正員	岩	下	英	嗣*	正員	伊	東	章	雄**
正員	岡	田	哲	男***	正員	大	楠		丹****
正員	高	木	幹	雄*	正員	溝	口	純	敏**

Wave Forces Acting on a Blunt Ship with Forward Speed in Oblique Sea (2nd Report)

by Hidetsugu Iwashita, MemberAkio Ito, MemberTetsuo Okada, MemberMakoto Ohkusu, MemberMikio Takaki, MemberSumitoshi Mizoguchi Member

Summary

The numerical and experimental studies on the wave forces acting on a blunt ship advancing in oblique waves were presented in the preceding report¹⁾. A 3-D panel method was mainly investigated for the numerical scheme, and it was confirmed that the 3-D panel method is useful to predict the wave forces comparatively in long waves. These studies are for the wave forces obtained by integrating the wave pressure over the ship surface, and therefore the genuine three-dimensional effect can not be observed explicitly because of the integral effect. In order to make clear the advantages of the three -dimensional calculation and grasp the mechanism of the local wave field, the investigation relating to the pressure distribution on the ship surface is necessary.

The pressure distributions on the ship surface are investigated in this paper. The numerical predictions are carried out by means of the 3-D panel method, and the results are compared with the experimental results and other numerical results based on the strip theory. From the above results, it was confirmed that the 3-D panel method predicts accurately the wave pressure on the ship surface comparatively in long waves, and overestimates the wave pressure especially on the stern part of the ship in oblique short waves. The latter justifies the phenomenon, obtained in the preceding report, that the 3-D panel method overestimates the wave exciting forces compared with the experiments. In addition to this, some investigations are also carried out for the reason why 3-D panel method overestimates the wave pressure on the ship surface.

1. 緒 言

著者らは,第1報⁰において,斜波中を航走する肥大船に 作用する波力を3次元特異点法により推定し,船体表面の 要素分割数や波核関数の計算法が計算結果に及ぼす影響な どについて詳細な検討を行なった。その結果,2次の流体

* 17	て鳥	.大	堂丁	堂	部
------	----	----	----	---	---

^{**} 石川島播磨重工業(株)技術研究所

原稿受理 平成5年1月11日 春季講演会において講演 平成5年5月19,20日 力に関しても安定した数値解を得るためには船体全体でお よそ1000分割程度の要素数が必要であることや、波核関 数の計算法の違いが最終結果に及ぼす影響は小さいことな どが明らかになった。更に、3次元特異点法による波力の 推定結果と実験値との比較から、3次元特異点法が比較的 長波長域においては有効であるものの、斜波中短波長での 波力推定に関しては実験値との差が大きく、今後その原因 について検討していく必要があることなどを指摘した。

これらの考察は、いずれも船体全体に作用する流体力と いういわゆる積分量に関するものであったが、3次元的な 計算の有効性を明らかにするためには、その手法が船体ま わりの波動現象を正確に推定したことに基づいて、積分量 としても良好な推定がなされているのか否かについて考察

^{***} 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部

^{****} 九州大学応用力学研究所

日本造船学会論文集 第173号

する必要がある。実際,細長船理論などの簡易計算法が, 積分量としての波力を比較的よい精度で推定できるもの の,その理論が船体まわりの波動場の推定に関しては有効 であるとは言えないことなどが指摘されている²⁾。

一方,船の構造設計など実用的な観点からは,船体全体 に作用する流体力はもとより,船体の各部分に作用する局 所的な外力の高精度な推定に関する要望が増えてきてい る。従って,3次元特異点法による波力推定が波動現象の 合理的な把握に基づくものであるか否かといった理論的観 点からのみならず,局部荷重の推定といった実用的な観点 からも,船体まわりの波動現象に関して検討することが必 要であると言えよう。

そこで本報告では、物理現象をより詳細な立場から考察 するために、波動現象として船体に作用する波浪変動圧を 取り上げ、3次元特異点法による数値計算と水槽試験を詳 細に実施し、3次元計算の有効性や不合理な点について考 察を行なう。

更に,第1報で今後の検討課題となっていた,斜波中短 波長域における数値計算結果と実験値との喰い違いの原因 究明に関しても,現時点までの検討結果を報告する。

なお、本論文で用いられる座標系、記号、数値計算およ び水槽試験に用いられる供試船などは、特に断わりのない 限り第1報¹⁾と同一である。

2. 波浪変動圧

2.1 3次元特異点法による数値計算

第1報同様,斜波中を航走する船の diffraction 問題を考 える。流体は非回転の理想流体とし,非定常な速度ポテン シャルφは第1報のように規格化して考える。

3次元特異点法による数値計算においては,船体表面を 有限個の平面要素に分割し,分割された各要素内で吹き出 し強さ σ が一定であるとして離散化された積分方程式,す なわち吹き出し分布に関する連立方程式を得ることができ る。これを数値的に解くことにより各要素における吹き出 し分布が求められ,これと速度ポテンシャルに関する積分 表示式を用いて各要素での速度ポテンシャルおよびその微 分値を求めることができる。ここでは,各要素上における これらの値が既に求められているものとして話を進める。

