_m y - q_m$$

$$\int_{-b}^{0} \sin K_{y} e^{kz} \phi_{C2} dy$$

$$= \sum_{m=1}^{16} \phi_{C2}^{m} \int_{C_{m}} e^{k(p_{m}y - q_{m})} \sin K_{y} dy$$

$$= \sum_{m=1}^{16} \phi_{C2}^{m} \left[\frac{e^{kz}}{k(p_{m}^{2} + \sin^{2}\chi)} \{p_{m} \sin K_{y} - \sin \chi \cos K_{y}\} \right]_{y_{m}, z_{m}}^{y_{m+1}, z_{m+1}}$$



Fig.52 S.T.F.法による 計算方法

他の積分も同様にして計算できる。

0.4

õ

<u>, я</u>



Fig. 48~51 surge force

λ/L ^{3.0}

2.0

Fig. 50



Fig. 51