肥型船の波浪中抵抗増加に及ぼす波高影響

正会員 安川 宏紀*

正会員 松本 晃範**

正会員 池添 修自***

Wave Height Effect on Added Resistance of Full Hull Ships in Waves

by Hironori Yasukawa, *Member*
Shuji Ikezoe, *Member*

Akinori Matsumoto, *Member*

Summary

The wave height effect on the added resistance in waves is investigated by carrying out the resistance test in regular head waves with changing the incident wave heights for three full hull ships with different block coefficient from 0.81 to 0.87. Using the response amplitude of ship motions and the added resistance coefficient obtained in the regular wave tests, the short-term prediction is conducted and the prediction results are compared with the results obtained in irregular wave tests. As a result, the followings are obtained. Strictly, added resistance in regular waves is not proportional to square of incident wave amplitude, although the exponent should be two theoretically. (The exponent is called ‘exponent of wave height effect’ in this paper.) Particularly, in the range of $\lambda/L < 0.7$ where λ/L means the wave length-ship length ratio, the exponent of wave height effect is significantly smaller than 2.0. On the other hand, the exponent becomes close to 2.0 in the range of $\lambda/L > 0.7$. The averaged values of the exponent for three full hull ships are 1.77 for full load condition and 1.91 for the ballast load condition. The wave height effect of the regular waves for the response amplitude on the short-term prediction of heave and pitch is negligible. Generally, there is a tendency that the short-term prediction of the added resistance becomes larger when the regular wave test results with lower incident wave height are used. The prediction accuracy of the added resistance in irregular waves of a larger wave height case is improved by use of the regular wave test results with the corresponding larger wave height.

1. 緒言

波浪中抵抗増加の計測は規則波中で行われることが多い。これは、波長に対する抵抗増加の特性を知ることができ、船型設計に有益であるためと考えられる。しかしながら、実際の海面は不規則波であるため、不規則波中での抵抗増加を別途求める必要が生じる。具体的には、得られた規則波中における抵抗増加を入射波波振幅の二乗で無次元化した係数を用いて短期予測計算を行い、不規則波中での抵抗増加を求めることが多く行われている¹⁾。この短期予測計算では、抵抗増加は波振幅の二乗に比例するという性質を利用して、線形重ね合わせが用いられる。これは、ポテンシャル理論をベースとした線形的な考え方において正しい²⁾。実際、Gerritsma等は、方形係数 (C_b) が 0.564 の高速貨物船を対象船として水槽試験を行い、波浪中抵抗増加はおおよそ波高の二乗に比例すると報

告している³⁾。しかし、波高を変更させた規則波中での抵抗試験を実施すると、抵抗増加は必ずしも波振幅の二乗には比例しないことがあると報告されている⁴⁾。近年では、井畑等が $C_b = 0.69$ 程度のノンバラスト船研究の一環として、波浪中抵抗増加に及ぼす波高影響について調査しており、抵抗増加は波振幅の二乗には比例しないとしている⁵⁾。もし、抵抗増加が波振幅の二乗に比例しない場合があるとすれば、それは上記短期予測計算の理論的根拠を失わせるものである。従って、抵抗増加が波振幅の二乗に比例するのかわからないのか、慎重な検討が必要であり、現状では明確な結論は出ていない。

一方、近年では、 C_b が 0.85 を越えるような肥型船が出現しており、そのような“超”肥型船において、抵抗増加に及ぼす波高影響に関する従来の知見がそのまま使用できるのか、確認しておく必要がある。そこで本研究では、改めて、波高を変えた波浪中試験を実施し、抵抗増加に及ぼす波高の影響を調査する。対象とした船は、方形係数 $C_b = 0.81, 0.84, 0.87$ のシリーズ模型船⁶⁾であり、抵抗増加に及ぼす波高影響とともに、 C_b の影響も把握できる。波高は2種類変化させ、波高によって、船体運動や抵抗増加係数がどのように変化するのか調査する。さらに、異なる波高条件下で得られた抵抗増加係数の試験結果を基に短期予測計算を行う。得られた短期予測計算結果

