低速域における波浪中抵抗増加と船速低下について

正員 門 松 浩 司* 正員 井 上 義 行**
正員 宝 田 直之助**

On the Added Resistance and Speed Loss in Low Forward Speed Range

by Koji Kadomatsu, *Member* Yoshiyuki Inoue, *Member*
Naonosuke Takarada, *Member*

Summary

The added resistance in regular head waves at low forward speed acting on a huge bulk carrier is evaluated by using three dimensional source technique with forward speed. The numerical results are compared with measured data and are also compared with the calculated value of slender ship theory.

The added resistance at low forward speed predicted by three dimensional source technique is much better agreement with measured ones than that by slender ship theory.

Using added resistance data in regular waves ship speed in a seaway is also evaluated.

The evaluated ship speed in regular moderate seas based on slender ship theory is in good agreement with ones based on a measured added resistance. In rough seas, however, the estimated speed loss obtained by using slender ship theory is too high to use. This is because of the error of added resistance at low forward speed. On the other hand, speed loss in rough seas estimated by based on three dimensional source technique is fairly good.

1. 緒 言

油槽船, ばら積貨物船等の大型肥大船は運航採算上低速運航が実施され, それほど過酷といえない程度の荒天に遭遇した場合でも, その船速がフルード数 0.10 程度まで低下することが報告されている¹⁾。

波浪中抵抗増加についてはこれまで多くの研究が行われ, いくつかの推定法が提案²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾されており, フルード数 0.15 以上の通常船速の場合には実用的精度で推定が可能である。

一方, 低速運航が行われている大型肥大船の荒天時における船速低下を精度よく推定するためには, 船速低下が激しい⁶⁾⁷⁾ことからフルード数 0.10 以下の抵抗増加量の推定が必要である。しかしながら, 現在広く使用されている丸尾の式²⁾に線状に分布した吹き出しを用いる方法²⁾⁴⁾⁵⁾¹⁵⁾がフルード数 0.10 以下における低速域においても有効であるかの検討はあまり行われていない。わずかに高橋が多くの水槽試験結果を基にフルード数 0.15 以下の抵抗増加計

算に対する改良法を提案している⁸⁾程度であると思われる。

そこで著者らは, 大型のばら積み貨物船を対象にして, 波浪中抵抗増加の水槽試験を実施し, フルード数 0.10 以下の低速域で正面向い波中に於ける抵抗増加の計測を行った。同時に, 前進速度を考慮した 3 次元特異点分布法により吹き出し密度を求め, これを使用して低速域の規則波中抵抗増加の計算を試みた。これらの結果を従来から使用されている 2 次元的手法である線状特異点分布による抵抗増加の計算結果と比較し考察した。

さらに, 設計者および運航者にとって問題となる荒天時の船速低下の推定を行い, 低速域抵抗増加と船速低下の関係を調査した。これらの概要を以下に示す。

2. 抵抗増加の基礎理論

2.1 吹き出し密度の計算

3 次元特異点分布法によって求められる吹き出し密度を用いた低速域の抵抗増加計算を試みる。使用した 3 次元特異点分布法の計算プログラムは筆者の一人らが作成したもの⁹⁾で, その概要を以下に記す。

座標系は Fig. 1 に示す Z 軸を上向きにとった右手系と

* 住友重機械工業(株) 平塚研究所

** 横浜国立大学工学部船舶海洋工学教室

Fig. 1 Coordinate system

し、 $O'-x'y'z'$ を空間固定座標系、 $O-xyz$ を船体とともに移動する等速移動座標系とする。船体は x' 軸正方向に速度 U で進行し、波の入射角 χ は x' 軸負方向を0とする。

船体表面上の任意の点 P における j モードの運動(1: 前後揺, 2: 左右揺, 3: 上下揺, 4: 横揺, 5: 縦揺, 6: 船首揺, 7: diffraction)の単位振幅の速度ポテンシャル $\phi_j(P)$ は、ラプラス方程式、線型自由表面条件、radiation条件を満たすグリーン関数 G を介して船体表面上の任意の点 Q に分布させた密度 $\sigma_j(Q)$ の吹き出しにより次式で表される。

$$\phi_j(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \sigma_j(Q) G(P, Q) ds + \frac{U^2}{4\pi g} \int_y \sigma_j(Q) G(P, Q) \frac{\partial n}{\partial x_Q} dy \quad (1)$$

