

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15222

研究課題名（和文）波浪中抵抗増加の直立壁仮定と実船型への適用に関する研究

研究課題名（英文）Study on Assumption of Upright Wall in the Theory of Added Resistance in Waves and on Application to Actual Ship

研究代表者

櫻田 顕子（Sakurada, Akiko）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：00734237

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は直立壁を仮定した理論に基づく波浪中抵抗増加推定法の検証と改良である。第1年度は肥大船の船首部（原型）の模型船、船首部の水面上形状を扱った船首部で水槽試験を実施し、前者は推定結果に近く、後者では波浪中抵抗の低減効果があることを確認した。第2年度では船首部の側壁と水面との角度を直立にした船首部と、水面との角度を小さくし単純化した船首部を用いて水槽試験を実施し、喫水周波数影響係数を抽出し、後者ではこの値が小さくなっていることを確認した。モデル式の改良として側壁と水面との代表角度による修正係数を用いた表現を検討し、今回のように単純化した形状の模型船では表現が可能であることを検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではこれまで波浪中抵抗増加の理論計算法として実用化されてきたハイブリッド計算法におけるブラントネス係数と喫水周波数影響係数の直立壁仮定に注目した。ハイブリッド計算法では水槽試験により速度影響係数CUを求めるが、従来の船型では設計段階で評価できるように標準的な値が提案されている。一方で省エネ効果を期待して形状を工夫した船型では、標準的なCUよりも小さい値となる場合がある。このような船型に対して設計段階で評価する手法の検討は十分でない。

本研究では水面と船側との代表角度により船型を表現し、波浪中抵抗増加との関係について考察した。この結果はさらなる省エネ船型の検討につながり社会的意義だと言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is verification and improvement of the estimation method of the added resistance in waves based on the theory assuming upright wall. In the first year, tank test was conducted on a blunt ship with the original bow and that with the bow concaved on the water surface. The results showed that the former is near the conventional method and the latter is smaller than that. That shows the effect of the bow. In the second year, a tank test was conducted using a simplified bow with the upright angle with the water surface, and a simplified bow with a small angle with the water surface. In the latter case, it was confirmed that the coefficient of draft and frequency using the latter model is small. As an improvement of the estimation method, the expression by the correction factor using representative angle between the side wall and the water surface was examined. It is verified that the expression is possible if it is applied to a simplified model ship.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：波浪中抵抗増加 船首部 反射波 喫水周波数影響係数 ブラントネス係数

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初の状況として、実海域性能は現在同様、より高度なレベルを求められていた。実海域性能向上のためには、波浪中抵抗増加の推定精度の向上が重要である。

波浪中抵抗増加の理論計算法としてはハイブリッド計算法<sup>1)</sup>が実用化されており、ハイブリッド計算法では水槽試験を実施して速度影響係数  $C_U$  値を求める必要があるが、設計段階での評価として従来の標準的な船型に対しては水槽試験を元にした標準式が提案されている。一方で水面上形状を工夫した船型では、標準的な  $C_U$  値よりも小さい値となる場合があり、このような船型に対して設計段階で評価する手法の検討は十分でない。

この要因の一つとして、本研究ではハイブリッド計算法で用いているブラントネス係数と喫水周波数影響係数の直立壁仮定に注目した。

2. 研究の目的

本研究は実海域性能の高い船型の開発を促進するために、水面上形状を含めた船型と波浪中抵抗増加の関係を調査し、設計段階で省エネ効果を狙って工夫した船型に対しても適用できる波浪中抵抗増加の表現方法の開発を目的とする。

従来の波浪中抵抗増加の反射波成分は直立壁を仮定したブラントネス係数、喫水周波数影響係数を用いているが、本研究では直立壁とは大きく異なる場合の2つの係数について調査し、表現方法を検討し、実海域中の性能を適切に評価する手法を検討する。

3. 研究の方法

波浪中抵抗増加の理論計算法としてよく普及し実用化されている方法として、丸尾の理論<sup>2)</sup>を基にストリップ法の運動計算を用いて抵抗増加 ( $R_{AWM}$ ) を計算する方法がある<sup>3)</sup>。藤井・高橋<sup>4)</sup>はこれに船首部からの反射波に基づく抵抗増加 ( $R_{AWR}$ ) を足し合わせて計算することを提案した。船首部からの反射波に基づく抵抗増加 ( $R_{AWR}$ ) は Havelock<sup>5)</sup> の drifting force の計算式を基礎にして、有限喫水の影響を Ursell<sup>6)</sup> の静止した直立壁に働く反射率の2乗から算定される  $\alpha_d$  とし、前進速度の影響を  $\alpha_U$  として (1) 式の通り表現した。また式中の船首部肥大度を表す部分を、(2) 式に示す通りブラントネス係数 ( $B_f$ ) として提案した。