* 広島大学大学院工学研究院

** 日本海事協会 (研究当時、広島大学大学院工学研究科)

*** ジャパンマリンユニティッド
(研究当時、広島大学大学院工学研究科)

は、不規則波中における水槽試験結果と比較し、抵抗増加に及ぼす波高影響を議論する。なお、本論文では、正面向波中における問題のみを対象とする。

2. 対象船

本研究では、 C_b を系統的に変化させた 3 隻を対象とする⁶⁾。Fig.1 に 3 隻のボディプランを示す。Tables 1, 2 に実船と模型船の主要目を示す。表中、 L は船の垂線間長、 B は船幅、 D は船の深さ、 d は船の平均喫水 (d_a は船尾吃水、 d_f は船首吃水)、 τ はトリム、 ∇ は船の排水容積、 x_G は浮心の長さ方向位置座標 (ミドシップよりも前方が正) を意味する。スケール比は 1/110 である。S-Cb81 は、 $C_b = 0.81$ の船型であり、KVLCC2 と呼ばれる船⁷⁾ のことである。これに対して、主要目と船首尾部のプロファイルは同一とし、 C_b を 0.84, 0.87 と系統的に変化させたのが、S-Cb84, S-Cb87 である。この 3 隻はシリーズ船となっており、 C_b による性能の違いが把握できる。水槽試験は、満載状態 (Full と記載) とバラスト状態 (Ballast と記載) の 2 状態で行った。その際、本船のバラスト状態は独自に設定した。

Fig. 1 Comparison of body plans (top: S-Cb81, middle: S-Cb84, bottom: S-Cb87).

3. 規則波中抵抗試験

広島大学船型試験水槽で試験を実施した。

3.1 試験の概要

規則波中抵抗試験では、抵抗、上下揺、縦揺、前後揺、出会い波高、FP 位置上下加速度を計測した。なお、本報告では、上下揺、縦揺、抵抗増加についてののみ言及する。船速と波の条件は次の通りである。

- Full: 0.760 m/s (実船で 15.5 kn, L ベースのフルード数 (F_n) で 0.142)。Ballast: 0.785 m/s (実船で 16kn, F_n で 0.147)。

Table 1 Principal particulars of ships

	SHIP		
NAME	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
L (m)	320.00		
B (m)	58.00		
D (m)	34.00		
CONDITION	FULL		
d (m)	20.80		
d_a (m)	20.80		
d_f (m)	20.80		
τ (m)	0.00		
∇ (m ³)	313000	324000	336000
S (m ²)	27200	27900	28700
x_G (m)	-11.33	-9.59	-7.85
C_b	0.810	0.840	0.870
CONDITION	BALLAST		
d (m)	13.20		
d_a (m)	15.12		
d_f (m)	11.28		
τ (m)	3.84		
∇ (m ³)	187000	195000	203000
S (m ²)	21700	22300	23100
x_G (m)	-8.87	-6.81	-4.83
C_b	0.765	0.797	0.830

Table 2 Principal particulars of ship models

	MODEL		
NAME	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
L (m)	2.9091		
B (m)	0.5273		
D (m)	0.3091		
CONDITION	FULL		
d (m)	0.1891		
d_a (m)	0.1891		
d_f (m)	0.1891		
τ (m)	0.0000		
∇ (m ³)	0.2348	0.2437	0.2524
S (m ²)	2.2461	2.3080	2.3749
x_G (m)	-0.1030	-0.0871	-0.0714
C_b	0.810	0.840	0.870
CONDITION	BALLAST		
d (m)	0.1200		
d_a (m)	0.1375		
d_f (m)	0.1025		
τ (m)	0.0349		
∇ (m ³)	0.1408	0.1468	0.1528
S (m ²)	1.7903	1.8497	1.9087
x_G (m)	-0.0807	-0.0619	-0.0439
C_b	0.765	0.797	0.830

- 波高 (H_w) の目標値: 30 mm, 50 mm (各々実船で 3.3 m, 5.5 m)
- 波長船長比: λ/L : 0.35~1.25 の 0.05 刻み、それに加えて、1.5, 2.0, 2.5。