このとき、線形化された非定常な圧力は、流体の密度を ρ として次式で表せる³⁾。

 $p(x, y, z) = -\rho(i\omega_e + UV \cdot \nabla)\phi \qquad (1)$

ただし,

 $(n_1, n_2, n_3) = n$; 流体内向き法線ベクトル, $(n_4, n_5, n_6) = r \times n$, $(m_1, m_2, m_3) = -(n \cdot \nabla) V$, $(m_4, m_5, m_6) = -(n \cdot \nabla)(r \times V)$, $V = \nabla (-x + \phi_s)$, r = (x, y, z) なお,非定常な物体運動および流体運動に基づく諸量には e^{iwet}を乗じてその実部をとることが了解されているとし, その記述を省略している。

(1)式に現れる m_i は物体表面条件における定常流場の 影響を表した項であり、定常問題における線形自由表面条 件を満足する定常速度ポテンシャル ϕ_s を用いて計算され るが、今回の計算においては、 $\phi_s=0$ 、すなわち船体表面条 件における定常撹乱の影響が無視できるとして計算する。 従って、実際に計算した非定常な圧力は、 ϕ として入射波の 速度ポテンシャル ϕ_0 と diffraction ポテンシャル ϕ_7 を考 慮して

$$\frac{p}{\rho g A} = -i \frac{\tau}{\nu} \left(1 + \frac{i}{K_0 \tau} \frac{\partial}{\partial x} \right) (\phi_0 + \phi_7)$$
(2)

である。ただし、 $\tau = U\omega_e/g, \nu = U\omega_0/g, K_0 = g/U^2$ であり、 A は入射波の波振幅である。

2.2 ストリップ法による数値計算

設計で実用計算として用いられているストリップ法によ る波浪変動圧の計算には、田才⁴⁰が示した波のOrbital motionによる速度を船の平均喫水位置での値に代表さ せ、静水中で上下揺れと左右揺れをしたときの問題として 計算する方法を用いた。ここで2次元流体力としては Close-Fit 法により求められる上下揺れと左右揺れの radiation potentialを用いている。上下揺れ成分には、出 会い周波数 ω_e の代わりに波周波数 ω₀ で計算する溝口の 方法⁵⁰を用いた。なお、ここでは、以前著者の一部が指摘し た短波長域での船側での波の反射に基づく波浪変動圧成分 の修正は行なっていない⁶⁰。

2.3 水槽試験

試験方法

斜波中を拘束された船体に働く波浪変動圧を計測する水 槽試験を,IHI運動性能水槽(長さ70m×幅30m×深さ3 m)で行なった。今回の実験に用いた肥大船供試模型は,第 1報と同じ長さ3.14mの木製模型船である。この供試船 の主要目をTable1に示す。圧力は船首部のord.9,船体中 央部のord.5,船尾部のord.2の右舷の船体横断面の各位 置に圧力計を埋め込み,全体で26点計測した。左舷の圧力 については,波向きを変えて計測した。

Fig.1 に圧力計の取付位置を示す。圧力計の取付け位置 は, Fig.1 に示す取付け角 θ で表現し,右舷水線面上が -90 deg.,船体中心線上が 0 deg.,左舷水線面上が 90 deg.

Table 1 Principal dimensions of a model

Lpp	(m)	3.1
B	(m)	0.61
d	(m)	0.2
L/B		5.1
B/d		3.1
Сь		0.81



Fig.1 Location of the measured points of the wave pressure

に対応する。従って、波向き χ =90 deg.の場合、右舷水線 面上-90 deg.が波上側となる。圧力計としては、受圧面が 6 mm とやや大きいものの、温度ドリフトが小さく高感度 である Druck 社製 PDCR 42 を用いている。また、波は造 波機前方約 10 m の位置での定置波高、及び模型船による 反射がなるべく入らない位置で出会い波高を計測した。 試験条件

通常,肥大船が波浪中を航行するときの船速は F_n =0.1 程度であるが,第1報と同様に前進速度影響を明確にする 意味で,船速 F_n =0.2 で実験を行なった。また,入射波の波 長は短波長域である λ/L =0.3,0.5 について行い,各波長に 対して波向き χ を30度ごとに変化させて波浪変動圧を計 測している。この時用いた入射波の波高は、 λ/L =0.5 につ いては63 mm (L/50), λ/L =0.3 については非線形波にな らないようにこれより小さくし、38 mm とした。計測され た圧力は調和解析により応答特性を求めているが、水線面 付近で調和解析の難しい部分については、時系列の+Peak と平水中航走時の平均値の差より解析している。

2.4 数値計算および水槽試験結果の比較

第1報では、船体表面要素分割数として N=396,994,1 592の3種類を用いた計算を行なった。その結果、斜波中短 波長域においては、最も分割数の多い N=1592 によって も波浪強制力に関する実験結果との相違は大きく、その原 因として要素分割数とは異なる他の要因が考えられること