$$R_{AWR} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 B_{max} B_f \alpha_d (1 + \alpha_U) \quad (1)$$

$$B_f = \frac{1}{B_{max}} \left\{ \int_I \sin^2(\alpha + \beta_w) \sin \beta_w dl + \int_{II} \sin^2(\alpha - \beta_w) \sin \beta_w dl \right\} \quad (2)$$

$$\alpha_U = C_U(\alpha) F_n \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は流体密度、 $g$  は重力加速度、 $\zeta_a$  は入射波振幅、 $B_{max}$  は最大幅、 $\alpha_d$  は喫水周波数影響係数、 $\alpha$  は入射波の波向、 $\beta_w$  は水線面に沿った線素の傾斜、 $dl$  は水線面に沿った線素である。

$\alpha_U$  は (3) 式に示す通り速度影響係数  $C_U$  を用いて表現する。 $C_U$  については水槽試験で求める必要があるが、標準的な船首に対しては水槽試験結果から得られた標準式が提案されている。

さらに推定精度を高度化させるため、 $\alpha_d$  について従来は規則波の波数を変数としていたが、直立壁の数値的考察および実船型模型による水槽試験結果により、規則波の出会い波数を変数とすることで、より推定精度が向上することが示されたことから<sup>1)</sup>、 $\alpha_d$  は (4) 式の表現となった。 $I_1$  は1次の第1種変形別説関数、 $K_1$  は1次の第2種変形ベッセル関数、 $K_e$  は出会い波数である。

$$\alpha_d = \frac{\pi^2 I_1^2(K_e d_d)}{\pi^2 I_1^2(K_e d_d) + K_1^2(K_e d_d)} \quad (4)$$

以上の推定方法をハイブリッド計算法という。ここで、(2) 式で示したブラントネス係数と (4) 式で示した喫水周波数影響係数は直立壁を仮定した理論に基づいている。本研究では、波浪中抵抗増加の従来モデルにおける、船首部が直立壁ではない実船型への理論的適用を目的として、直立壁に近い従来の船型と、船首部を変更した模型で水槽試験を実施し、船首部形状が従来とは大きく異なる船型に対して適用できる波浪中抵抗増加のモデルを検討する。

第1年度：

- ・従来型模型と省エネ船首部模型による水槽試験

$C_U$  値について標準モデルの推定結果を確認するため、船首部の水面上形状が直立に近い従来の船型と、水面上形状を省エネになるよう工夫した船首部変更模型を用いて波浪中抵抗増加試験

を実施する。

第2年度：

・単純化した船首部変更模型による水槽試験

水面との角度をわかりやすく単純化した船首部を製作し、船体運動固定で波浪中抵抗増加試験を実施して、ブラントネス係数・喫水周波数影響係数と、水面と船首部側壁の角度との関係について考察する。

以上によって直立壁に近い従来とは異なるような船型に対して波浪中抵抗増加のモデルを開発する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 従来型模型と省エネ船首部模型による水槽試験結果

第1年度に、肥大船の標準的な船型としてケーブサイズのバルクキャリア JBC を対象船として、原型の模型船と、船首部を省エネ船型 COVE<sup>7)</sup>に変更した模型船で水槽試験を実施した。

COVE は側壁が直立で肥大な原型に対し、平水中性能を変えずに波浪中抵抗増加を低減させることを狙いとした船首部であり、ターゲットとする船速における静的水位上昇位置より上をブラントネス係数が小さくなるように抉るように変形させた形状である。使用した模型船の写真を図1に示す。

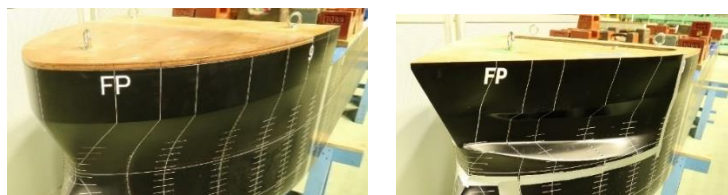


図1 第1年度模型船写真 (左：原型、右：COVE)

水槽試験は海上技術安全研究所の実海域再現水槽で、6自由度フリーの状態で行った。速度は  $F_n=0.1\sim 0.15$ 、波長は  $\lambda/L=0.4\sim 1.1$ 、波高は実船相当で2m~4m で実施した。

水槽試験の結果として速度影響係数  $C_U$  を表1に示す。表1に示す通り、原型 (TEST(ORIG)) で  $C_U=9.7$ 、COVE (TEST(COVE)) で  $C_U=3.3$  という結果になった。2つの模型船のブラントネス係数は喫水における waterline が一致しているため、いずれも  $B_f=0.4028$  であり、その標準的な値 (Empirical formula) は  $C_U=10$  である。したがって、原型では標準的な値に近い  $C_U$  値となった一方で、省エネ効果を狙った COVE では標準的な値よりも小さな値となることを確認した。