波方向は正面向波のみである。試験を行うにあたって、縦揺に関する慣動半径は、Full, Ballast とともに $0.25L$ となるように調整した。

計測された時刻歴データは、フーリエ級数解析を行い、動揺や波高については、1 次の項の結果を振幅とした。波浪中抵抗については、0 次の項の結果を、波浪中抵抗の平均値として採用した。なお、上下揺、縦揺、抵抗増加の試験結果は次式に

従って無次元表示する．

- 上下揺振幅の無次元値： z_a/h_a
- 縦揺振幅の無次元値： $\theta_a/(Kh_a)$
- 抵抗増加の無次元値 (抵抗増加係数)： $C_{AR} = R_{AW}/(\rho gh_a^2 B^2/L)$

ただし、 ρ は水の密度、 h_a は波振幅 ($=H_w/2$)、 K は入射波の波数、 R_{AW} は波浪中抵抗増加、 g は重力加速度である．

3.2 水槽試験結果

3.2.1 入射波

最初に、基礎となる入射波の計測結果について述べる．入射波の波高は、 λ/L が 0.4～1.25 の設定値に対して、波高 (H_w) の目標値である 30 mm, 50 mm で一定とする必要がある．それを確認すべく、Fig.2 に、一例として、S-Cb81(Full) における波高 (H_w) の計測結果ならびに λ/L に対する 2 つの波高の波粗度の逆数 (λ/H_w) を示す．また、そのときの Full における λ/L が 0.4～1.25 における入射波波高の平均値、標準偏差、変動係数を Table 3 に示す．今回行った試験では、波高 30 mm の目標に対して平均 30.7 mm、波高 50 mm の目標に対して平均 51.0 mm であった．また、波高別全データで解析すると、5.0～6.4% の変動が見られるが、これ以上変動を小さくすることは困難であった．波高 30 mm のとき波粗度の範囲は 1/39～1/130、波高 50 mm のとき波粗度の範囲は 1/23～1/76 であった．波の線形性の目安として、波粗度 1/30 が示されているが⁸⁾、波高 50 mm の短波長域において一部それを越えている．

Fig. 2 Measured results of wave heights and wave slopes for S-Cb81 (full load)

3.2.2 船体動揺と波浪中抵抗増加

Fig.3 に上下揺振幅、Fig.4 に縦揺振幅の比較を示す．図中、○が波高の目標値 30 mm の結果、△が波高の目標値 50 mm の結果である．比較のため、New Strip 法 (NSM)⁹⁾ による理論計算結果 (Cal. と記載) を併記している．いずれの船型ならびに载荷状態において、異なる波高に対する振幅の無次元値は両者おおよそ一致しており、船体動揺に対する波高の非線形影響は小さいことが分かる．なお、上下揺と縦揺の入射波に対する位相もまた、異なる波高に対し有意な差違は無かったことを付記する．また、3 船型の船体動揺を比較すると、おおよそ同じ大きさであり、 C_b の影響は小さい．NSM による運動振幅の計算結果は、Full, Ballast ととも、水槽試験結果におおよそ

Table 3 Averaged value and standard deviation of the measured wave heights (full load)

	$H_w=30\text{mm}$		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value (mm)	30.73	31.21	30.07
Standard devi. (mm)	1.81	1.67	1.13
Variance coef. (%)	5.89	5.35	3.77
All averaged value (mm)	30.67		
All standard devi. (mm)	1.54		
All variance coef. (%)	5.00		
	$H_w=50\text{mm}$		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value (mm)	50.05	51.82	51.07
Standard devi. (mm)	2.66	3.84	3.33
Variance coef. (%)	5.32	7.42	6.53
All averaged value (mm)	50.98		
All standard devi. (mm)	3.28		
All variance coef. (%)	6.42		

一致してる．ただし、Ballast における上下揺については、理論計算結果にハンブ・ホローが見られるのに対し、水槽試験結果にはそのような現象は見られず、定性的傾向が異なる．