Fig. 2 Panel distribution on the ship surface $(N=1\ 068)$

を示唆した。本論文で行なう波浪変動圧に関する数値計算 結果と実験結果との比較においても同様の相違が予想され るため、今回の計算においては船体表面の要素分割を変更 した計算を行なってみることにした。

Fig.2 が、今回の波浪変動圧の計算に用いた船体表面要 素分割の様子を示している。要素数は船体全体でN=1068要素となっている。これは、第1報のN=994分割に wall side 部分を付加するなどの若干の修正を加えたものであ る。特に船尾近傍では、この wall side 部分の付加によっ て、実際の船型とは若干異なった船型に対する計算を行な うことになる。なお、3次元特異点法による数値計算のう ち Green 関数の計算については、Rankine 部分を Webster の方法で、波動部を各要素の重心点を代表点としてモ ノポール的に計算する方法で行なっている。

Figs.3,4に,今回の数値計算および水槽試験による船体 に働く波浪変動圧の結果を示している。Fig.3が $\lambda/L=0.3$ の結果に,Fig.4が $\lambda/L=0.5$ の結果に対応しており,各図 には $\chi=30$ deg.おきの波向きに対する ord.2, ord.5, ord.9における変動圧の結果が示されている。各図中には, 3次元特異点法による結果,2次元流体力を Close-fit 法で 求めたストリップ法の結果,及び実験結果を示してある。 ストリップ法による数値計算では実船の片舷を 30~40 分 割して2次元流体力を求めている。なお,図の縦軸は規格 化された変動圧力(2)式の絶対値を示しており,横軸は 2.3節で記したように船体表面上の任意の点が船体中心線 となす角 θ で表わしている。

 $\lambda/L=0.3$ の短波長域については、既に第1報の Fig.4,6, 8 で示したように、3次元特異点法による縦方向の波浪強 制力と水槽試験により得られたそれとは特に斜め追い波状 態($\chi=60 \deg$.近傍)で大きく異なる。Figs.3,4の波浪変 動圧に関する計算と実験の比較を検討することにより、船 体表面上圧力分布のどの部分に関する計算と実験との喰い 違いがそうした現象に顕著に関係しているのかについて詳 細を知ることができる。斜め追い波中に関して、Fig.3に示 した各 ordinate ごとの計算結果と実験結果との比較を見 ると、3次元特異点法による計算結果は全体的に実験値と 良好な一致を示すものの、 $\chi=60 \deg$.の ord.2 あたりで計 算と実験との差がきくなっていることが判る。特に船底部 においては、3次元特異点法による結果は実験値の約3倍

日本造船学会論文集 第173号



Fig. 3 Wave pressure distributions on the ship surface in oblique waves $[F_n=0.2, \lambda/L=0.3, (a): ord. 2, (b): ord. 5, (c): ord. 9]$



Fig. 4 Wave pressure distributions on the ship surface in oblique waves $[F_n=0.2, \lambda/L=0.5, (a): ord. 2, (b): ord. 5, (c): ord. 9]$

199

日本造船学会論文集 第173号

の大きさの変動圧となっており、これに起因して波浪強制 力の値も大きめに算定されてしまうものと考えられる。よ って、波浪強制力レベルで計算と実験に見られた喰い違い が、船尾近傍における波浪変動圧の計算と実験との相違に 起因したものであることが推察できる。同時にまた、この 結果は第1報で Fig.14 に示した計算による船体表面上吹 き出し分布が船尾付近で異常に大きくなる現象とも合致し ている。

ord.9に着目してみると、3次元特異点法の結果は追い 波中で実験結果をよく説明しているものの, 向い波中の船 側部分では実験値より小さな値しか算定しないことが判 る。特に正面向い波中で両者の差が著しい。3次元特異点 法の計算では、自由表面および船体表面条件における定常 非一様な流場の影響を無視した計算を行なっているが、実 際には肥大船を Fn=0.2 という比較的速い速度で曳航して いるため、定常流場は大きく撹乱され船首部で水位が大き く下がるものと予想される。実際、今回の実験に用いた肥 大船を静水中で Fn=0.2 なる速度で曳航したときの船首波 の様子を示した Photo 1 では, ord.9 に設置した圧力計の うち水面から2つ目までの圧力計が水面から露出するよう な船首波が発生している模様が窺える。こうした定常撹乱 による船首波の影響などが、数値計算ではまったく考慮さ れていないことに起因して、ord.9の船側部における変動 圧が計算と実験とで大きく喰い違っているものと考えられ る。

ストリップ法による変動圧の推定では、正面向い波中の 船底部分の圧力が高くなる傾向にあることが既に著者の一 部⁶⁾によって指摘されているが、今回の結果からこの傾向 が斜波中において同様に現われることが判る。また、スト リップ法による計算結果は、斜波中波下側で実験値より大 きくなる傾向があり、また全体的に3次元特異点法の結果 よりも実験値との一致度は悪い。このことは、変動圧など 船体表面上の波動場の推定に関しては、3次元的な計算が 必要であることを示している。