表1 船首部の違いによるブラントネス係数と速度影響係数  $C_U$

Estimation method	$B_f$	$C_U$
Empirical formula	0.4028	10
Test(ORIG)		9.7
Test(COVE)		3.3

波浪中抵抗増加の周波数応答を図2に示す。ここで、ORIG は原型、COVE は COVE 船首を示し、Cal(O)、Cal(C)はそれぞれ表1の TEST(ORIG)、TEST(COVE)の速度影響係数を用いた計算値を示す。

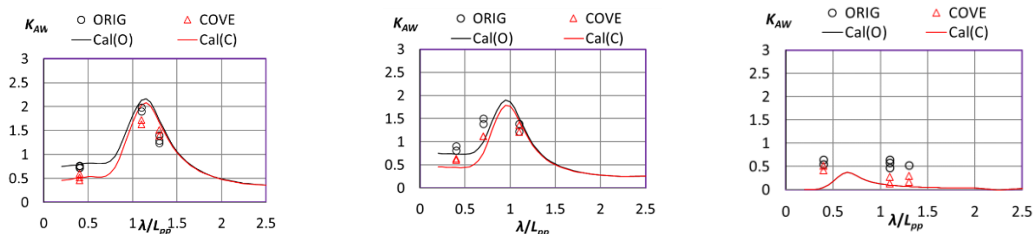


図2 波浪中抵抗増加の周波数応答 (左：向波、中：斜向波、右：横波)

図2より、向波から横波にかけて、短波長で波浪中抵抗増加の低減効果が得られていることがわかる。また、船首部の違いによる運動の違いはなかった。なお、この結果について研究成果をまとめ、国際会議 OMAE2021 で論文発表<sup>8)</sup>を行った。

##### (2) 単純化した船首部変更模型による水槽試験

第1年度の結果より、船首部の側壁が直立から大きく異なるような船種の場合に標準的な  $C_U$  値と異なることが確認できた。本研究ではこれがブラントネス係数、喫水周波数影響係数の直立壁仮定によるものと考え、第2年度では船型を単純化して水槽試験を実施した。対象船は第1年

度と同じ JBC としたが、船首部を完全に水面と直立にした Type-B と、一定の割合で水面と船首部との角度を付けた Type-Bs を用いた。船首部の写真を図 3 に示す。なお考察を単純にするため、計画喫水における waterline を同じ形状とし、ブラントネス係数が同じになるようにした。

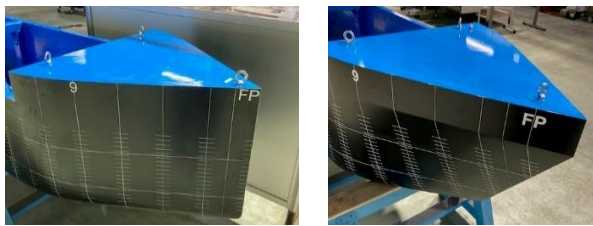


図 3 第 2 年度模型船写真 (左 : Type-B、右 : Type-Bs)

水槽試験は平水中抵抗による差、速度影響による差を分離するため、運動を完全に固定し、速度 0 で実施した。波は向波で波高が実船で 1.6m 相当とした。

試験結果より喫水周波数影響係数を(i)~(iv)の手順で求める。

- (i) 規則波中の抵抗を計測
- (ii) 丸尾の理論による抵抗 ( $R_{AWM}$ ) のディフラクション成分を求める
- (iii) (i)から(ii)を引き、その値をディフラクション状態での (1) 式の  $R_{AWR}$  とする
- (iv) 喫水周波数影響係数を (5) 式より求める

$$\alpha_d = \frac{2R_{AWR}}{\rho g \zeta_a^2 B_{max} B_f (1 + \alpha_U)} \quad (5)$$

ここで、 $(1 + \alpha_U)$ は速度影響項であるが、船速 0 のため  $\alpha_U = 0$  である。

ブラントネス係数は本来喫水での waterline の形状で計算して使用するが、今回は検討のため、複数の喫水で計算した。各 waterline により計算したブラントネス係数を図 4 に示す。ここで、 $h_s$  を計画喫水 (16.5m) からの差とする。水槽試験は波高実船 1.6m 相当で実施したため、水面が到達するのは  $h_s = -0.8m \sim 0.8m$  であり、ブラントネス係数の代表値として  $h_s = -0.8m \sim 0.8m$  の平均を求めると、Type-B で 0.2592、Type-Bs で 0.2571 となった。