Fig.5 に波浪中抵抗増加係数の比較を示す．なお、著者保有の計算プログラムによる抵抗増加の計算精度が悪かったので、計算結果は併記していない．3 船型の抵抗増加係数を比較すると、いずれの λ/L において、 C_b の大きな船型ほど大きくなる傾向がある．Figs.3, 4 から分かるように、3 船型の船体動揺に大きな差違は無いので、3 船型における抵抗増加の差違は、主に反射波に関連した抵抗増加成分から来るものと考えられる．また、いずれの船型ならびに载荷状態において、波高が小さいときの抵抗増加係数の方が、波高が高いときのそれよりも大きくなるという傾向が見られる．特に、Full における短波長域において、この傾向は顕著のようである．このことから、抵抗増加は必ずしも波高の二乗に比例するわけではないことが分かる．特に、S-Cb84, S-Cb87 の Full ならびに Ballast の波高 30 mm の結果において、 $\lambda/L = 0.55$ 付近で抵抗増加係数が一旦大きくなるという傾向が見られるが、波高 50 mm の結果にはそのような傾向は見られない．これは、波長・船長比に対する抵抗増加係数の傾向は、波高によって、定量的だけではなく、定性的にも変化することを示している．なお、このような現象が現れる理由を探るべく、試験画像等を用いた調査検討を行ったが、明確な結論は得られていない．実際には、波高に対する複雑な非線形影響が存在することが示唆される．

3.3 抵抗増加の波高影響指数

抵抗増加は実際には波振幅の何乗に比例するのか、この乗数のことを本論文では「波高影響指数」と呼ぶこととし、水槽試験結果からこの波高影響指数を求める．本水槽試験では、波高を 2 種類だけ変更したことに注意して、波振幅 h_1 のときの波浪中抵抗増加を R_{a1} 、波振幅 h_2 のときの波浪中抵抗増加を R_{a2} とおく．波高影響指数を β とすると、定義より、

$$R_{a2}/R_{a1} = (h_2/h_1)^\beta \quad (1)$$

Fig. 3 Comparison of heave amplitude ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

Fig. 4 Comparison of pitch amplitude ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

であるので、

$$\beta = \log_{\alpha} \left(\frac{R_{a2}}{R_{a1}} \right) \quad (2)$$

となる。ただし、 $\alpha = h_2/h_1$ である。もしも、波浪中抵抗増加が波振幅の二乗に比例するのであれば $\beta = 2$ となる。

Fig.6 に、 C_b シリーズ船 3 隻の β を λ/L ベースに整理した

Fig. 5 Comparison of added resistance coefficient ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

結果を示す。図より、Full, Ballast の短波長域において、 β は 1.2~2 程度と、2 を下回ることが分かる。一方、長波長領域では β はおよそ 2 ではほぼ一定である。Table 4 に、各船毎に求めた λ/L (0.4~1.25 の範囲) に対する全 β の平均値とその標準偏差を示す。全ての船で、 β の平均値は 2 より小さくなっており、変動係数は最大で 13.6% (S-Cb87 Full において) である。3 船型全部のデータを用いて、波高影響指数の平均値を求めると、Full における β は 1.77、Ballast におけるそれは 1.91 であった。船型と波高影響指数の平均値との関係を見ると、 C_b が大きくなると β は小さくなり、変動係数は大きくなる傾向があるが、顕著なものではない。

3.2.2 節で述べたように、抵抗増加係数において、波高 30 mm の結果においてのみ、 $\lambda/L = 0.55$ 付近で値が一旦大きくなるという現象が見られた。その結果、Fig.6 において、 $\lambda/L = 0.7$ よりも小さい短波長域では、 β が急に変化するもしくは値がばらつく結果になっていると考えられる。そこで、 λ/L に対する全データを用いた場合と $\lambda/L > 0.7$ のデータを用いた場合で、 β の平均値と標準偏差にどの程度の差違が現れるか比較を行った。Table 5 に、 $\lambda/L > 0.7$ のデータを用いた場合の波高影響指数の平均値と標準偏差を示す。 $\lambda/L < 0.7$ の短波長域でのデータを除くことにより、

- Full において、 β の平均値：1.77 → 1.85，変動係数：10.7% → 4.5%
- Ballast においては、 β の平均値：1.91 → 1.97，変動係