(1)式右辺第2項は、船体表面と自由表面の交線上の積分で線積分項と称され、造波抵抗問題においては種々の論議がなされている¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。ここではこの線積分項の影響は少ないものとして考慮しないこととする。したがって(1)式は、

$$\phi_j(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \sigma_j(Q) G(P, Q) ds \quad (2)$$

となる。速度ポテンシャル $\phi_j(P)$ の船体表面の境界条件から吹き出し密度 $\sigma_j(Q)$ を決定する¹⁴⁾。

2.2 抵抗増加の計算

規則波中抵抗増加の計算は丸尾による次式²⁾で求めることとする。

$$R_{aw} = 2\pi\rho \left[\left\{ \int_{-\pi/2}^{-\alpha_0} + \int_{\alpha_0}^{\pi/2} - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \right\} \times |H(\kappa_1, \alpha)|^2 h(\kappa_1, \alpha) d\alpha + \int_{\alpha_0}^{2\pi-\alpha_0} |H(\kappa_2, \alpha)|^2 h(\kappa_2, \alpha) d\alpha \right] \quad (3)$$

ここで、

$$h(\kappa_n, \alpha) = \frac{\kappa_n (\kappa_n \cos \alpha - K \cos \chi)}{\sqrt{1-4\Omega \cos \alpha}} \quad (n=1, 2) \quad (4)$$

$$\kappa_1 = \kappa_0 \frac{1-2\Omega \cos \alpha \pm \sqrt{1-4\Omega \cos \alpha}}{2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

$$\Omega = U\omega_e/g \quad (6)$$

$$\kappa_0 = g/U^2 \quad (7)$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} 0 & \text{for } \Omega \leq 1/4 \\ \cos^{-1}(1/4\Omega) & \text{for } \Omega > 1/4 \end{cases} \quad (8)$$

(3)式中のコチン関数 $H(\kappa_n, \alpha)$ は3次元特異点分布法⁹⁾によって求められる吹き出し密度を用いて次式で定義する¹⁴⁾。

$$H(\kappa, \alpha) = \iint_s \sigma(x, y, z) \exp[\kappa\{z - i(x \cos \alpha + y \sin \alpha)\}] ds \quad (9)$$

$$\sigma(x, y, z) = \sum_{j=1}^6 \{-i\omega_e l_j \sigma_j(x, y, z)\} + \sigma_r(x, y, z) \quad (10)$$

l_j : j モード運動の複素振幅

よく行われているように、(3)式の積分変数 κ と α を次式により変数変換する。

$$m = \kappa_n \cos \alpha \quad (n=1, 2) \quad (11)$$

(11)式の変数変換により3次元的な吹き出しを用いた規則波中抵抗増加は次式となる。

$$R_{aw} = 4\pi\rho \left[-\int_{-\infty}^{m_3} + \int_{m_4}^{m_2} + \int_{m_1}^{\infty} \right] \times \frac{(m + \kappa_0\Omega)^2 (m - K \cos \chi)}{\sqrt{(m + \kappa_0\Omega)^4 - m^2 \kappa_0^2}} |H(m)|^2 dm \quad (12)$$

ここで、

$$m_1, m_2 = \frac{\kappa_0}{2} (1 - 2\Omega \pm \sqrt{1-4\Omega}) \quad (13)$$

$$m_3, m_4 = -\frac{\kappa_0}{2} (1 + 2\Omega \pm \sqrt{1-4\Omega}) \quad (14)$$

$$H(m) = \iint_s \sigma(x, y, z) \exp \left\{ \frac{(m + \kappa_0\Omega)^2}{\kappa_0} z - i x m - i y \frac{\sqrt{(m + \kappa_0\Omega)^4 - m^2 \kappa_0^2}}{\kappa_0} \right\} ds \quad (15)$$

