浅水試験による抵抗・自航性能と船速・馬力評価

正会員 藤 沢 純 一*
正会員 辻 本 勝*

正会員 深 澤 良 平*

Evaluation of Resistance and Propulsion Performance by Shallow water Tests and Powering in Shallow Water

by Junichi Fujisawa, *Member* Ryohei Fukasawa, *Member*
Masaru Tsujimoto, *Member*

Summary

When a ship is carried out speed/power trials in shallow water, the measured power is larger than that in deep water. To correct the effect the method is recommended by ITTC and standardized by ISO.

In ITTC a method by Raven, which corrects viscous resistance considering the squat effect is proposed to alter the method by Lackenby which corrects the speed.

In order to evaluate the shallow water performance, resistance and propulsion tests were carried out using a tank which can perform the tests in both deep and shallow waters. The engine power estimated by the results of the tank tests, Lackenby method and Raven method have been compared and evaluated.

From the evaluation it is clarified that Raven method shows lower engine power than Lackenby method and can be applied for the shallow water correction by means of conservative correction.

1. 結 言

船舶が浅水域を航行する場合、抵抗の増加、推進効率の低下、船体沈下量の増加、造波の増大などの現象が知られているが、浅水域の試験が行える曳航水槽は限られており深水域に比べると試験結果の報告例は少ない。

海上技術安全研究所（海技研）所有の三鷹第3 船舶試験水槽（中水槽）は浅水域試験設備を有しており¹⁾、深水域および浅水域での試験を行うことができる。本施設を用いて浅水試験が行われており、いくつかが公表されている^{2),3),4),5),6)}ほか、外部機関による試験も行われている⁷⁾。

著者らは船型が公表されている Japan Bulk Carrier⁸⁾ (JBC) 模型船を用い、中水槽において深水域、浅水域での抵抗、自航試験、航走波計測を行い、浅水域におけるブロック係数修正を行うことで修正した船速で試験の解析を行い、それぞれ比較した。

馬力の浅水修正方法として従来 Lackenby 法⁹⁾が用いられているが、新たに Raven 法¹⁰⁾が提案された。今回模型試験により得られた浅水状態の船速・馬力推定結果を用い、検証

の一例として両手法について比較検討し、妥当性評価を行ったので報告する。

2. 水槽試験

供試模型船および模型プロペラの主要目を Table 1 および Table 2 に、中水槽の主要目を Table 3 に示す。浅水試験における装置の配置を Fig. 1 に示す。副部として本模型船にはビルジキール（模型長さ 1.2069m）および舵を装備している。船尾は省エネデバイスとしてダクトを装着できる形状となっているが装着していない。

抵抗動力計などの計測装置は深水域、浅水域ともに共通であり、同じ精度での計測が行われる。対水流速に関しては深水域においては計測しているが、浅水域においては設置上の都合により計測は行っていない。

模型プロペラは直径が小さく、自航試験では低レイノルズ数で作動することから、乱流促進のため翼の正面、背面の前縁側にトリップワイヤーを取り付けた。プロペラ単独試験（POT）もトリップワイヤーが取り付けいた状態で実施している。なお浅水域では POT は行っておらず、深水域で得られたプロペラ単独特性（POC）を用いて自航解析を行った。

試験は満載、オープン状態で行った。水深を示すパラメータとして水槽底から喫水までの H 、船尾喫水 d_A を用い H/d_A

* 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

で表した. 水深は H/d_A が 11.95, 2.78, 2.16, 1.42 の 4 種類を実施した. $H/d_A=11.95$ を深水域, それ以外を浅水域とする.

Table 1 Principal Particulars of Ship Model.

		Model	Ship
NMRI MSNo.		862	-
Length between perpendiculars (L_{pp})	[m]	4.8276	280.000
Water line length (L_{WL})	[m]	4.9138	285.000
Breadth (B)	[m]	0.7759	45.000
Draught (d)	[m]	0.2845	16.500
Trim	[m]	0	0
Block coefficient (C_B)	[-]	0.858	

Table 2 Principal Particulars of Propeller Model.

		Model	Ship
NMRI MPNo.		697	-
Diameter (D_p)	[m]	0.1400	8.120
Pitch ratio (H/D_p)	[-]	0.7500	
Expanded area ration (a_E)	[-]	0.5000	
Number of blades (Z)	[-]	5	

Table 3 Principal Particulars of Towing Tank.

Length	[m]	150
Breadth	[m]	7.5
Water depth	[m]	Variable(~3.9)

Fig. 1 Arrangement Plan of Tank Test in Shallow Water.