数：7.1% → 4.2%

と、 β は 2 に近づく方向に、また変動係数は小さくなる方向に変化する。まとめると、 $\lambda/L < 0.7$ の短波長域を除けば、 β はおよそ 2 であり、波浪中抵抗増加は波高の二乗に比例すると言える。一方、短波長域では、 β は小さくなるとともに、ばらつきが大きくなる。

Fig. 6 Exponent of wave height effect β versus λ/L

Kashiwagi¹⁰⁾ は、規則波中を航行する特にプラントな船首形状を持つ船の抵抗増加に関連して、定常造波の碎波現象の影響が見られることを報告している。今回の水槽試験においても、 $\lambda/L < 0.7$ のような短波長域では、長波長域に比べて、船首部で顕著な波崩れが観察されており、その影響で船体抵抗となるべきエネルギーが散逸し、 β が 2 より小さくなったのではないかと推察される。なお、波崩れの程度は、3 船型ともおお

Table 4 Averaged value and standard deviation of the exponent of wave height effect

Condition	Full		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value	1.83	1.74	1.75
Standard devi.	0.14	0.19	0.24
Variance coef.(%)	7.43	11.02	13.63
All averaged value	1.77		
All standard devi.	0.19		
All variance coef.(%)	10.70		
Condition	Ballast		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value	1.93	1.92	1.88
Standard devi.	0.13	0.13	0.14
Variance coef.(%)	6.68	6.89	7.62
All averaged value	1.91		
All standard devi.	0.13		
All variance coef.(%)	7.06		

Table 5 Averaged value and standard deviation of the exponent of wave height effect by use of the data in range of $\lambda/L=0.70 \sim 1.25$

Condition	Full		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value	1.83	1.87	1.87
Standard devi.	0.07	0.08	0.10
Variance coef.(%)	3.60	4.52	5.42
All averaged value	1.85		
All standard devi.	0.08		
All variance coef.(%)	4.51		
Condition	Ballast		
Ship name	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87
Averaged value	1.98	1.98	1.95
Standard devi.	0.12	0.05	0.08
Variance coef.(%)	6.11	2.44	3.92
All averaged value	1.97		
All standard devi.	0.08		
All variance coef.(%)	4.16		

よそ同じであった。また、Full よりも Ballast の方がわずかに $\beta = 2$ に近い。本対象船の Ballast 状態においては、船首スラミングのような強非線形運動は発生しておらず、そのため Full における β に近い値が得られたものと考えられる。なお、船首スラミングが発生するような場合には、 β が顕著に小さくなる傾向があり、それについては別途 Appendix にとりまとめた。

4. 不規則波中抵抗試験

本検討により、肥型船においては、波浪中抵抗増加は波振幅の二乗に比例しない場合のあることが確認された。これは、入射波振幅の二乗で無次元化した抵抗増加係数を用いて短期予測計算を行い、不規則波中での抵抗増加を求める手法の妥当性に疑義が生じたことを示すものである。しかしながら、仮に理論的に問題があったとしても、その程度によっては、工学的に許容できる場合があることも考えられる。そこで次に、異なる波高における規則波中試験で得られた結果を基に短期予測計算を行い、それらを不規則波中における水槽試験結果と比較する。両者を比較することにより、船体運動や抵抗増加に及

ぼす波高影響について議論する。

4.1 試験の概要

Table 6 に、不規則波中抵抗試験で設定した波の条件 (有義波高 $H_{1/3}$ と平均波周期 T_z) を示す。実船のシーステート (SS) 5, 6, 7 を模擬することとした。波スペクトルとして、ITTC スペクトルを使用し、長波頂不規則波中での試験を実施した。十分な数の出会い波を得るため、1 つの波状態に対して、不規則波生成の際の位相項を変化させ、計 8 回航走させた。8 回の航走はおよそ、SS5 で 400 波、SS6 で 350 波、SS7 で 300 波の出会い波に相当する。

不規則波中抵抗試験での模型船の状態、計測項目、船速等の条件は規則波中試験でのそれらと同じにした。計測された時系列データは、縦揺、上下揺に関してはゼロアップクロス法を用いて有義値を求め、波浪中抵抗に関しては、平均をとって値を求めた。

