(昭和 50 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

肥大船の波浪中抵抗増加推定法 に関する実験的研究

正員 藤 井 齊* 正員 高 橋 雄*

Experimental Study on the Resistance Increase of a Large
Full Ship in Regular Oblique Waves

by Hitoshi Fujii, *Member* Takeshi Takahashi, *Member*

Summary

An attempt has been made to establish an approximate method to calculate the resistance increase of a full ship in regular oblique waves. Applicability of this method was confirmed by the model test carried out in regular oblique waves making use of a newly designed dynamometer.

Comparing the measured resistance increase and the computed one in accordance with the slender body assumption, fairly good agreement is shown as a whole except for the range of shorter wave length where the measured value is larger than the computed one. An approximate calculation method was proposed in consideration of the resistance increase due to the wave reflection at the blunt bow.

It was shown that total resistance increase of a full ship in waves can be obtained approximately by the sum of the resistance due to ship motions and the wave reflection at the bow.

1 緒 言

波浪中における船舶の推進性能を推定することは、耐航性能の研究における重要な課題の1つであるが、これまでは主として実験的な手法、例えば推力増加の計測というような形で研究が進められてきた。しかしながら最近の造波理論に関する研究の進歩により、波浪中の抵抗増加について理論計算が可能となったので、これとプロベラ特性および自航要素等を組合せることによって、波浪中における推進性能を推定計算する途がひらけてきた。

正面向波中の抵抗増加に関しては、理論的にも実験的にもこれまでかなり研究が進められており^{1,2)}、著者等³⁾も丸尾の理論に従って近似計算を行ない、実験結果と比較して計算法の適用性を調査してきた。斜め波中の抵抗増加に関しても、細田⁴⁾の研究により「斜め波中の抵抗増加に対しては、上下揺れおよび縦揺れの寄与が支配的であり、横運動の寄与は小さい。」ということが示されたので、これに従って正面向波中の抵抗増加の計算法を斜め波中に拡張し、斜め波中の抵抗増加を計算する計算プログラムを作成した。この斜め波中の抵抗増加の計算法の適用性は水槽試験によって確認する必要があるので、斜め波中試験に用いることのできる重錘式抵抗動力計を試作して、抵抗増加の計測を試みた。斜め波中の抵抗増加の計測はこれまでほとんど行なわれたことがなく、確立した試験法はまだないようである。ここで実施した試験法も十分なものとはいえないが、ほぼその目的に適ったものであると考えられる。

波浪中における抵抗増加についてのこれまでの理論計算は、主として船体運動に基づく量を計算しており、波に対する上下方向の相対速度に比例する強さの特異点によって船体による攪乱効果を表わしている。したがって波長の短い場合は、船体運動も小さくかつ船底付近では波粒子の軌道運動も小さいので、抵抗増加は少ないことになる。事実、瘠型船型に関する模型試験の結果はこのような理論的考察の裏付けを示している。ところが船首部の blunt な大型肥大船に関する模型試験の結果では、船体運動のほとんどない短波長域 ($\lambda/L \leq 0.5$) におい

* 三菱重工業(株)長崎研究所

てかなりの量の抵抗増加が認められ、その大きさは抵抗増加の応答関数の上で船体運動の大きい場合の抵抗増加の 1/2 あるいはそれ以上にも達している。最近のタンカーはますます大型化の傾向にあるが、それに伴って実際海面で遭遇する波長が相対的に短くなってきており、このような短波長域における抵抗増加が、波浪中における推進性能上の 1 つの重要な問題となりつつある。

船首部の blunt な大型肥大船の短波長域で顕著に見られるこのような抵抗増加は、これまでの計算法には十分表わされていなかった船首部船側からの反射波に基づくものと考えられる。そこでこの量を実用的な立場で近似的に評価し、肥大船の抵抗増加の推定をより精度よくするため、Havelock の drifting force に関する計算式を基礎として近似的に計算し、これまでの船体運動に基づく抵抗増加に単純に加え合せることによって肥大船の波浪中抵抗増加を推定計算することを試みた。

最近の超大型船の船首部はますます肥大化の傾向にあるが、その形状の決定に際しては平水中性能だけでなく、波浪中における抵抗増加や船首波浪衝撃あるいは投錨など多方面から検討を加える必要があると考えられる。