3. 試験結果

3.1 抵抗試験

抵抗試験は深水域, 浅水域と共に水線長ベースのフルード数 Fr ($V_S/\sqrt{g \cdot L_{WL}}$; V_S は船速, g は重力加速度, L_{WL} は水線長) で 0.08 から 0.17 (8.2 から 17.5 ノット) の範囲とした ($H/d_A=1.42$ では一部の速度を省略). なお, 計画速力は 14.5 ノット ($Fr=0.1411$) である.

解析には浅水域に対しても深水域同様に海上技術安全研究所標準の手法に則り, 3 次元外挿法により全抵抗を粘性抵抗と造波抵抗に分離する. 相当平板の摩擦抵抗係数 C_{F0} は Schoenherr の式を用い, 形状影響係数 K は Prohaska の手法を用い中速域での傾きから算出する. 船速は対水流速を用いることを標準としているが, 浅水域では対地速度を用いていることから深水域においても今回は対地速度を用い側壁および水深の影響を修正する. このブロック修正はこれまでの水槽試験から海技研で標準としている(1)式に示す田村の式^{11), 12)}を用いた.

$$\frac{\Delta V_S}{V_S} = 0.67 \frac{A_M}{A} \left(\frac{L_{WL}}{B} \right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{(1 - F_{rH}^2)} \quad (1)$$

ここで A_M は船体の中央断面積, A は水槽の断面積, F_{rH} は $V_S/\sqrt{g \cdot H}$ で表されるフルード数を示す.

各水深に対するフルード数 Fr , F_{rH} の範囲を Table 4 に示す.

Table 4 Speed condition.

H/d_A	Fr	F_{rH}	Fr	F_{rH}
	w/o correction for the shallow water effect		With correction for the shallow water effect	
11.95	0.080 – 0.170	0.095 – 0.201	0.080 – 0.171	0.095 – 0.202
2.78	0.100 – 0.160	0.249 – 0.399	0.102 – 0.163	0.254 – 0.407
2.16	0.080 – 0.170	0.226 – 0.481	0.082 – 0.175	0.232 – 0.495
1.42	0.080 – 0.170	0.279 – 0.592	0.083 – 0.179	0.289 – 0.624

全抵抗係数曲線 C_{TM} を Fig. 2 に造波抵抗係数曲線 C_W を Fig. 3 に示す. 全抵抗係数曲線は横軸をレイノルズ数 Rn ($V_S \cdot L_{WL}/\nu$; ν は静水の動粘性係数) で表し, 造波抵抗係数曲線はフルード数 Fr で表している. 水深に対する形状影響係数 K の変化及びそれを深水時における値で除した増加率 K/K_∞ を Fig. 4 に示す. また, フルード数に対する水深別の造波抵抗係数の増加率 $C_W/C_{W\infty}$, 船体沈下量 (船尾喫水 d_A , 船首喫水 d_F 及びそれらの増加率 $d_A/d_{A\infty}$, $d_F/d_{F\infty}$) を Fig. 5 から 8 に示す. なお添え字の ∞ は深水時を示している.

船速はブロック修正を行うと $H/d_A=2.78$ では 2% 程度, $H/d_A=2.16$ では 2.5 から 3% 程度, $H/d_A=1.42$ では 4 から 5% 程度増加する. これにより全抵抗係数, 形状影響係数ともに修正前より小さくなり, その差は水深が浅いほど顕著に表れる. また造波抵抗係数も下がることが判る.

Fig. 2 Test results of resistance components.

Fig. 3 Test results of C_W . Fig. 4 Shallow water effect on form factor, K . Fig. 5 Shallow water effect on C_W . Fig. 6 Measured dipping (d_A). Fig. 7 Measured dipping (d_F).

Fig. 8 Shallow water effect on dipping.

全抵抗，造波抵抗，形状影響係数とも H/d_A が小さくなるにつれて増加している．形状影響係数は $H/d_A = 2.16$ 以下から大幅に増加している．

造波抵抗係数の増加率は $H/d_A = 2.78, 2.16$ では速度に対して大きな変化はない．これに対し， $H/d_A = 1.42$ では $Fr=0.13$ 程度までは大きな変化を見せるがそれぞれ以上の速度ではほぼ一定値となっている． $Fr=0.10$ 以下で急激な変化を示しているが，絶対量が小さいため比で表すと過大な評価となるためで，特徴を表したものではない．

船体沈下量は $H/d_A = 2.78$ では船首側の沈下量は深水域とほぼ変わらないが，それ以外は水深が浅くなるにつれて増加

している。増加率を比べると船尾側は船首側に比べると数倍にもなっているが、沈下量の絶対量では船首側の方が船尾側の2倍程度大きい。また $Fr=0.13$ 近傍から増加率が上がっている。

有効馬力の結果を Fig. 9 に、深水時からの増加率を Fig. 10 に示す。

Fig.9 EHP Curves.