Table 6 Irregular wave test condition: sea state

	SHIP		MODEL	
	$H_{1/3}$ (m)	T_z (s)	$H_{1/3}$ (mm)	T_z (s)
SS5	4.00	7.72	36.4	0.736
SS6	6.00	9.46	54.5	0.902
SS7	9.00	11.58	81.8	1.104

4.2 波検定の結果

Table 7 に波検定で得られた有義波高 $H_{1/3}$ と平均周期 T_z の比較を示す。計測された有義波高と平均周期は、目標値との間に若干の差が見られるが、実用上問題の無いレベルと考えられる。Fig.7 に波スペクトルの比較を示す。計測された波スペクトル (measured と記載) は、低周波数域において、目標スペクトル (target と記載) との間に差異が見られるが、それを除くと、おおよそ一致していると言える。

Fig. 7 Comparison of wave spectrum

4.3 短期予測計算と水槽試験結果の比較

Figs.8, 9 に、実船の船体動揺 (上下揺、縦揺) の有義値の不規則波中抵抗試験と短期予測計算との比較を示す。横軸は有

Table 7 Measured $H_{1/3}$ and T_z in irregular wave test

	$H_{1/3}$ (mm)		T_z (s)	
	target	measured	target	measured
SS5	36.4	41.4	0.736	0.810
SS6	54.5	54.9	0.902	0.930
SS7	81.8	84.5	1.104	1.100

義波高 $H_{1/3}$ 、縦軸は船体運動の有義値を表しており、図中の 30mm は規則波試験の目標波高 30mm の試験結果を用いて短期予測計算を行ったことを意味する (50mm の場合も同様)。短期予測計算において、今回実施した規則波中試験で得ることのできなかった範囲の船体動揺については、Figs.3, 4 に示した理論計算結果を用いた。船体運動は、 $H_{1/3}$ が高くなると増大するのは自明であり、それに加えて C_b が大きくなると減少する傾向がある。短期予測計算は、そのような傾向を捉えている。また、上下揺の短期予測計算結果は、不規則波中試験結果よりも全般的に大きめである。一方、縦揺のそれは、 $H_{1/3}$ が低いときには大きめ、 $H_{1/3}$ が高いときに小さめとなっている。S-Cb81 Full において、波高が小さい場合の規則波中試験結果を用いた短期予測計算は、波高が大きい場合のそれよりも大きくなる傾向があるが、それを除くと、上下揺、縦揺ともに、異なる波高の規則波中試験結果を用いて短期予測計算を行っても、大きな差は見られない。船体動揺の短期予測計算に及ぼすそのような波高影響は、実用上無視できると考えられる。

Fig.10 に、実船の波浪中抵抗増加平均値の不規則波中抵抗試験と短期予測計算結果との比較を示す。短期予測計算において、今回実施した規則波中抵抗試験で得ることのできなかった範囲の抵抗増加係数については、次のように取り扱うこととした。 λ/L が 0.4 以下の場合、 $\lambda/L=0.4$ の抵抗増加値を用いる。また、 λ/L が 2.5 以上の場合、抵抗増加係数は 0 とする。

2 つの抵抗増加の短期予測計算結果は、ベースとなる規則波中試験における波高が低くなるほど大きくなる。これは、波高の非線形影響による。Table 6 に示したように、実船での $H_{1/3} = 4, 6, 9\text{m}$ は模型における $H_{1/3} = 36, 55, 82\text{mm}$ におおよそ相当する。波高 30mm における規則波試験結果を用いて抵抗増加の短期予測計算を行うと、 $H_{1/3} = 4\text{m}$ 付近において、水槽試験結果との一致度が良く、また、波高 50mm における規則波試験結果を用いて短期予測計算を行うと、 $H_{1/3} = 6\text{m}$ 付近において、水槽試験結果との一致度が良い。一方、 $H_{1/3}$ が 9m を越えた場合、全般的に水槽試験結果との一致度が悪い。Table 8 に、 $H_{1/3}$ が 9m における水槽試験結果に対する抵抗増加の短期予測計算値の比 (実験値に対する誤差の比率) を示す。この値がゼロであれば両者は一致していることを、また正の場合には短期予測計算値が水槽試験結果よりも大きいことを意味する。表から次のことが分かる。波高 30mm における規則波試験結果を用いるよりも、波高 50mm における規則波試験結果を用いる方が、抵抗増加の短期予測値との一致度は改善される。しかしながら、波高 50mm における規則波試験結果を用いた短期予測計算値は、3 船の平均値で 6% ~ 10%