2 斜め波中の抵抗増加の計算式

2.1 船体運動に基づく抵抗増加

斜め規則波中における船体の抵抗増加 $R_{AW(0)}$ は、丸尾¹⁾により次のように与えられている。

$$R_{AW(0)} = 4\pi\rho \left[-\int_{-\infty}^{a_1} + \int_{a_2}^{\infty} \right] \frac{(m+K_0\Omega)^2(m-k\cos\mu)}{\sqrt{(m+K_0\Omega)^4-K_0^2m^2}} |H_1(m)|^2 dm \quad (1)$$

ただし

$$\begin{aligned} k &= 2\pi/\lambda & g &: \text{重力加速度} \\ C^2 &= g/k & \lambda &: \text{波長} \\ \omega_e &= k(C-U\cos\mu) & U &: \text{前進速度} \\ K_0 &= g/U^2 & \omega_e &: \text{出合い円周波数} \\ \Omega &= U|\omega_e|/g & \mu &: \text{波方向} \\ \left. \begin{aligned} a_1 \\ a_2 \end{aligned} \right\} &= -\frac{K_0}{2}(1+2\Omega \pm \sqrt{1-4\Omega}) \end{aligned}$$

$H_1(m)$ は特異点分布によって決まる関数であるが、近似的な取扱いとして船体を細長体と仮定し、船体の各断面で波に対する上下方向の相対速度に比例する強さの吹出し $\sigma(x)$ を船長方向に一定の深さ $Z_0 = -C_{VP}T_0$ (C_{VP} : 豎柱形肥瘠係数, T_0 : 喫水) に集中させるものとすれば、次のように表わされる。

$$H_1(m) = \int (\sigma_c - i\sigma_s) e^{\frac{(m+K_0\Omega)^2}{k}Z_0 + imx} dx \quad (2)$$

ただし

$$\sigma = \sigma_c \cos \omega_e t + \sigma_s \sin \omega_e t = -\frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \{ Z_r(x) \cdot y(x) \} \quad (3)$$

$$Z_r(x) = Z + (x - x_G)\theta - \zeta_{sub}$$

$Z_r(x)$: 各横断面における波に対する上下方向相対変位

$y(x)$: 各横断面の水線幅

Z : 上下揺れ変位, $Z = Z_A \cos(\omega_e t + \varepsilon_z)$

θ : 縦揺れ角, $\theta = \theta_A \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta)$

x, x_G : 船体の長さ方向座標値および重心位置

ζ_{sub} : 波の subsurface の変位

$$\zeta_{sub} = h_A e^{kZ_0} \cos(kx \cos \mu - \omega_e t)$$

抵抗増加係数の無次元表示を $\sigma_{AW(0)}$ とすれば、 $\sigma_{AW(0)}$ は次のように船体運動および入射波の影響による成分の和として表わすことができる。

$$\sigma_{AW(0)} = \frac{R_{AW(0)}}{\rho g h_A^2 B^2 / L} = D_{11} \hat{Z}_A^2 + D_{22} \hat{\theta}_A^2 + D_{33} + D_{12} \hat{Z}_A \hat{\theta}_A + D_{13} \hat{Z}_A + D_{23} \hat{\theta}_A \quad (4)$$

ただし、係数 D_{ij} の添字は、1: 上下揺れに関する量、2: 縦揺れに関する量、3: 波に関する量を示す。

係数 D_{ij} は次のような中間積分値 $S(\hat{x}), C(\hat{x})$ を用いて表わすことができる。

$$\begin{Bmatrix} S(\hat{x}) \\ C(\hat{x}) \end{Bmatrix} = \int_{\hat{m}} M \begin{Bmatrix} \sin(\hat{m}\hat{x}) \\ \cos(\hat{m}\hat{x}) \end{Bmatrix} d\hat{m} \quad (5)$$

ただし

$$M = \frac{1}{2\pi \hat{K}_0} \frac{(\hat{m} + \hat{\omega}_e)^4 (\hat{m} - \hat{k} \cos \mu)}{\sqrt{(\hat{m} + \hat{\omega}_e)^4 - (\hat{K}_0 \hat{m})^2}} e^{-\frac{2C_{VP}(\hat{m} + \hat{\omega}_e)^2 \hat{T}_0}{\hat{K}_0}} \quad (6)$$

$$D_{11} = \iint \hat{y} \hat{y}' C(\hat{x} - \hat{x}') d\hat{x} d\hat{x}'$$

$$D_{22} = \hat{k}^2 \iint \hat{y} \hat{y}' (\hat{x} - \hat{x}_G) (\hat{x}' - \hat{x}_G) C(\hat{x} - \hat{x}') d\hat{x} d\hat{x}'$$