Fig. 10 Shallow water effect on EHP.

有効馬力は水深が浅くなるにつれて増加している。また増加率は船速の上昇に伴い大きくなることが判る。

浅水域に対し船速の修正を行うことにより、有効馬力は小さくなり、増加率も船速 14.5 ノットにおいて $H/d_A = 2.78$ では 5% 程度、 $H/d_A = 2.16$ では 10% 程度、 $H/d_A = 1.42$ では 30% 程度小さくなる。

3.2 自航試験

自航試験で用いる摩擦抵抗修正量 SFC は抵抗試験で得られた形状影響係数を用い、実船の表面粗度修正係数 ΔC_{FC} は深水域、浅水域共に同じ値とし造船設計便覧¹³⁾を参照して 0.15×10^{-3} として定める。スラスト減少係数 $1-t$ 、伴流係数 $1-W_T$ 、

プロペラ効率比 η_R を Fig. 11 に、深水時からの増加率を Fig. 12 に示す。なお、 $H/d_A=1.42$ では η_R 以外不安定な計測結果となり、何度か計測を繰り返した。

スラスト減少係数は浅水域においては深水域より増加する傾向が見られる。これは抵抗試験時では生じていた船尾剥離が自航試験ではプロペラの吸い込みにより低減したため、船体の抵抗値が変わったためと考える。

伴流係数は水深が浅くなると大きく減少し、深くなるにつれて深水域の結果に近くなる。

プロペラ効率比は水深に対する影響はほとんど見られない。

浅水域に対する速度修正を行うと船速が上がるため伴流係数は下がるが、スラスト減少係数、プロペラ効率比は変わらない。

Fig. 11 Test results of Self propulsion factors.

Fig. 12 Shallow water effect on Self propulsion factors.

3.3 航走波計測

航走波計測は深水時、浅水時共に、抵抗、自航試験と同時に計測を行った。容量式波高計1台を水槽の長手方向に対しほぼ中央、幅方向に対しては $y/L_{PP}=0.255$ の位置に設置した。配置図を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 Arrangement of the wave height meter.

計画速力における航走波計測結果を Fig. 14 に示す。横軸は距離を示し、波高計の位置に模型船中央が到達した時を0とし船長で無次元化している。 x/L_{PP} が-0.5 は A.P.の位置, 0.5 は F.P.の位置を示す。縦軸は波高を表し船長で無次元化している。

浅水域での航走波は水深が浅くなるにつれて大きくなるとともに、深水域では見られない前方での水面上昇が発生している。

なお, $H/d_A=1.42$ において $x/L_{PP}=5.5$ 付近で見られる水面上昇は位相速度が $\sqrt{gH}$ で進行する波である。

Fig. 14 Measurement results of the wave height.

4. 馬力推定

馬力推定は抵抗試験、自航試験の結果を用い、深水域と同様の手法で行う。POC はプロペラ設計を行わず模型プロペラのものを用いる。また伴流修正係数 e_i は、それぞれの水深で得られた伴流係数を用い矢崎のチャートより算出する。

4.1 浅水域の馬力推定法

浅水域では造波抵抗が深水域に比べ増大するが、これに着目し、船速でその影響を修正する Lackenby 法が知られている。海上試運転での速力・馬力修正の高度化が国際試験水槽会議の実運航性能専門家委員会 (ITTC/PSS) で行われており, MARIN から Lackenby 法では浅水修正が過大となることから, Raven 法の提案が行われた。

この Raven 法は、簡易修正を目的に、主要目のみを使用し、造波抵抗の代わりに粘性抵抗を修正し、浅水状態での船体沈下 (スコット) の影響を考慮する方法で、推進効率 は深水域と浅水域とで変わらないと仮定する。