大きく、精度的には不十分である。その理由は、規則波中試験における波高が低いためである可能性が考えられる。また、3 船の誤差の比率を比較すると、S-Cb81 の値だけが小さく、S-Cb84, 87 の値が大きい。これは、full, ballast ともに同じ傾向である。これは、 C_b の大きな船の方が抵抗増加における波高の非線形影響が大きいことを示すものである。ただ、その影響は C_b に比例するようなものではなく、例えば、ある C_b を超えると急に非線形影響が顕著となるようなものであると考えられる。

Table 8 Difference ratio of short-term prediction results to experiments in irregular waves ($H_{1/3} = 9\text{m}$)

Full load				
target	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87	averaged
30 mm	5.5%	29.0%	24.3%	19.6%
50 mm	-4.1%	12.2%	10.4%	6.2%

Ballast load				
target	S-Cb81	S-Cb84	S-Cb87	averaged
30 mm	8.4%	20.6%	16.3%	15.1%
50 mm	2.4%	12.6%	14.1%	9.7%

5. 結 言

C_b シリーズ船 3 隻の模型船を用いて、波高を 2 種類変化した場合の規則波中抵抗試験を実施し、波浪中抵抗増加に及ぼす波高の影響について検討した。さらに、規則波中試験で得られた船体応答と抵抗増加の結果を用いて短期予測計算を行い、不規則波中抵抗試験結果と比較を行った。得られた知見をまとめると次の通りである。

- 本シリーズ船 3 隻を平均すると、Full での抵抗増加は波高の 1.77 乗、Ballast でのそれは 1.91 乗に比例する (なお、 λ/L が 0.4~1.25 の範囲での平均)。厳密には、規則波中における波浪中抵抗増加は波高の二乗に比例しない。特に、 $\lambda/L < 0.7$ の範囲では二乗よりも小さくなり、一方、 $\lambda/L > 0.7$ の範囲では二乗に近づく。
- 上下揺、縦揺の短期予測計算に及ぼす規則波中での入射波の波高の影響は、実用上無視できる。
- 波浪中抵抗増加の短期予測計算に及ぼす規則波中での入射波の波高の影響は無視できない。規則波試験結果を用いてある有義波高における不規則波中抵抗増加の平均値を求めるとき、その有義波高に近い波高の規則波中試験結果を用いると、予測精度が向上する傾向がある。
- 本シリーズ船 3 隻において、予想された通り、 C_b が大きくなると抵抗増加係数が大きくなる。また、 C_b が大きくなると、波高影響指数の平均値は 2.0 よりも小さくなり、そのばらつきが大きくなる傾向が見られる。

本研究を通じて、肥型船の波浪中抵抗増加における複雑な非線形影響が存在することを示すことができたが、わずか 3 隻

Fig. 8 Comparison of heave significant value between experiment and short-term prediction ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

Fig. 9 Comparison of pitch significant value between experiment and short-term prediction ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

Fig. 10 Comparison of averaged value of added resistance between experiment and short-term prediction ($F_n=0.142$ for full load, and $F_n=0.147$ for ballast load)

の肥型船を対象としたものである。今後は、水槽試験の計測精度を一層向上させ、同様な検討を他の船種、異なる船速、種々の波方向で実施する必要があると考えられる。今後の課題として、