水面近傍の変動圧に着目してみると, ord.5 など平行部

Photo 1 Picture of the steady wave near the stem

で船側部分の変動圧が直線的に変化する部分で計算と実験 がよく一致すること,また ord.9 など船首部では船首波の 影響で水位が大きく下がり変動圧は直線的に変化せず頭打 ちになることなどが判る。前述のように,船首波の影響が 考慮されていないことによって3次元特異点法の結果は実 験値より大きな変動圧を推定している。

Fig.4の $\lambda/L=0.5$ の結果について見ると、各 ordinate に対する3次元特異点法による変動圧の推定結果は, Fig.3の λ/L=0.3 の場合に比べて全体的に実験結果とよ く一致している。入射波の波長が比較的長い場合に,特異 点法が実験結果をよく説明することは、第1報の波浪強制 力に関する結果においても既に示されているが、今回の波 浪変動圧レベルでの計算と実験との比較においても同様の 結論が示されたことになる。ord.2 については, χ=30 deg. で3次元特異点法の結果が実験値よりやや大きくなるよう であるが、これは第1報の波浪強制力の結果(Fig.6)にお いて x=30 deg.の計算値が実験値より若干大きくなるこ とと対応していると考えられる。また, ord.9 において3次 元特異点法による結果が船側部分で実験値よりも小さな値 となっている。これらの現象は、先の $\lambda/L=0.3$ で見られた 船首定常撹乱波による現象と定量的には異なるものの、定 性的には同じ現象であると思われる。

以上,斜波中で運動を拘束されて航走する船に働く波浪 変動圧に関して、3次元特異点法による推定と水槽試験に よる結果とを詳細に比較することで,波浪強制力のような 全体力の比較では検討できなかった斜波中短波長域におけ る船尾付近の大きな特異点の問題や船首部の定常撹乱の影 響などについて明らかにすることができた。また,船首部 および船側部の波の反射や前進速度影響など,流体力の3 次元影響を取り入れることのできる3次元特異点法による 計算は,ストリップ法に比べて実験結果をよく説明するこ とが示された。ただ,第1報および今回の波浪変動圧の分 布を通じて,斜波中短波長域での流体力の計算方法,船首 部における定常撹乱の影響の取り扱い方などについては, 今後さらに検討を行なう必要がある。

3. 斜波中短波長域での波力推定の問題点の検討

前述のように,第1報においては斜波中短波長域におい て,縦方向に作用する波浪強制力や波浪中抵抗増加などの 定常流体力に関して数値計算結果と実験結果とに無視でき ない相違があることが示された。この現象は,前節の波浪 変動圧に関する数値計算と実験結果との比較にも現われて いる。特に船尾付近での圧力分布に大きな差がみられ,第 1報で見られた強制力に関する計算と実験との相違はこの 船尾付近の圧力分布の相違に起因しているものと察せられ る。

第1報においては、これら計算と実験との喰い違いの原 因について検討すべきであることを言及しており、その後



Fig. 5 Wave exciting forces and moment in oblique waves

 $[F_n=0.2, \lambda/L=0.3, (a) : surge, (b) : heave, (c) : pitch]$

いくつかの検討を行なってみた。そこで、本論文では現段 階までの検討により得られた結果について報告しておくこ とにする。

3.1 wall side の影響

前節に記したように、今回の波浪変動圧の計算には、 wall side を付加した N=1068の要素分割を用いている。 従って、この要素分割を用いて更に波浪強制力を求め、第 1報における N=994 分割の結果と比較することによっ て、水面近傍を wall side 化した影響を見ることができる。 Fig.5 はその結果を示している。図中、太線が N=994 要素 による第1報の結果を、黒丸が N=1068の wall side 要素 による今回の計算結果を示している。実験結果と比較する と、今回の wall side 要素を用いた計算結果は第1報の結 果と比べて実験値をより良く説明していることが判る。こ のように、縦方向に作用する波浪強制力は水面近傍の船型 を wall side 化することによって、少なくとも実験値に近 い値を与える。一方、ここには示していない横方向に作用 する波浪強制力に関しては wall side 化による影響はほと んどなかった。

前進速度のない場合には、このような薄い wall side 部 分を付加することによる影響は極めて小さく、しかも wall side を付加しなくても計算結果と実験結果との一致は良 好である。前進速度がある場合に wall side 部分を付加す る必然性は、強制力の算定時に用いられる Tuck の定理の 立脚条件以外には考えられないが、第1報および今回の計 算においては Tuck の定理は用いずに強制力を算定して いる。従って、解析的な観点からの必然性は明白でない。 ただ、2次元問題の計算などにおいてこれまでに得られた



Fig. 6 Panel distribution on the half-submerged prolate spheroid (N=640)

