大型肥大船の横波中抵抗増加に関する実験的研究

正会員 吉 田 尚 史*
正会員 高 岸 憲 璽*

正会員 折 原 秀 夫*

Experimental Study on Added Resistance of Very Large Blunt Ship Running in Beam Seas

by Hisafumi Yoshida, *Member* Hideo Orihara, *Member*
Kenji Takagishi, *Member*

Summary

Regarding the added resistance in waves, research on head waves was mainly performed for a long time, mainly because of the restrictions of test facility which allows only test in head waves, and also it has been considered that heaving and pitching motion seems to be dominant and the influence of lateral motion is relatively small. Recently, Valanto and Hong⁶⁾ reported that each motion of six degrees affect great on added resistance in oblique waves based on the test results. Therefore, it seems necessary to investigate the influence of ship motion of 6 degrees of freedom on the added resistance in waves again.

In this paper, measurement of ship motions and added resistance for large blunt ship in oblique and beam waves were carried out and experimentally showed that rolling motion has a very large influence on the resistance increase in waves in the vicinity of its natural period. In addition, qualitative consideration will be given to the mechanism that the added resistance in the beam wave increases by the influence of the rolling motion.

1. 結 言

船舶が波浪中を航行する際に平水中に比べて抵抗が増加する現象は、波浪中抵抗増加として広く知られている。波浪中抵抗増加は、船体による波の反射や波の中での船体の 6 自由度運動が密接に関係している現象であるが、斜波中での現象を実験的に把握するためには角水槽での実験が必要であるため、細田¹⁾の先駆的研究に始まり、丸尾・岩瀬²⁾、藤井・高橋³⁾、高橋⁴⁾らによる斜波中試験結果と計算とを比較した研究事例はあったものの、大半は長水槽での正面向波中における試験のみを実施した研究であった。そのため、波浪中抵抗増加における船体運動の影響については、主に Heave, Pitch についてのみ調べられており、他の運動の影響については明らかでなかった。細田の研究では、Series60 船型について各運動成分が波浪中抵抗増加に及ぼす影響を調べて、Heave, Pitch の寄与が支配的で横運動の影響は小さいと結論しているが、全ての船型に対して同様の結果が得られるかどうかは明らかでない。また升也⁵⁾は入射波長が船長と同程度との仮定の下で波浪中抵抗増加、定常力の近似計算

式を導出し、横運動の寄与は縦運動に比べて高次になることから波浪中抵抗増加への横運動の寄与は小さいことを示したが、波長が短い場合にもこの結果が成立するかどうかは明確にされていない。近年、Valanto and Hong⁶⁾は HSVA の長水槽にて斜波中試験を実施する装置を考案し、クルーズ客船の正面向波から真追波まで 7 方向の波入射角における波浪中試験を実施し、斜波中における波浪中抵抗増加の応答関数に 6 方向の各船体運動の影響が見られることを明らかにした。Valanto and Hong⁶⁾によると、正面から斜向波では Pitch ピークが波浪中抵抗増加に及ぼす影響が強く認められるが、一方で横波状態では Roll/Sway の影響が大きいという結果が報告されている。このことから、船型や載荷条件によっては Heave, Pitch 以外の運動が波浪中抵抗増加に影響する可能性があると考えられる。

本論文では、横波中で大角度横揺する大型肥大船の波浪中抵抗増加について水槽試験に基づいた調査を行うとともに、横波中における波浪中抵抗増加の発生メカニズムについて考察を行った。

2. 水槽試験

2.1 供試模型船

試験には、タンカー船型(L/B=5.6, B/d=2.9)の L=2.99m 模型船(ウレタン製)を使用した。横慣動半径 $k_{xx} = 0.4B$,

* ジャパン マリンユナイテッド (株)

$GM/B = 0.15$ と設定した。またビルジキールの影響を見るため、標準サイズのビルジキールの他、幅を+10%、+32%とした3種類のビルジキールを作成し、取り替えて試験を行えるようにした。

2.2 使用試験水槽

水槽試験は、ジャパン マリンユナイテッド (株) 運動性能水槽において実施した⁷⁾。本水槽は長さ 70m、幅 30m、深さ 3m で、南北方向に走行する主曳引車下に東西方向に走行する副曳引車が設置されている。副曳引車にはターンテーブルが設置されており、3者を組み合わせることにより、水槽内を任意方向に模型船を曳航することが可能になっている。また水槽東側、北側に長さ 10m のフラップ式造波機がそれぞれ7基、3基設置されており、模型船の曳航方向を操作することで任意の波向に対する波浪中試験が実施できる。また水槽試験における座標系を Fig.2 に示す通り。真追波状態を波向 $\chi=0\text{deg}$ とし、反時計回りに波入射角を測る。

試験においては、模型船は副曳引車に搭載された6自由度運動計測装置に取り付けられて曳航される(Fig.3)。曳航用のロッドと船体の間には3分力計が取り付けられており、船体に働く、前後・左右力ならびに回頭モーメントが計測される。

Fig. 1 Seakeeping and maneuvering tank⁶⁾.