謝 辞

本研究の一部は、西部造船会技術研究会からの支援によって行われた。ここに記して、感謝の意とする。

参 考 文 献

- 1) 丸尾 孟：波浪中の抵抗増加に関する研究(第2報 抵抗増加の本質について)，造船協会論文集 第108号(1960)，pp.5-13.
- 2) 丸尾 孟：波浪中の抵抗増加に関する研究(第1報)，造船協会論文集 第101号(1957)，pp.33-39.
- 3) Gerritsma, J. and Beukelman, W.: Analysis of the Resistance Increase in Waves of a Fast Cargo Ship, International Shipbuilding Progress, Vol.19 (1972), pp.285-293.
- 4) 高橋 肇：方形係数の違いが規則波中の抵抗増加と動揺に与える影響の研究，造船協会誌 第391号(1962)，pp.9-18.
- 5) 井畑里和，三宅成司郎，池田良穂，船越弘睦：大型肥大船の波浪中抵抗増加に及ぼす波高および船速影響に関する

実験的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集 第17号(2013)，pp.281-284

- 6) 安川宏紀，佐野将昭，平田法隆，米舩 勲，加山靖高，橋詰泰久：方形係数シリーズ肥型船の操縦性能(第一報：水槽試験)，日本船舶海洋工学会論文集 第21号(2015)，pp.11-22.
- 7) SIMMAN 2008: Part B Benchmark Test Cases, KVLCC2 Description, Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Method, Workshop Proc., Vol.1 (2008), Copenhagen, page B7-B10.
- 8) 柏木 正，岩下英嗣：船舶海洋工学シリーズ，船体運動耐航性能編，成山堂書店(2012)，pp.71.
- 9) 渡辺 巖，土岐直二，伊東章雄：第2章 ストリップ法，耐航性理論の設計への応用，運動性能研究委員会 第11回シンポジウム，日本造船学会(1994)，pp.167-187.
- 10) Kashiwagi, M.: Hydrodynamic Study on Added Resistance using Unsteady Wave Analysis, J. Ship Research, Vol.57, No.4 (2013)，pp.220-240.

A 波高影響指数に及ぼす B/d の影響

本文中に示した実験では，Full よりも Ballast の方が $\beta = 2$ に近い結果となっているが，他の船型では必ずしもそうはならない。Fig.11 に，横軸に対象とする船の幅・吃水比 B/d を

とったときの、波高影響指数平均 (β_{mean}) を示す。波高影響指数平均は、 λ/L 毎に得られる波高影響指数の全平均値を意味する。これは、広島大学船型試験水槽で実施されたその他の肥型船 18 隻の水槽試験結果から求めたものを図示したものである。全 18 隻の模型船の要目比や水槽試験を行ったときの波に関する条件は次の通りである。

- L/B の範囲：5.00～7.60
- B/d の範囲：Full で 2.61～3.45, Ballast で 4.40～7.45
- C_b の範囲：0.8～0.9
- H_w/L の範囲：0.010～0.027
- λ/L の範囲：0.4～1.2

Fig.11 の横軸に B/d を採った理由は、種々の船型パラメータに対して、 B/d だけは β_{mean} と強い相関を示したためである。図中、Ballast の β_{mean} のフィッティングライン (図中、mean (Ballast) と記載) を入れている。その決定係数は 0.628 と、比較的強い相関が示されている。これを見ると、特に、 B/d が大きくなると、波高影響指数平均は 2 よりも顕著に小さくなる傾向のあることが分かる。なお、本船の Ballast 状態での B/d は 4.4 であり、Fig.11 から分かるように、最も B/d が小さい部類に属する。

B/d と β_{mean} との相関が高い理由を探るために、ballast において、 B/d が一番大きかった船 (Ship L と呼ぶ) と、 B/d が一番小さかった船 (Ship S と呼ぶ) の、短波長域における船首部周りの造波の様子を、水槽試験において記録した画像と比較した。その結果、Ship L の船首部には顕著な砕波が発生しており、さらに船体動揺が大きなところでは、船首スラミングが発生していることを確認した。それに対し、Ship S では、Ship L と比較すると、砕波の範囲が小さく、船首スラミングは発生していないことを確認した。一般に、 B/d が大きく幅広になると、船首部での波崩れが顕著となり、かつ船首スラミングが発生しやすくなる。その影響で船体抵抗として作用すべきエネルギーが散逸し、 β_{mean} が 2 より小さくなるのではないかと推察される。

Fig. 11 Averaged exponent of wave height effect versus B/d