経験に基づけば,特に水面と船体表面とのなす角度が大きい船尾近傍において,数値計算の観点から船型を wall side 化して計算することが望ましいと思われる。

3.2 船型の影響

斜波中短波長域において,波浪強制力や定常流体力が大 きな値をとり実験結果と異なってくる現象が,船型が肥大 であることなどに起因しているのか否かを確かめるため に,異なる船型に対する数値計算を実施してみた。新たな 計算に用いた船型は,その船型が

$$\frac{x^2}{(L/2)^2} + \frac{y^2 + z^2}{(B/2)^2} = 1$$
(3)

で表わせる半没回転楕円体である。ただし, L, B はそれぞ れ楕円体の船長および船幅を表わし, L/B は第1報および 今回の波浪変動圧の計算に用いられた実船とほぼ同じ L/B=5 である。

数値計算の際の船体表面の要素分割は,船長方向に40分割,ガース方向に16分割の合計 N=640分割である。Fig.6 は要素分割の様子を示している。

日本造船学会論文集 第173号



Fig. 7 Wave exciting forces for surge in oblique waves $[(a): \lambda/L=0.3, (b): \lambda/L=0.4, (c): \lambda/L=0.5]$



Fig. 8 Wave exciting forces for heave in oblique waves $[(a): \lambda/L=0.3, (b): \lambda/L=0.4, (c): \lambda/L=0.5]$

Figs.7~9が、この半没回転楕円体船型に対する縦方向 の波浪強制力の計算結果である。計算は $F_n=0.2, \lambda/L=0.3$, 0.4, 0.5 関して行なっている。図中、太線が、(1)の式の圧 力に現われる定常撹乱の影響を無視した場合の波浪強制 力、すなわち圧力として(2)式を用いた場合の波浪強制力 を表わしている。これらの計算結果から、入射波の波長が 短くなるにつれて斜波中短波長域での強制力が徐々に大き くなっていくことが判る。この現象は定性的、定量的に第 1報で示した肥大船型の場合と同じであり、斜波中短波長 域で強制力が実験値と比べて大きくなる現象が船型に依存 せずに起こることが検証できる。

3.3 船体表面上での定常撹乱の影響

船体まわりの非定常流場は、本来、船が静水中を航走す る場合の船体まわりの流場である定常流場と干渉してい る。特に船型が船首尾などに肥大部を有する場合にはその 影響は大きくなると考えられる。定常流場の非定常流場に 及ぼす影響は、自由表面条件と船体表面条件に現われるが、 一般には船体表面条件を通しての影響が大きいと言われて



Fig. 9 Wave exciting moments for pitch in oblique waves

 $[(a): \lambda/L=0.3, (b): \lambda/L=0.4, (c): \lambda/L=0.5]$

いるⁿ。diffraction 問題では,船体表面条件に定常流場の影響,すなわち m-ベクトルの影響は直接現われないが,(1) 式のように強制力を求める折りの非定常圧力の算定にその 影響が現われてくる。そこで,その影響がどの程度のもの であるかを調べるための数値計算を半没回転楕円体に関し て行なってみた。

Figs.7~9において,図中点線で示された結果は,m-ベ クトルとして(3)式で表わされる回転楕円体が無限流体中 を定常前進運動する場合のものを用いたときの強制力であ る。この場合,強制力の算定はTuckの定理を用いて

$$\frac{E_j}{\rho g A} = i \frac{\tau}{\nu} \iint_{S_H} \left(n_j + \frac{i}{K_0 \tau} m_j \right) (\phi_0 + \phi_7) dS \qquad (4)$$

のように計算している。従って m-ベクトルは, 剛壁の自由 表面条件を満足する定常速度ポテンシャルを用いて算定さ れたことになる。具体的な計算は解析解を用いて行なわれ る⁹⁾。

計算結果から、入射波の波長が短くなるほど m-ベクト ルの影響は大きくなることが判るが、全体の強制力に対す る相対的な影響は極めて小さい。従って、斜波中短波長域 における m-ベクトル、すなわち船体表面上の定常撹乱の 影響は極めて小さいことが結論できる。

ただ、ここで示した m-ベクトルの影響は、あくまでも波 浪強制力という船体に作用する全体力に関する影響であ り、たとえば波浪変動圧などに関して m-ベクトルがどの ような影響を与えるかなどについては更に研究してみる必 要がある。また、2.4 節で示した、船首部分で計算と実験に よる波浪変動圧が異なる現象の原因となっていると思われ る,自由表面条件における定常撹乱の影響などについても その影響を考慮できる理論計算法による数値計算を実施し てその事実を検証してみる必要があろう。

3.4 irregular frequency の影響

3次元特異点法による波浪強制力や定常流体力が,斜波 中短波長域において大きな値をとる原因の一つとして irregular frequency が考えられる。前進速度を有する3次元非 定常造波問題において, irregular frequency がどのような 条件時にどのような現象となって現われるのかについては 現在のところまったく不明であるが, irregular frequency が数学的には積分方程式の係数マトリックスの行列式がゼ ロになる場合であることを考えると,数値的調査により irregular frequency なる現象が起こっているか否かを調べ ることができるであろう。