Fig. 2 Coordinate systems.

Fig.3 Six-degree motion measurement system.

2.3 試験内容

本研究では、以下の3種類の水槽試験を実施した。いずれの試験においても、船速はフルード数 $F_n = 0.139$ 、入射波高 $H_w = 2\zeta_A = 0.027\text{m}$ ($H_w/L \approx 1/100$)とした。

- 1) 斜波中波長変更試験：波入射角 $\chi=120, 90, 60(\text{deg.})$ において、波長船長比 $\lambda/L = 0.6 \sim 2.0$ として船体運動ならびに波浪中抵抗増加を計測する。
- 2) ビルジキール変更試験：横波状態($\chi=90\text{deg.}$)において、標準サイズのビルジキール BK①の他、幅を+10%した BK②、+32%した BK③に取り換えて船体運動および波浪中抵抗増加の計測を実施する。
- 3) 横揺固有周期変更試験：船体中央に配置したウェイトの船体中心船からの水平距離を変更することにより、横揺固有周期を波長船長比 $\lambda/L \approx 1.2$ から $\lambda/L \approx 1.0$ ならびに1.4として、横波状態($\chi=90\text{deg.}$)における船体運動および波浪中抵抗増加の計測を実施する。

Fig.4 に、横波中の試験状態の一例を示す。このように、入射波長によっては横波中で大角度横揺を行うことが確認された。

Fig.4 Typical snapshot of towing test in beam waves. ($\lambda/L=1.2$)

3. 試験結果

3.1 斜波中波長変更試験

波入射角 $\chi=120, 90, 60(\text{deg.})$ における横揺角振幅ならびに

波浪中抵抗増加の計測結果を Fig.5, Fig.6, Fig.7 にそれぞれ示す. 横揺角振幅は $\eta_4/k\zeta_A$, (k : 波数), 波浪中抵抗増加は $K_{aw} = R_{aw}/\rho g H_w^2 (B^2/L)$ で無次元化しており, これはこの後の試験結果においても同様である. また図中 Cal. で示したものは文献 8), 9) 記載の溝口一渡邊, 伊東の改良 NSM 法定式化に基づくプログラムによる計算値である.

Fig.5, Fig.6 より, 波入射角 $\chi=120, 90(\text{deg.})$ において横揺のピークとなる λ/L において波浪中抵抗増加もピークが現れており, 横揺振幅が波浪中抵抗増加に及ぼす影響が確認できる. Fig.7 の波入射角 $\chi=60(\text{deg.})$ においては Fig.5, Fig.6 に比べると明確ではないが, 横揺ピークよりも短波長側で波浪中抵抗増加が大きくなっていることからある程度の影響はあるものと考えられる.

Fig. 5 RAO of roll amplitude and added resistance in oblique sea condition ($\chi=120 \text{ deg.}$).

Fig. 6 RAO of roll amplitude and added resistance in beam sea condition ($\chi=90 \text{ deg.}$).

3.2 ビルジキール変更試験

横波状態($\chi=90\text{deg.}$)においてビルジキールを変更して波長変更試験を実施した結果を Fig.6 に示す. ビルジキール幅は $BK① < BK② < BK③$ であるが, これに対応して横揺ピーク振幅ならびにその λ/L における波浪中抵抗増加は $BK① > BK② > BK③$ となっており, ビルジキール幅に起因する横揺低減効果の違いが波浪中抵抗増加のピーク値に影響していることが分かる.

Fig.6 の結果より, 横揺ピーク λ/L における各ビルジキールの横揺振幅ピーク値と波浪中抵抗増加の関係を図示したものを Fig.7 に示す. 今回の試験結果の範囲では波浪中抵抗増加はほぼ横揺ピーク値と比例関係にあるが, これはより広範囲の横揺角となるよう入射波振幅を変えた試験を行い, 検証

Fig. 7 RAO of roll amplitude and added resistance in oblique sea condition ($\chi=60$ deg.).