である。

3. 抵抗増加の実験及び計算

3.1 水槽試験

水槽試験は住友重機械工業(株)平塚研究所の航海性能水槽(長さ56m, 幅30m, 深さ2.5m)で実施した。

供試模型船としては、低速運航が実施されている載荷重量20万トンの大型ばら積み貨物船(長さ285m, 幅50m, 喫水18.5m)の1/97.9の縮尺模型を選択した。

水槽試験において模型船の前後揺、左右揺は弱いバネで緩く拘束し、船首揺は強いバネで拘束した。波浪中抵抗はヒービングロッドの下部に取り付けた検力計によって計測した。抵抗増加量は波浪中で計測された抵抗値からあらかじめ計測しておいた平水中抵抗を差し引いて求めた。

試験はフルード数で0.0, 0.05, 0.10, 0.15の4種類、波方向は正面向い波($\chi=180^\circ$)、波長は λ/L で0.4~2.4、波高0.03m($\xi_a/L \approx 1/200$)で実施した。

3.2 結果及び考察

(1) 吹き出し密度の計算

3次元特異点分布法によって吹き出し密度の計算を行う

Fig. 2 Panel division

に際しては船体を有限個のパネルで表す必要がある。そこで Fig. 2 に示すような片舷 105 枚のパネルで船体を表した。計算はフルード数 0.0, 0.05, 0.10 について行った。

抵抗増加に大きい影響を持つ水面に最も近い No.1 Section のパネルについて、 $\lambda/L=0.4$ と 1.0 の時の上下揺、縦揺及び diffraction それぞれの単位振幅速度における吹き出し密度を Fig. 3 に示す。

同図によれば、 $\lambda/L=1.0$ ではどのモードも船速の変化に対する吹き出し密度の大きさ及び分布の変化は見られない。しかし、 $\lambda/L=0.4$ では船速の変化に伴って吹き出し密度の大きさ及び分布に変化が見られ、特にフルード数 0.10 の上下揺、縦揺の吹き出し密度は船尾付近でそれ以下の船速と異なった特徴を示し、その絶対値も大きくなっている。船尾の水面付近の吹き出し密度が本計算結果のように変化する例は (1) 式中の線積分を考慮しない定常問題の計算例でも見られ、線積分を考慮することにより、この水面付近の変化が減少することが示されている¹¹⁾。

(2) 船体動揺の実験及び計算

Fig. 4~7 に前後揺、上下揺及び縦揺の水槽試験結果を示す。同図中で破線は N.S.M. (New Strip Method) による計算結果で、実線はフルード数 0.0, 0.05, 0.10 に対する 3 次元特異点分布法による計算結果 (以下 3 次元計算と称す) である。

N.S.M. の結果を試験結果と比較すると上下揺、縦揺の固有周波数付近で計算値が若干小さくなっているものの両者はほぼ一致している。一方、3 次元計算は傾向的には試験結果と一致しているが、N.S.M. とは逆に上下揺と縦揺の固有周波数付近で運動を少し大きめに推定している。この傾向は船速の上昇に伴って顕著になっている。

フルード数がゼロの 3 次元計算結果は試験結果と良く一致しているものの、前進速度が増すと計算結果と試験結果

 Fig. 4 Ship motions at $F_n=0.0$

 Fig. 5 Ship motions at $F_n=0.05$

Fig. 3 Source distribution of No. 1 Section

Fig. 6 Ship motions at $F_n=0.10$ Fig. 7 Ship motions at $F_n=0.15$

Fig. 8 Added resistance in regular head waves (Cal. is based on calculated ship motions)

との差が開く。これは計算では考慮していない粘性や碎波等の影響のためと考えられる。

(3) 抵抗増加の実験及び計算

Fig. 8 は抵抗増加の試験結果である。同図には 2 次元計算値として、藤井・高橋¹⁵⁾の吹き出しを用いて (12) 式より算出される抵抗増加と高橋の半実験式⁸⁾による船首反射波に基づく抵抗増加の和を示した。この計算に必要な船体運動

は (2) に示した N.S.M. による計算値を使用した。3 次元計算値は 2. に示す方法で、フルード数 0.0, 0.05, 0.10 について行い、このための運動振幅 l は 3 次元特異点分布法による理論値を使用した。