そこで、前述の半没回転楕円体に対する波浪強制力の計 算を行なった際に、同時に係数マトリックスの行列式の値 も出力し、作図してみた。Figs.10,11 が $\lambda/L=0.3,0.5$ に対 するその結果である。それぞれの図には、2種類の行列式 の値が出会い角 χ ベースにプロットされている。これは境 界値問題を解く際に、船の左右対称性を考慮して問題を対 称問題と反対称問題とに分けて取り扱うことに対応してい る。

図から判るように行列式の値は、係数マトリックスの各 要素の絶対値の要素数乗に関係するため、船体表面の要素 分割数が大きくなると非常に小さな値をとるが、 χ ベース の変化を見ると r=1/4 近傍で変化が見られるものの全体 としては特異な現象は見受けられない。更に、 $\lambda/L=0.3$ と

日本造船学会論文集 第173 号



Fig. 10 Distributions of the determinant of the integral equations $[F_n=0.2, \lambda/L=0.3, (a):$ symmetric component, (b): antisymmetric component]



Fig. 11 Distributions of the determinant of the integral equations $[F_n=0.2, \lambda/L=0.5, (a):$ symmetric component, (b): antisymmetric component]

NII-Electronic Library Service

 $\lambda/L=0.5$ の場合を比較しても定性的,定量的にほとんど相 違がない。第1報の肥大船に対する強制力の計算と実験と の比較では、 $\lambda/L=0.3$ では両者の差が顕著であったが λ/L =0.5 では、両者は比較的よく一致していた。今回の計算で 行列式の値に関して $\lambda/L=0.3$ と0.5 とで差がないことか ら、 $\lambda/L=0.3$ における計算結果と実験結果の喰い違いが irregular frequency に関係するものでないことが推察され る。

また、問題となっている $\lambda/L=0.3, \chi=60$ deg.における 積分方程式のマトリックスの各係数は、波浪強制力に関す る計算と実験との一致度のよい $\lambda/L=1.0, \chi=90$ deg.の場 合とほとんど同じである。これは、マトリックスの係数を 構成する Green 関数の値を決定する 2 つの無次元値 $K_{0,r}$ がほとんど同一の値をとることに起因している。従って、 前者で irregular frequency のような現象が起こるのであ れば、後者でも同様の現象が起こるはずである。この事実 から考えても、irregular frequency なる現象が、問題点の 原因となっている可能性は極めてうすいと言える。

3.5 要素分割の分解能の影響

第1報においては、船体表面の要素分割数を変化させて 要素分割数が最終的な数値解にどのような影響をもたらす かについて検討した。その結果、N=994 分割とN=1592 分割とでは、得られる波浪強制力に関してほとんど差がな く、N=994 程度の分割においてあたかも数値解が収束し ているかのように見えることなどが示された。しかし、両 分割数における船長方向の分割数についてみると、それぞ れ 34 分割、55 分割とそれほど大きな差はなく、N=994 分 割が収束解を得るのに十分な分割数であるとは必ずしも言 えるわけではない。より多くの要素分割を行なえば、著し く異なる数値解が得られる可能性がある。

そこで、今回は第1報で用いた要素分割数が、波長の短い波動を捕らえるのに十分であったか否かなど、要素分割のもつ波長の分解能に関してより詳細な検証を行なってみることにした。

要素分割数のもつ分解能に関する計算は下記の要領で実施した。問題を簡潔にするために、細長船理論のように特異点が *x* 軸水面下にある軸上に分布しているものと考える。このとき吹き出し強さは、入射波の変動と同様に

 $\sigma(x', 0, z') = e^{kz' - iKx'\cos x} (-L/2 \le x' \le L/2)$ (5) で変動するとする。ここで K は入射波の波数である。この とき,流体の速度ポテンシャルおよびその流速が,細長船 理論と同様に次式で表わせるものとする。

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \nabla \end{bmatrix} \phi(x, y, z) = -\int_{-L/2}^{L/2} \sigma(x', 0, z') \begin{bmatrix} 1 \\ \nabla \end{bmatrix} \times G(x, y, z; x', 0, z') dx'$$
(6)

ただし,計算の中では Green 関数の Rankine 部分は省略 し,波動部のみを計算する。

(5)式で表わされる吹き出し分布を, 第1報の N=994

分割および今回の計算に用いた N=1068 分割の船長方向 の分割数に相当する分割数, すなわち N=34 分割に等分割 し,分割された要素上で吹き出し強さが一定であるとして, 適当な field point において(6)式で表わされる速度ポテ ンシャルや流速を計算する。こうした計算は,実際の3次 元特異点法による計算では、たとえば、左舷の水面に接し ている有限個の要素によって誘導される船体表面の任意の 点での速度ポテンシャルや流速を計算することに相当す る。積分方程式の左辺のマトリックス係数の計算を行なっ ていると考えてもよいであろう。このとき、3次元的な計 算では field point は必ずしも規則的に分布しているとは 限らないから, field point については非常に細かく計算し てみる必要がある。この計算により、field point において 連続的な速度ポテンシャルや流速を得るために、どの程度 の吹き出し分布の分割が必要であるかが判明することにな る。