する必要がある。

3.3 横揺れ固有周期変更試験

横揺れ固有周期変更試験結果を Fig.10 に示す。横揺れ固有周期の変更に対応して、波浪中抵抗増加のピークが変更された横揺れ固有周期となる λ/L に移動していることが確認できる。また本船型では横揺れ固有周期を変えることで横揺れピーク振幅が小さくなっており、それに応じて波浪中抵抗増加ピーク値も小さくなっていることから、横揺れ固有周期をずらすことが可能であれば波浪中抵抗増加を低減させられる可能性があると思われる。

Fig. 8 RAO of roll amplitude and added resistance in beam waves with various bilge keel sizes.

Fig. 9 Relation between roll amplitude and added resistance at roll peak λ/L

4. 横揺と波浪中抵抗増加の関係に関する考察

横波中の横揺れピーク周期付近で波浪中抵抗増加が大きくなる原因について考察する。

(a) Roll amplitude

(b) added resistance

Fig. 10 RAO of roll amplitude and added resistance in beam sea for various roll natural period.

Faltinsen らは、直接圧力積分による波浪中抵抗増加計算式を次のように導いた¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \bar{F}_1 = & -\frac{\rho g}{2} \oint_{l_w} \bar{\zeta}_r^2 \cdot n_1 dl - \omega_e^2 M \bar{\eta}_3 \bar{\eta}_5 + \omega_e^2 M (\bar{\eta}_2 - Z_G \bar{\eta}_4) \bar{\eta}_6 \\ & + \iint_{S_B} \{(\eta_2 + x\eta_6 - z\eta_4) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_m \\ & + (\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_m \\ & + \frac{1}{2} (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) \} n_1 dS \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、M:船体の質量、Φ:非定常速度ポテンシャル、(η₁, η₂, η₃):船体の並進運動、(η₄, η₅, η₆):船体の重心周り回転運動、n₁:船体表面に立てた法線の前後方向の方向余弦、S_B:船体の平均没水表面、l_w:船体の平均水線であり、また添字 m は運動の平均位置での値を取ることを意味する。

今回考えている大振幅横揺れ時に重要な役割を果たしているのが(1)式右辺第1項である。本項は圧力

$$P = -\rho g z - \rho \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - g(\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4) \right\} \quad (2)$$

から流体力を計算する際に、船体の浸水表面の時間変化ΔSの影響を表す項であり、微小振幅の仮定に基づいて

$$\begin{aligned} \bar{F}_{11} &= - \iint_{\Delta S} P \cdot n_1 dS \\ &\approx \rho g \oint_{l_w} \left\{ \int_0^{\zeta_r} \left[z + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_{z=0} + (\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4) \right] dz \right\} n_1 dl \\ &= \rho g \oint_{l_w} \left[\frac{1}{2} \zeta_r^2 - \zeta_r z \right]_{z=0}^{\zeta_r} \cdot n_1 dl \\ &= -\frac{\rho g}{2} \oint_{l_w} \bar{\zeta}_r^2 \cdot n_1 dl \end{aligned} \quad (3)$$

として求められるものである。

ここに、相対水位ζ_rは

$$\zeta_r = - \left\{ \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_{z=0} + (\eta_3 - x\eta_5 + y\eta_4) \right\} \quad (4)$$

で与えられる。

今回対象とした大型肥大船について、横揺ピークとなるλ/L=1.2ならびにその両側にあるλ/L=1.0, 1.4における両舷の相対水位振幅を計算した結果を Fig.11 に示す。λ/L=1.0, 1.4 では相対水位振幅は入射波振幅の2倍程度であるが、λ/L=1.2では波上側で入射波振幅の約5倍、波下側で約4倍になっている。Fig.6より、λ/L=1.2とλ/L=1.0, 1.4とを比較すると横揺角η₄が大きく異なっていることから、(4)式に示す相対水位計算式においてyη₄の項の影響が大きく表れているものと考えられる。

Fig.11 Relative wave height along the waterline of blunt ship in beam seas.