同図より、2 次元計算値はフルード数 0.0, 0.05 の全周波数域で試験結果より過大な値を示し、フルード数 0.10 では $\lambda/L < 1.0$ の高周波数域で良い一致をみるもののこれより低周波数域ではフルード数 0.0, 0.05 の場合と同様に、抵抗増加を過大に推定している。フルード数 0.15 は試験結果と 2 次元計算値はほぼ一致し、船速が速く出会い周波数が比較的高ければ 2 次元計算が有効であることが確認できる。

一方、3 次元計算値と試験結果の対応をみると、フルード数 0.0 では全周波数域で良い一致を示し、フルード数 0.05, 0.10 では $\lambda/L > 1.0$ の低周波数域で両者は良く一致している。しかしながら、 $\lambda/L < 1.0$ の高周波数域では試験結果と 3 次元計算値に差が見られ、特にフルード数 0.10, $\lambda/L = 1.0$ 付近では 3 次元計算値が大きく低下している。この時の船体運動を Fig. 6 でみると、3 次元計算値が試験結果に比べて振幅で 3 割程度低く位相が大きく反転する周波数付近であるために、船体運動の差が抵抗増加に大きい差を生じさせているものと推測される。

一方、2 次元計算に使用した N.S.M. では縦揺の固有周期付近で比較的良好な推定結果を示している。Fig. 8 の抵抗増加の計算値にはこのような船体運動の差が含まれている。そこで、3 次元計算と 2 次元計算の吹き出しの抵抗増加への影響を見るためには両者の船体運動は同一とした方がよいと考え、水槽試験で得られた船体運動を用いた抵抗増加の計算結果を Fig. 9 に示した。

同図をみると、3 次元計算値で先ほど具合の悪かったフルード数 0.10, $\lambda/L = 1.0$ 付近は試験結果と良好に一致し、これより高周波数側でも試験結果に近づいていることが認められる。全体的に 3 次元計算値は試験結果に比べ若

Fig. 9 Added resistance in regular head waves (Cal. is based on experimental ship motions)

干低いものの概略良い一致を示している。逆にフルード数 0.10 以下の 2 次元計算値は船体運動に試験結果を使用しても、抵抗増加を過大に推定する傾向は変わらず、むしろ船体運動に計算値を使用した場合よりも差が開く傾向にある。

Fig. 10~11 はフルード数 0.05 と 0.10 の $\lambda/L=1.0$ について 3 次元特異点分布法による吹き出しを用いた場合と 2 次元計算である細長船を仮定した吹き出しを用いた場合のコチン関数を比較したものである。同図を見ると、3 次元

Fig. 10 Comparison of Kochin function between 3-dimensional cal. and 2-dimensional cal. at $F_n=0.05$, $\lambda/L=1.0$ ($\Omega=0.141$)

Fig. 11 Comparison of Kochin function between 3-dimensional cal. and 2-dimensional cal. at $F_n=0.10$, $\lambda/L=1.0$ ($\Omega=0.313$)

計算に比較して 2 次元計算はフルード数 0.05 ではほぼ全方向の発散波を、フルード数 0.10 では 180° から 60° 方向の発散波を過大に評価している。フルード数 0.10 では 60° より前方に発散する波は 3 次元計算の方が大きくなっている。2 次元計算は高速で出会う周波数が高く、発散波が主に横方向に広がる状態²⁰⁾の抵抗増加の推定にはよいが、船速が低く出会う周波数が低くなり発散波が横方向だけでなく 3 次元的に前方にも広がる状態での抵抗増加の推定には適していないものと推察される。この点に関し高橋は多くの実験結果から 2 次元計算を行う際にフルード数 0.15 以下では吹き出し位置を深くする修正法⁸⁾を提案している。また、2 次元計算の適用範囲をフルード数 0.10 以上としている。