$$D_{33} = e^{-2C_{VP} \hat{K}_0 \hat{T}_0} \iint \hat{y} \hat{y}' [C(\hat{x} - \hat{x}') \cos \{ \hat{k}(\hat{x} - \hat{x}') \cos \mu \} + S(\hat{x} - \hat{x}') \sin \{ \hat{k}(\hat{x} - \hat{x}') \cos \mu \}] d\hat{x} d\hat{x}'$$

$$\left. \begin{aligned} D_{12} &= D_{12}^C \cos(\varepsilon_Z - \varepsilon_\theta) + D_{12}^S \sin(\varepsilon_Z - \varepsilon_\theta) \\ D_{13} &= D_{13}^C \cos \varepsilon_Z + D_{13}^S \sin \varepsilon_Z \\ D_{23} &= D_{23}^C \cos \varepsilon_\theta + D_{23}^S \sin \varepsilon_\theta \end{aligned} \right\} \text{詳細な式は省略する。}$$

ただし、上式において次のような無次元表示を用いている。

$$\begin{aligned} \hat{Z}_A &= Z_A/h_A, \quad \hat{\theta}_A = \theta_A/kh_A, \quad \hat{k} = k/(2/L), \quad \hat{K}_0 = K_0/(2/L), \quad \hat{m} = m/(L/2), \quad \hat{\omega}_e = \hat{K}_0 \Omega, \\ \hat{x} &= x/(L/2), \quad \hat{x}_G = x_G/(L/2), \quad \hat{y} = y/B, \quad \hat{T}_0 = T_0/(L/2) \end{aligned}$$

ところで、この波浪中抵抗増加の計算式は3重積分で表示されており、しかも積分区間が無限区間であったり被積分関数が発散したりするため、複雑な数値積分となる。そのため電算機を使用してもかなりの計算時間と費用を要する。しかしながら実用上は必ずしも任意の波長、任意の船速で抵抗増加が計算できる必要はなく、特定の波長や船速に対して計算できれば、抵抗増加の応答関数は比較的単純な形をしているので、ほぼその形を定めることができる。抵抗増加計算の中間積分値 $S(\hat{x}), C(\hat{x})$ は、波方向 (μ)、波長 (λ/L)、船速 (F_n)、船体座標 ($\hat{x}$)、特異点の深さ位置 ($C_{VP} \hat{T}_0$)、の5個のパラメータによって決定される。したがってあらかじめこれらのパラメータに対して一度広範囲に $S(\hat{x}), C(\hat{x})$ を計算して作表しておけば、以後はその数値表を呼出しながら短時間で抵抗増加を計算することができる。

2.2 従来の計算法による抵抗増加の計算値と実験値の比較

このようにして、細長体の仮定により波浪中の抵抗増加が計算できるが、この計算法を肥大船に適用すると $\lambda/L=0.7$ 以下の短波長域で、計算値は実験値よりもかなり小さな値を示す。Fig.1 は Series 60, $C_b=0.8$ 船型についての計算値と実験値の比較図で、実験結果は参考文献6)の Fig.17 より転記した。計算値は $\sigma_{AW(0)}$ とその成分の1つ D_{33} を示している。この D_{33} は反射波影響を示す項であるが、この項は船体を細長体と仮定して主として船底における波に対する攪乱効果を表わしたものであり、船体運動の小さい短波長域ではこの項が主要項となっている。この図にも見られるように短波長域で計算値は実験値よりも小さな値を示しており、これまでの計算法には表わされていない要素があるのではないかと考えられる。

2.3 肥大船の波浪中抵抗増加の近似計算法

肥大船に対して短波長域で顕著にみられるこのような抵抗増加の原因は、blunt な船首部からの反射波に基づく抵抗増加が大きいためと考えられる。特異点分布によって決まる関数 $H_1(m)$ を船首部船側も含めて船体表面の境界条件を満たすように決めることができるならば、このような反射波に基づくと考えられる抵抗増加も理論的に厳密に計算することができると考えられる。しかしながら、実際上それは相当にむづかしい問題であるため、船体を細長体と仮定するなどして近似的な計算が行なわれている。従来から行なわれている抵抗増加の計算は前