数値計算にあたっては、実船での計算条件に対応させて 各パラメータの値を決定している。船型としては、本論文 で用いている供試船を想定している。まず、計算条件とし ては、波浪強制力などで計算と実験とで相違の大きい F_n = 0.2、 λ/L =0.3、 χ =60 deg.、および計算と実験とが比較的よ く一致している波長の長い場合 F_n =0.2、 λ/L =1.0、 χ =60 deg.を採用している。また、吹き出し点および field point の深さは、波長の短い波の影響が顕著に現われるであろう z=z'=-d/25(dは供試船の吃水)に設定している。field point の y の値としては、実際の 3 次元特異点法の計算で、 左舷にある吹き出し点から左舷を計算する場合に相当する y=0、および左舷にある吹き出し点から右舷を計算する場 合に相当する y=B の 2 つの値を考える。

Figs.12, 13 は, y=0の場合の計算結果を示している。 Fig.12 が $\lambda/L=0.3$ の場合, Fig.13 が $\lambda/L=1.0$ の場合であ る。各図には, Green 関数およびその微分値の値, 吹き出 しの分割が N=34 分割の場合の速度ポテンシャルおよび その微分値の値, 更に吹き出しの分割が N=68 分割の場合 の速度ポテンシャルおよびその微分値の値が示されてい る。field point の計算点の密度は船長 L に対して 200 点で ある。

Green 関数自体には、それほど波長の短い波は存在しないが、原点近傍でインパルス的な変動が見られる。これは、吹き出し点および field point の深度が非常に浅いことに起因した Green 関数の波動部の特異性と考えられる。 Figs.12,13 は、吹き出し分布の船長方向の分割が荒い場合には、このインパルス的に変動する Green 関数の値が各分割要素間で互いに打ち消し合うことなく残存してしまうことを示している。分割を増やしていくと各分割要素間での打ち消し合いが行なわれ、速度ポテンシャルやその微分値における細かな振動はなくなっていく。実際の3次元特異点法による計算でもこのような現象が起こっているはずで

日本造船学会論文集 第173号



(a): Green function and its derivatives



(b) : Potential and its derivatives ($\Delta x' = L/34$, $\Delta x = L/200$)





Fig. 12 Potential and its derivatives due to the discrete source distribution $[F_n=0.2, \lambda/L=0.3, \chi=60 \text{ deg.}, y'=0, z'=$ -d/25, y=0, z=-d/25]



(b) : Potential and its derivatives ($\Delta x' = L/34$, $\Delta x = L/200$)



(c) : Potential and its derivatives ($\Delta x' = L/68$, $\Delta x = L/200$)

Fig. 13 Potential and its derivatives due to the discrete source distribution

 $[F_n=0.2, \lambda/L=1.0, \chi=60 \text{ deg.}, y'=0, z'=-d/25, y=0, z=-d/25]$

あるから,分割が荒い場合には,細かな振動の頂や底など 非常にばらついた点で境界条件が満足されることになり, 結果として船体表面の分割の仕方や分割数を少し変えるこ とにより最終的に得られる流体力がばらついてしまうこと になる。このような事態を避けるためには,Green 関数に 見られるインパルス的な局部波の波長を十分に分解するだ けの分割数が必要になることが判る。船長方向に 34 分割し た程度では,必ずしも十分であるとは言えない。

入射波の波長という観点から Fig.12 と Fig.13 を比較 すると、このような現象が入射波の波長に関係せずに起こ ることが判る。これは、前述の現象が Green 関数の進行波 でなく局部波の特異性に関係することを考えれば当然のこ とである。従って、この現象が、第1報における短波長域 で波浪強制力に関する計算と実験が一致しない現象を説明



(a): Green function and its derivatives



(b) : Potential and its derivatives ($\Delta x' = L/34$, $\Delta x = L/200$)

Fig. 14 Potential and its derivatives due to the discrete source distribution $[F_n=0.2, \lambda/L=0.3, \chi=60 \text{ deg.}, y'=0, z'=$ -d/25, y=B, z=-d/25] しているとは言えない。

Figs.14, 15 には y=Bの場合の計算結果を示している。 この場合,吹き出し点と field point との距離が大きくなる ため,Green 関数自体には Figs.12,13 で見られたような インパルス的な変動は見られない。波下側に見られる波が 波長の短い k_1 波を表わしているが,船長と比較してそれほ ど波長が短いとは言えない。そのことは、図中の速度ポテ ンシャルやその微分値の値が、N=34分割でも十分になめ らかであることからも判る。従って、N=34分割という分 割数は、これらの k_1 波を取り扱うのに十分な分解能を有し ていると言える。また、入射波の波長による相違も見受け られない。よって、この計算結果からも短波長域で波浪強 制力に関する計算と実験が一致しない現象の原因は判らな い。