1) 粘性抵抗の増加

粘性抵抗係数の増加 ΔC_V の算定は 3 次元外挿法を基に(2)式にて行う。

$$\Delta C_V = (f_{rV} - 1) \{ (1 + K) C_{F0} + \Delta C_{FC} \} \quad (2)$$

$$f_{rV} = 1.0 + 0.57 \left(\frac{d}{H} \right)^{1.79} \quad (3)$$

ここで, d は喫水, H は水深, K は形状影響係数, C_{F0} は相当平板の摩擦抵抗係数, ΔC_{FC} は実船の粗度修正係数である。

2) 付加沈下量による抵抗の増加

付加沈下量による抵抗の増加の算定は(4)式にて行う。

$$f_{rsink} = (1 + \delta\Delta)^{2/3} \quad (4)$$

$$\delta\Delta = \text{Max} \left[1.46 \frac{\Delta}{L^3} \left(\frac{F_{rH}^2}{\sqrt{1 - F_{rH}^2}} - \frac{F_{rHD}^2}{\sqrt{1 - F_{rHD}^2}} \right), 0 \right] \frac{A_w}{\Delta} \quad (5)$$

$$F_{rH} = \frac{V_S}{\sqrt{gH}} \quad (6)$$

$$F_{rHD} = \frac{V_S}{\sqrt{0.3gL}} \quad (7)$$

ここで, Δ は排水容積, L は船長, A_w は水線面積である。

これらの修正を行い、全抵抗係数 C_{Ts} を(8)式で算定する。浅水状態での馬力は、推進効率 $\eta_H \eta_R \eta_0$ は深水域と浅水域とで変化しないと仮定し、(9)式で推定する

$$C_{TS} = (C_V + \Delta C_V + C_W) f_{rsink} \quad (8)$$

$$BHP = \frac{1}{2} \rho S V_s^2 \frac{C_{TS} V}{\eta_s \eta_H \eta_R \eta_o} \quad (9)$$

ここで、 C_V は粘性抵抗、 C_W は造波抵抗、 ρ は海水密度、 S は浸水表面積、 η_s は伝達効率である。

なお、本推定法の適用条件は、 $F_{rH} < 0.65$ かつ $d/H < 0.5$ かつ $\delta A < 0.05$ となっている。それぞれ、造波抵抗が急増しない範囲、粘性抵抗増加の推定困難とならない範囲、排水量差の精度良い推定が可能な範囲を表している。

Lackenby 法は、速度を修正する方法であり、(10)式で船速の修正を行う。

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = 0.1242 \left(\frac{A_M}{H^2} - 0.05 \right) + 1 - \left\{ \tanh \left(\frac{gH}{V_s^2} \right) \right\}^{1/2} \quad (10)$$

ここで、 A_M は船体の中央断面積であり、手法の適用条件は、 $A_M/H^2 \geq 0.05$ である。

4.2 浅水域の馬力推定

JBC 船型による浅水試験の結果を使い、本推定法の評価を行った。

(4)式で示す付加沈下量による抵抗の増加は深水表面積の増加に相当すると考えられることから、試験で得られた沈下量から算出した深水表面積 WSA の増加率と f_{rsink} 値との比較を行った。14.5 ノットで比較した結果、Table 5 に示すように良い一致を示した。

Table 5 Comparison of WSA increase rate and f_{rsink}

H/d_A	WSA	f_{rsink}
2.78	1.02	1.01
2.16	1.03	1.02
1.42	1.05	1.03

深水域での馬力推定の結果 (deep(TEST)) に対し、浅水域での水槽試験からの推定結果 (shallow(TEST)) 及びこれにブロッケー修正した推定結果 (shallow(TEST) Corrected for the shallow water effect)、Raven 法 (Raven)、Lackenby 法 (Lackenby) について $H/d_A=2.78$, $H/d_A=2.16$ の場合を Fig. 15, Fig. 16 にそれぞれ示す。なお、Raven 法の適用範囲外であるが参考のため $H/d_A=1.42$ の場合を Fig. 17 に示す。

これらの図より、浅水状態でのブロッケー修正の影響は大きいことが分かる。

Fig. 15 Comparison of predicted power at $H/d_A=2.78$.

Fig. 16 Comparison of predicted power at $H/d_A=2.16$.

Fig. 17 Comparison of predicted power at $H/d_A=1.42$.

$H/d_A=2.78$ では 14.5 ノットまでは Lackenby 法、Raven 法とも浅水状態でブロッケー修正した結果におよそ一致す

ることが分かる。これ以上の速度では Lackenby 法では試験結果と乖離していく。また, Raven 法の方が Lackenby 法よりも馬力を小さく推定することが分かる。

$H/d_A=2.16$ では 14.5 ノットまでは Lackenby 法は浅水状態でブロック修正した結果より大きく推定されているが, Raven 法ではおよそ一致することがわかるがこれ以上の速度では試験結果より小さめに推定されている。馬力を過大推定していないという意味で Raven 法の方が適切である。

なお, $H/d_A=1.42$ で馬力推定した Fig.17 から, Lackenby 法は浅水状態でブロック修正した結果に近いこと, 一方, Raven 法は手法の適用範囲外であるものの, 浅水状態でブロック修正した結果よりも馬力を小さく推定していることから, 海上試運転での速力・馬力修正への適用をしても問題ないと考えられる。ただし, このような浅水状態で海上試運転を実施して良いのかという問題は残る。