Fig. 1 Resistance increase of Series 60 $C_b=0.8$ model

述のように主として船体運動に基づくものであるので、これに船首部からの反射波に基づく抵抗増加を単純に加えて、肥大船の波浪中抵抗増加を次のような形で推定することを試みた。

$$R_{AW} = R_{AW(0)} + R_{AW(1)} \quad (7)$$

$R_{AW(0)}$: 船体運動に基づく抵抗増加

$R_{AW(1)}$: 船首部からの反射波に基づく抵抗増加

2.4 船首部からの反射波に基づく抵抗増加

船首部からの反射波に基づく抵抗増加を厳密に計算することは、かなりむづかしい問題であるためここでは近似的な計算法を用いることにする。直立した筒体に作用する漂流力については別所⁷⁾の計算法もあるが、ここではもっと簡単に波長が無限小の場合の極限值である Havelock の drifting force の計算式を基礎にして、極く実用的な立場で船首部からの反射波に基づく抵抗増加を評価することとした。

波長の極めて短い波の中に直立した柱状体に作用する drifting force は、Havelock⁵⁾によって次のように与えられている。

$$D = \frac{1}{2} \rho g h_A^2 \int_{-B/2}^{B/2} \sin^2 \beta dy \quad (8)$$

これは Fig. 2 に示すように、 x 軸と傾斜 β をなす物体の表面に入射した波が、 x 軸と 2β 方向に完全に反射されたとしてその間の運動量変化から求められる。 $\overline{\sin^2 \beta} = \frac{1}{B} \int_{-B/2}^{B/2} \sin^2 \beta dy$ は、drifting force に対する船首部肥大度の影響の大きさを与える 1 つのパラメータであるのでこれを bluntness 係数と呼ぶことにする。

(8) 式を用いて抵抗増加を推定するには、有限喫水の影響および前進速度の影響を取り入れなければならない。この影響を表す修正係数をそれぞれ α_1, α_2 として、船首部からの反射波に基づく抵抗増加は次のような形で表わされるものと仮定する。

$$R_{AW(1)} = \alpha_1 (1 + \alpha_2) \frac{1}{2} \rho g h_A^2 B \overline{\sin^2 \beta} \quad (9)$$

ここで、 α_1 については vertical barrier の反射率 R の 2 乗を用いることとし、 α_2 については実験式を用いることとした。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= R^2 = \pi^2 I_1^2 / (\pi^2 I_1^2 + K_1^2), & I_1 &= I_1(kd) \\ \alpha_2 &= 5\sqrt{F_n} & K_1 &= K_1(kd) \end{aligned} \right\} \text{変形ベッセル関数}$$

なお、斜め波の場合には波方向を考慮に入れた $\overline{\sin^2 \beta}$ を用いなければならない。Fig. 3 は肥大船の抵抗増加の応答関数に対する $R_{AW(0)}$ と $R_{AW(1)}$ の寄与の割合を概念的に示したものである。

3 水槽試験

水槽試験は三菱重工業(株)長崎研究所の耐航性能水槽(長さ 160m×幅 30m×深さ 3.5m)で実施した。

3.1 斜め波中用重錘式抵抗動力計

斜め波中の抵抗増加計測用として試作した重錘式抵抗動力計の概念図を Fig. 4 に示す。このような方式は横運動に対して全く影響がないわけではないが、波浪中の抵抗増加には縦運動の影響が支配的であることを考えるとこの動力計ではほぼ正しく抵抗増加が計測されているものと考えられる。斜め波中試験は XY 曳引車を指定された方向および速度で運転し、模型船を指定の方位に保って曳航した。

Fig. 2 Wave reflection and the bluntness coefficient

Fig. 3 Components of the resistance increase of a full ship

Fig. 4 Scheme of the gravity dynamometer for oblique wave test

の抵抗増加を計測した。模型船の主要目を Table 1 に示す。波方向は $\mu=180^\circ \sim 135^\circ$ の範囲で 15° 毎に、波長は $\lambda/L=0.3 \sim 1.5$ 、波高は $h_w/L=1/75$ で実施した。

4 計算値と実験値の比較

4.1 船首部からの反射波に基づく抵抗増加

船首肥大度をシリーズに変更した4隻の肥大船型模型の短波長正面向波における波浪中抵抗増加係数の一例を

Fig. 5 Correlation between the bluntness and the resistance increase in shorter wave length range