(b) : Potntial and its derivatives $(\Delta x' = L/34, \Delta x = L/200)$

Fig. 15 Potential and its derivatives due to the discrete source distribution

 $[F_n=0.2, \lambda/L=1.0, \chi=60 \text{ deg.}, y'=0, z'= -d/25, y=B, z=-d/25]$

以上の,要素分割の有する波長の分解能に関する数値計 算により,第1報および本論文で取り扱っている程度の波 長域に関しては,波長の短い進行波である & 波の波長を分 解するのに船長方向 34 分割程度の分割数は十分であるこ とが判明した。むしろ問題となるのは,吹き出し点と field point が水面近くで接近したときに Green 関数に現われる インパルス的な局部波であり,この波動を精度よく取り扱 うためには船長方向 34 分割の分割では不十分であること も判った。しかし,こうした局部波は入射波の波長に関係 することなく現われるため,我々の問題としている波浪強 制力の短波長域での計算と実験との喰い違いの原因に対し て,所望の結論を得たとは言えない。さらなる検討が必要 である。

4. 結 言

本論文では、斜波中を航走する肥大船に働く波浪変動圧 に関して、3次元特異点法およびストリップ法に基づく数 値計算、並びに詳細な水槽試験を行い、3次元特異点法に よる波浪変動圧推定の有効性や問題点などについて検討し た。更に、第1報で検討課題となっていた波浪強制力に関 する計算と実験との喰い違いの原因究明に関しても、現在 までに行なった検討結果を報告した。

その結果、次の結論を得た。

- 3次元特異点法により推定された波浪変動圧と水槽 試験により得られたそれとを比較検討した結果,入 射波の波長が λ/L=0.5 程度であれば 3 次元特異点 法は、ストリップ法などに比べて非常によい精度で 実験値を説明することが判った。
- 2) λ/L=0.3の短波長域では、3次元特異点法は斜め追い波状態時(x=60 deg.)に船尾近傍の波浪変動圧を大きめに推定してしまうことが判った。この事実は、第1報で示された、3次元特異点法が短波長斜め追い波中で波浪強制力を実験値と比べて大き目に推定するという事実や、船尾付近の吹き出し分布の値が異常に大きくなるという事実を変動圧力レベルで裏付けるものである。
- 3) 正面向い波中の船首部分の波浪変動圧に関して、3 次元特異点法による結果と実験値とに無視できない 相違があることが判った。これは、今回の3次元特 異点法による数値計算に定常流場の撹乱影響がまっ たく取り入れられていないことに起因するものと考 えられる。

- 4) ストリップ法による肥大船の短波長域における波浪 変動圧の推定結果は、斜波中において船底部分およ び波下側で実験値よりも大きくなることが判った。 実験値との全体的な一致度も良好とは言えない。
- 5) 3次元特異点法が、短波長斜め追い波中で波浪強制 力や波浪変動圧を大きめに算定する原因として、 wall side の影響,船型の影響,船体表面上での定常 撹乱の影響,irregular frequency の影響,要素分割 の分解能の影響などについて検討した結果を示し た。その結果,これらが上記問題の直接的な原因で はないことが判明した。更なる研究が必要である。

最後に、本研究の遂行にあたり多大な御援助をいただい た石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部高度解析技術部 笹島 洋部長,技術研究所 藤井克哉副所長,堤 孝行部長, および実験,解析に御協力いただいた船舶海洋開発部の 方々に心より感謝の意を表わします。なお、本研究の数値 計算は,広島大学工学部エンジニアリングシステム(船舶・ 海洋)教室 EWS HP 730, IHI EWS HP 720 を用いて行な ったことを付記し,関係各位に謝意を表わします。

参考文献

- 岩下英嗣,伊東章雄,岡田哲男,大楠 丹,高木幹雄, 溝口純敏:斜波中を航行する肥大船に働く波力につ いて,日本造船学会論文集,第171号(1992), pp. 109 -123.
- 2) 大楠 丹,岩下英嗣:波浪中を航走する船のつくる 非定常波紋について,西部造船会々報,No.73 (1987), pp.1-18.
- Timman, R., Newman, J. N.: The Coupled Damping Coefficients of a Symmetric Ship, J. S. R., Vol. 5, No. 4 (1962), pp. 34~55.
- 田才福造:Beam Sea Condition にある船体に働く 変動圧,西部造船会々報, No.35 (1967).
- 5) 溝口純敏,渡辺 厳:ストリップ法改良計算法,波 浪変動圧,運動性能委員会,第一回シンポジウム (1984), pp.251-256.
- 伊東章雄, 溝口純敏:肥大船の短波長域における波 浪変動圧について,日本造船学会論文集,第166号, pp.251-258.
- Sclavounos, P. D., Nakos, D. E.: Stability Analysis of Panel method for Free-surface Flow with Forward Speed, 17th Symp. on naval hydrodynamics. The hague (1988).
- 岩下英嗣, 大楠 丹:特異点法による波浪中を航走 する船に作用する流体力の研究, 日本造般学会論文 集, 第 166 号, pp.187-205.