以上のことから、フルード数 0.10 以下の低速域の抵抗増加を細長船を仮定した吹き出しを用いて推定すると実際より過大な結果を得るものの、3 次元の吹き出しを使用すると推定精度が向上することがわかった。しかしながら、3 次元計算においてもフルード数 0.05 の抵抗増加を若干低く推定してしまう。この点、肥後¹⁶⁾の鉛直円筒の抵抗増加の研究においても同様の指摘があり、大楠¹⁷⁾、内藤¹⁸⁾の指摘している基礎流場の変化等についての検討が今後必要であろう。

4. 船速低下

本論文の対象としている大型のばら積み貨物船は排水量に比較して主機出力が小さい¹⁹⁾ため、荒天に遭遇したとき著しく船速が低下する⁶⁾⁷⁾。

低速域の抵抗増加に関する検討から、現状の 2 次元計算法により規則波中抵抗増加を推定すると過大な結果を与え

Fig. 12 Mean added resistance in various head seas

ることが確認された。ここでは不規則波中平均抵抗増加と運航者、設計者が必要な船速低下について検討を行なう。

Fig. 12 は ISSC (1964) の波スペクトルを仮定した長波頂不規則波とそれに対応する風の中における平均抵抗増加量と船速の関係を 4 ケースの海象について見た図である。同図には水槽試験より得られた規則波中抵抗増加を基に推定した値のほかに、2 次元計算による推定値と 3 次元計算による推定値 (但しフルード数 0.10 以下) も示した。これらの計算においては、2 次元、3 次元計算ともに船体運動には試験結果を使用した。また、スペクトル計算においては、 $\lambda/L < 0.4$ の規則波中抵抗増加は低周波数域の値から外挿した。

水槽試験結果より推定される平均抵抗増加と 2 次元計算による平均抵抗増加を比較すると、平均波周期 6.1 秒、7.6 秒の場合は差が見られないがこれより平均周期が長い場合には差が現れてくる。3 次元計算による平均抵抗増加はフルード数 0.10 では水槽試験より推定される値とほぼ一致するが、フルード数 0.05 では低くなっている。

船舶が遭遇する海象は通常平均波周期 6~8 秒であり、Fig. 12 より、このような海象中の船速を推定する場合には 2 次元計算でも実用上問題は無い。しかしながら、荒天時には船速が著しく低下する。このような低速時の船速推定に必要な抵抗増加は平均波周期の比較的長い、船速の低い範囲である。ところが、フルード数 0.10 以下の 2 次元計算値では水槽試験結果から推定される平均抵抗増加に比べて過大な推定値を与えており、船速の推定にも差が現れることになる。

Fig. 13 は以上の解析を行なった船の航海速力を 14 ノットと仮定し、主機 (常用出力 17250 ps/64.8 rpm) を設定して、風浪中船速低下を推定した結果である。同図に示した船速は風浪中で平水中の常用出力 (NOR) のトルク値に等しいトルクとなる船速である。

同図からも平均波周期が 6~8 秒程度の海象中では、船速低下は水槽試験を基にした推定値と 2 次元計算による値の差はなく、船速低下を 2 次元計算によって推定しても問題のないことがわかる。しかし、海象が荒れてくると、2 次元計算では急激に船速が低下し、平均周期 11 秒の海象中で

は前進が不可能となる推定結果を示す。ところが、水槽試験を基にした推定では 2 次元計算によるものほど船速低下は見られていない。3 次元計算ではフルード数 0.05 の抵抗増加を低く推定するため、船速低下も水槽試験結果を基にした推定値より若干少なく推定している。

以上のことから、2 次元計算によって船速低下の著しい荒天時の船速を推定するには問題があり、これを改良するためにはここで示したような 3 次元計算によるなどの推定法の改良が必要であると思われる。

5. 結 言

フルード数 0.10 以下の低速域の波浪中抵抗増加及び船速低下について、大型肥大船を対象にして水槽試験、3 次元特異点分布法による計算及び 2 次元計算を実施して以下の結論を得た。

- 1) フルード数 0.10 以下の波浪中抵抗増加を 2 次元計算により推定すると特に低周波数領域において過大となる。
- 2) 3 次元特異点分布法による吹き出しを用いてフルード数 0.10 以下の抵抗増加を推定すると概して良い一致をみる。
- 3) 2 次元計算によって荒天時の船速低下を推定すると水槽試験結果を基にした推定値と比較して船速を著しく低く推定してしまう。