Table 1 Principal particulars of the tested model

	Tanker
Length	L 3.000 m
Breadth	B 544.44 mm
Draft	d 216.22 mm
Displacement	Δ_a 299.95 kg
Block coeff.	C_b 0.8464
Water plane area coeff.	C_w 0.9200
L.C.B.	46.621 %
Longitudinal gyradius	k_{yy}/L 0.228
Metacentric height	GM 81.6 mm
Rolling period	T_ϕ 1.42 sec

3.2 供試模型船および試験条件

(1) 船首肥大度シリーズ試験

短波長域における抵抗増加と船首肥大度の関係を調査するため、Fig. 5 に示すような bluntness 係数 $\sin^2 \beta$ を種々変更した模型船について、正面向波 ($\mu=180^\circ$) の短波長域で抵抗増加の計測を行なった。

(2) タンカーの斜め波中試験

超大型タンカーの模型船について斜め波中

Fig. 6 Effect of draft and advance speed on the resistance increase due to bow reflection

Fig. 7 Measured and computed resistance increase in oblique waves for a tanker model

傾向とともに実験結果に近く、ここに示した計算法によって肥大船の抵抗増加を大略推定し得ると考えられる。

5 結 言

肥大船の波浪中における抵抗増加において波長の短い場合に見られる比較的大きな抵抗増加は、blunt な船首部からの反射波に基づくものと考え、これを従来から計算されている船体運動に基づく抵抗増加に加えさせることによって肥大船の抵抗増加がほぼ推定できることを示した。この方法は実験結果を参照しつつ実用的な立場で求めた極く近似的な方法であるので、今後この量を理論的に正しく計算してみなければならない。また斜め波中の抵抗増加を計測することを試みたが、試験法としても確立されたものではないので、これについてもさらに検討を加える必要がある。

終りに、この研究の実施にあたり実験および解析に尽力いただいた三菱重工業(株)長崎研究所耐航性能水槽の朝長義英氏はじめ実験室の諸氏、ならびに電算プログラムの作成にあたった貞包令子嬢に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 丸尾 孟: Resistance in Waves, Researches on Seakeeping Qualities of Ship in Japan, Chap. 5, 造船協会 60 周年記念叢書, Vol. 8, (昭和 38 年).
- 2) Gerritsma, J. and Beukelman, W.: Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, I. S. P., Vol. 19, No. 217, (Sept. 1972).
- 3) 藤井 齊, 高橋 雄: 正面規則波中における抵抗増加, 三菱重工技報, 第 4 巻, 第 6 号, (昭和 42 年 11 月).
- 4) 細田龍介: 斜波中における船体抵抗増加に関する研究, 造船学会論文集第 133 号, (昭和 48 年 6 月).
- 5) Havelock, T. H.: The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle, P. R. S. Series A, No. 963, Vol. 175, (July, 1940).
- 6) Strom-Tejsen, J., Yeh, H. Y. H. and Moran, D. D.: Added Resistance in Waves, T. S. N. A. M. E. Vol. 81, (1973).
- 7) 別所正利: 固定筒体に及ぼす波の圧力について, 造船協会論文集第 101 号, (昭和 32 年 8 月), 同(続報), 同第 102 号, (昭和 33 年 2 月), 同(第 3 報), 同第 103 号, (昭和 33 年 7 月).

Fig. 5 に示す。この図に見られるように抵抗増加係数は $\overline{\sin^2 \beta}$ にほぼ比例しており、 $\overline{\sin^2 \beta}$ は抵抗増加に対する船首肥大度の影響を示すパラメータとして妥当なものであると考えられる。Fig. 6 は有限喫水の影響と前進速度の影響について実験値と(9)式による計算値とを比較したもので、この図に見られるように船首部からの反射波に基づく抵抗増加は(9)式によってほぼ近似し得るものと考えられる。

4.2 斜め波中の抵抗増加

超大型タンカーの模型船の斜め波中における抵抗増加の実験値を計算値と比較して Fig. 7 に示す。実験結果を見ると $\lambda/L=1.0, 1.25, 1.5$ では斜め波の方が抵抗増加が少なくなる傾向にあるが、 $\lambda/L=0.75$ では $\mu=180^\circ$ よりも $\mu=135^\circ$ の方が抵抗増加が大きくなっている。これは $\mu=135^\circ$ の方が船体運動による攪乱の度合いが大きいためと考えられる。 $\sigma_{AW(1)}$ を加えた計算結果は $\lambda/L=0.5 \sim 1.5$ の範囲でオーダーおよび