微小振幅の仮定が成り立つ程度に相対水位が小さい場合、(3)式において、大型肥大船では静止時の水線 l_w の前後対称性が強く、また横波に近い状態では相対水位 ζ_r にも船首尾端を除き前後対称性が現れることから、横波中では船首尾で $\overline{\zeta_r^2} \cdot n_1$ が打ち消し合う部分が多くなることにより、 $\overline{F_{11}}$ は小さくなる。

ところが、Fig.11 における $\lambda/L = 1.2$ の計算結果が示すように、横波中で大振幅横揺れを行い相対水位振幅が大きくなる場合は、微小振幅の仮定が成り立たなくなることから、 $\overline{F_{11}}$ の計算において圧力 P の変動成分ならびに方向余弦 n_1 を静止時の水線 l_w 上 $z=0$ の値で表すことが出来なくなると考えられることから、(3)式は

$$\begin{aligned} \overline{F_{11}} &= - \oint_{l_w} \left\{ \int_0^{\zeta_r} P \cdot n_1 dz \right\} dl \\ &= \rho g \oint_{l_w} \left\{ \int_0^{\zeta_r} \left[z + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \right] n_1 dz \right\} dl \end{aligned} \quad (5)$$

とする必要があり、時々刻々の浸水表面変化を考える際に速度ポテンシャルだけでなく方向余弦 n_1 の z 方向の変化も考慮しなければならない。今回の試験で用いた模型船のような船首部の肥大度が高い大型肥大船においては、船首部における n_1 の z 方向変化は小さく、かつ法線 n が船首方向に向いていることから n_1 は 1 に近い値を取る。一方、船尾部ではプロペラ取付けのため船尾部が絞り込まれていることから n_1 の z 方向への変化は大きく、かつ船底方向に向かって 0 に近くなる傾向にある。そのため、大振幅横揺れを行う際には船体傾斜時に船首尾での流体力の前後方向成分が打ち消し合わずに船首成分が支配的になることにより、横揺れピーク周期付近で大きな波浪中抵抗増加が生じるものと考えられる。

なお、(1)式の残りの項についても、大振幅横揺れ時には微小運動の仮定に基づいて速度ポテンシャルを平均位置での値で表すという近似が適用出来なくなると考えられることから、これらの項からも波浪中抵抗増加への寄与が生じるものと思われる。

横揺と波浪中抵抗増加の関係に関する定性的な考察は以上の通りであるが、より詳細かつ定量的な議論を行うためには CFD 等の大振幅横揺を計算可能な非線形時系列計算法に拠る必要がある。

5. まとめ

大型肥大船の横波中における波浪中抵抗増加について、水槽試験に基づく検討を行った。その結果をまとめると次の通りである。

- ・斜向波(120deg.)、横波(90deg.)、斜追波(60deg.)いずれの試験結果においても、横揺ピークとなる λ/L において波浪中抵抗増加が大きくなることを確認した。
- ・横波(90deg.)においてビルジキール幅を変えた計測を実施したところ、横揺ピークとなる λ/L において波浪中抵抗増加は横揺角に対してほぼ線形に変化した。
- ・横揺固有周期を変えて横波中計測を行ったところ、横揺れピークとなる λ/L の変化に追従して波浪中抵抗増加のピークも変化することを確認した。

4.にて横揺と波浪中抵抗増加の関係について理論的考察を行ったが、これはあくまで定性的な議論である。波浪中抵抗増加の発生に関するより詳細かつ定量的なメカニズムの解明を行うためには、CFD など大振幅横揺を計算可能な手法を用いる必要があるが、これは今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 細田龍介：斜波中における船体抵抗増加に関する研究，日本造船学会論文集 第 133 号，pp.7 - 21，昭和 48 年 6 月。
- 2) 丸尾孟，岩瀬和夫：斜波における抵抗増加の計算，日本造船学会論文集，第 147 号，pp.79-84，昭和 55 年 6 月。
- 3) 藤井斉，高橋雄：肥大船の波浪中抵抗増加に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第 137 号，昭和 50 年 6 月。
- 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，西部造船会々報，第 75 号，pp.75 - 95，昭和 63 年 3 月。
- 5) 升也利一：波浪中を航行する漁船に働く定常流体力の近似計算法，水工研技報 26，pp.9 - 16，2004。
- 6) Valanto, P. and Hong, Y.P. : Experimental Investigation on Ship Wave Added Resistance in Regular Head, Oblique, Beam, and Following Waves, Proceedings of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015.
- 7) 溝口純敏，大道真志：IHI 運動性能水槽における波浪中試験，石川島播磨技報，第 20 巻，第 6 号，pp.379 - 385，昭和 55 年 11 月。
- 8) 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，平成元年 12 月。
- 9) 渡辺巖，土岐直二，伊東章雄：第 2 編 第 2 章 ストリップ法，日本造船学会 運動性能研究委員会第・11 回シンポジウム，pp.167- 218，1994 年 12 月。
- 10) Faltinsen, O.M., Minsaas, K., Liapis, N. and Skjrdal, S.O.: Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway, Thirteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1980.