浅水域で計測された馬力は Raven 法の適用範囲内であれば, Raven 法の修正により深水域で計測された馬力とほぼ一致すると報告されている¹⁰⁾。今回の試験は深水域と浅水域の試験からそれぞれの馬力を推定し, 深水域の馬力から浅水域の馬力を推定した結果と比較した。 $H/d_A=2.78$ ではほぼ全速度で, $H/d_A=2.16$ では 14.5 ノットまでは試験結果と Raven 法の推定は良い一致を示した。

JBC 船型の一例ではあるが, 今回深水域の馬力から浅水域の馬力を推定した結果 Lackenby 法に対し Raven 法は馬力を小さく推定した。これは浅水域での試運転結果を深水域に修正する場合, Raven 法は Lackenby 法に対し馬力の修正量が小さく, 大きめの馬力となることを意味する。

5. 結 言

今回 JBC 船型を用い深水域, 浅水域での抵抗, 自航試験, 航走波計測を行い, 浅水域においても深水域と同じ手法で解析を行い比較した。この結果, 浅水域で発生すると言われている以下の現象を確認した。

抵抗試験結果については, 形状影響係数, 造波抵抗, 沈下量など水深減少と共に増加する変化を示した。

自航試験結果については, スラスト減少係数は水深の減少に対し必ずしも一様な変化とはならず増減が見られる。これは船尾剥離により船体抵抗が安定しないためと考える。伴流係数は水深の減少と共に小さくなり, プロペラ効率比は水深に対する変化はほとんど見られない。

航走波計測については, 浅水域での波形の特徴を捉えている。

これらは参考文献2から7で示されている試験結果と同様の傾向となっており, 計測の有効性を確認できた。

馬力推定結果については, JBC 船型を使って評価した一例ではあるが, 深水域で用いられている馬力推定の手法で行いブロック修正を行った浅水域の馬力推定と, Raven 法を

用いた馬力推定, Lackenby 法を用いた馬力推定を比較した結果, Raven 法は Lackenby 法に対して修正量を小さめに推定することが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 推進性能部: 三鷹第3船舶試験水槽の建設について, 船舶技術研究所報告, 第10巻第6号, 1973.
- 2) 北川弘光, 塩沢政夫, 山口眞裕, 不破健: 浅水影響について(予備実験), 船舶技術研究所研究発表会, 第24回, pp.37-40, 1974.
- 3) 塩沢政夫, 山口眞裕, 不破健, 角川明, 北川弘光: 浅水影響について(第2報)-肥大船の浅水時抵抗試験-, 船舶技術研究所研究発表会, 第26回, pp.126-129, 1975.
- 4) 北川弘光, 塩沢政夫, 山口眞裕, 角川明: 浅水影響について(第4報)-1軸肥大船の抵抗および自航試験-, 船舶技術研究所研究発表会, 第30回, pp.25-38, 1977.
- 5) 柳原健, 川上善郎, 上田隆康: 大型フェリーの浅水影響に関する水槽実験例, 船舶技術研究所研究発表会, 第50回, pp.29-32, 1987.
- 6) 岡本三千朗, 猿田俊彦, 柳原健, 竹子春弥: 浅水域での航走波の計測実験, 船舶技術研究所研究発表会, 第72回, pp.89-92, 1998.
- 7) 谷上明彦, 山元康博, 新郷将司: 浅水域における肥大船型の推進性能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6号, pp.143-146, 2008.
- 8) T. Hino, N. Hirata, K. Ohashi, Y. Toda, T. Zhu, K. Makino, M. Takai, M. Nishigaki, K. Kimura, M. Anda, and S. Shingo: Hull form design and flow measurements of a bulk carrier with an energy-saving device for CFD validations, PRADS 2016, 2016
- 9) Lackenby, H.: The effect of shallow water on ship speed, Shipbuilder and Marine Engine Builder, pp.446-450, 1963.
- 10) Raven, H. C.: A new correction procedure for shallow-water effects in ship speed trials, Proceedings of PRADS2016, 2016.
- 11) 田村欣也: 模型船の Blockage Effect に関する研究, 三菱重工技報, Vol.9 No.5, pp.98-106, 1972
- 12) ITTC: ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Section 7.5-02-02-1, Resistance Test, p11, 2011
- 13) 関西造船協会: 造船設計便覧(第4版), 海文堂出版株式会社, p369 表 55, 1983