最後に本論文の水槽試験を担当して頂いた住友重機械工業 (株) 平塚研究所流体力学グループの方々には厚くお礼申し上げます。

尚、本研究は文部省科学研究補助金の援助を受けて実施したものであることを付記する。また、計算は横浜国立大学情報処理センターの HITAC M-280 D 及び東京大学大型計算機センターの HITAC M-680 H を使用した。

参 考 文 献

- 1) 湯浅通史他：実船の就航時の船体応答について (第 2 報大型ばら積貨物船の船体応答), 日本造船学会論文集, 第 161 号, (昭和 62 年 5 月), p.293~303.
- 2) Maruo, H: Resistance in Waves, Researches on Seakeeping Qualities in Japan, The Society of Naval Architects of Japan, 60th Anniversary Series, Vol. 8, (1963), p. 67-102.
- 3) Gerritsma J, and Beukelman, W; Analysis of the Resistance Increases in waves of a Fast Cargo Ship, Appendix 5 of Report of Seakeeping Committee, Proc. 13th ITTC, Vol. 2, (1972), p. 171-185.
- 4) 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, (昭和 48 年 5 月), p.7-22.
- 5) 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, (昭和 55 年 5 月), p.79-84.

Fig. 13 Speed loss in various head seas

- 6) 金順甲, 内藤林, 中村彰一; 波浪中における低速船の推進性能に関する研究, 関西造船協会誌, 第 196 号, (昭和 60 年 3 月), p.113-126.
- 7) 高橋雄, 浅井滋; 大型低速肥大船の荒天時運航特性に関する実験的研究, 西部造船会々報, 第 65 号, (昭和 58 年 3 月), p.51-61.
- 8) 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, (昭和 63 年 3 月), p.65-95.
- 9) 井上義行, 牧野有紀; 3 次元特異点分布法による流体力の前進速度影響, (平成元年度日本造船学会秋期講演会にて発表予定).
- 10) R. Brard; The Representation of a Given Ship Form By Singularity Distributions when the Boundary Condition on the Free Surface is Linearized, J. S. R., Vol. 16 (1972), p. 79-92.
- 11) 日下祐三, 乾崇夫, 梶谷尚; 自由表面条件を考慮した船型の等価特異点分布とくに線積分効果について, 日本造船学会論文集, 第 138 号, (昭和 50 年 11 月), p.12-22.
- 12) 堤孝行; 船体表面吹き出し分布による船の造波抵抗について西部造船会々誌, 第 51 号, (昭和 51 年 3 月), p.269-285.
- 13) 石井規夫, 田中一郎, 木村朗; Neumann-Kelvin 造波問題の実用船型数値解析, 関西造船協会誌, 第 189 号, (昭和 58 年 6 月), p.65-70.
- 14) 菅 信; 二次元造波理論, 三次元造波理論, 第 2 回耐航性に関するシンポジウム, (昭和 52 年 12 月), p.17-40.
- 15) 藤井齊, 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, (昭和 50 年 5 月), p.132-137.
- 16) 肥後靖, 佐藤和彦; 波浪中を低速航行する鉛直円筒に働く抵抗増加に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 163 号, (昭和 62 年 5 月), p.219-227.
- 17) Ohkusu, M; Added Resistance in Wave of Hull Forms with Blunt Bow, Proc. 15th Symposium on Naval Hydrodynamics, (1984), p. 135-147.
- 18) 内藤林, 中村彰一, 西口映; 肥えた船首をもつ船の短波長域における抵抗増加に関する研究, 関西造船協会誌, 第 197 号, (昭和 60 年 6 月), p.39-45.
- 19) 門松浩司, 井上義行, 宝田直之助; 風波中における船速低下に関する船型要素の影響, 日本造船学会論文集, 第 164 号, (昭和 63 年 1 1 月), p.85-93.
- 20) 内藤林, 山本修, 高橋雄; 船型と波浪中抵抗増加, 船型と耐航性, 運動性能研究委員会・第 5 回シンポジウム, (1988 年 11 月), p.45-79.