(ii)の手順の丸尾の理論による抵抗 ( $R_{AWM}$ ) のディフラクション成分については速度 0 の場合非常に小さい値であるが今回のような運動固定の水槽試験ではその計算誤差の影響が大きいいため、完全直立の側壁船首である Type-B の抵抗値が理論に従っているとしてその平均から逆算して求めた。その値を用いて Type-Bs の喫水周波数影響係数を計算する。その結果を図 5 に示す。なお、運動固定での試験は結果のばらつきが大きく、各波長で試験結果の平均値をとっている。図 5 で  $B_{all}$ 、 $Bs_{all}$  は Type-B、Type-Bs の全試験結果、 $B_{ave}$ 、 $Bs_{ave}$  は Type-B、Type-Bs の試験結果の平均値、 $cal\_B$  は直立壁である Type-B の  $\alpha_d$  の理論値である。

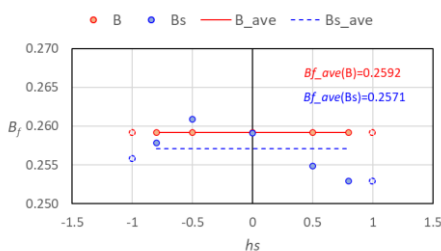


図 4 喫水によるブラントネス係数

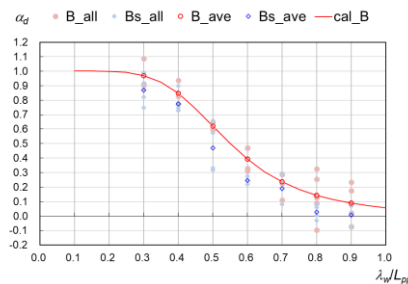


図 5 喫水周波数影響係数 (Type-B と Type-Bs)

図 5 に示した通り、試験結果にばらつきがあるものの各波長で平均した結果では Type-Bs では Type-B に比べて喫水周波数影響係数が小さいことがわかる。

### (3) モデル化の検討

喫水周波数影響係数の差の原因として本研究では直立壁仮定に注目していることから、一つの案として船首部の船側と水面との代表角度を定義し、その角度により喫水周波数影響係数の修正係数  $k_\alpha$  を表現することを検討した。代表角度として、今回の模型船では図 6 に示す通り水面とセンターライン断面図との角度を  $\theta_{wall}$  と表現することとした。

喫水周波数影響係数の前にかかる修正係数  $k_\alpha$  のモデル化として、水平方向の波による力が側壁の法線方向に伝わると考え、代表角度による寄与率を表現すると (6) 式の通りとなる。従来、喫水周波数影響係数のみで計算していた部分は修正係数をかけて  $k_\alpha \cdot \alpha_d$  で表現される。今

回の模型船の場合、Type-B では $\sin\theta_{wall} = 1$ 、Type-Bs では $\sin\theta_{wall} = 0.8$ である。

$$k_{\alpha} = \sin\theta_{wall} \quad (6)$$

(6) 式を用いて計算した結果を図 7 に示す。cal\_B、cal\_Bs は Type-B、Type-Bs で (6) 式に基づいて計算した $k_{\alpha} \cdot \alpha_d$ である。

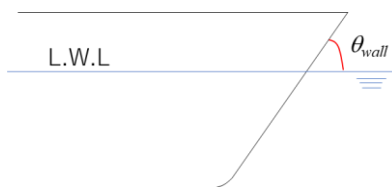


図 6 代表角度の定義

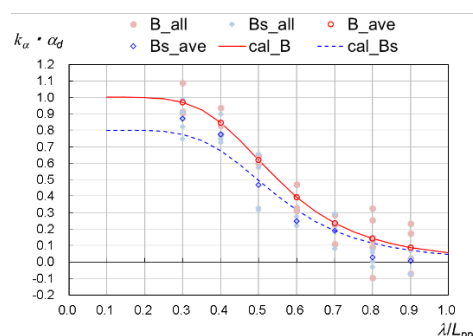


図 7 側壁の角度を表現してモデル化した喫水周波数影響係数

図 7 で Type-Bs の $k_{\alpha} \cdot \alpha_d$ が Type-B に比べて小さくなっている様子が表現できていることから、今回検討したような単純化した船首部形状では表現が可能であることを示した。

#### (4) まとめ

本研究では省エネ船型の検討の促進を目的とし、波浪中抵抗増加の理論計算法として実用化されているハイブリッド計算法の中の、ブラントネス係数と喫水周波数影響係数の直立壁仮定に注目した。

ハイブリッド計算法では理論と水槽試験を組み合わせることで高精度の推定が可能であり、さらに従来の船型では設計段階でその評価ができるよう標準式が提案されている。一方で、船首部の側壁と水面の角度が複雑に変化する省エネ船型では標準式よりも波浪中抵抗増加が低減することが知られている。本研究では側壁が直立に近い船首部とそうではない船首部で波浪中抵抗増加の違いを求め、モデル化することを通して、波浪中抵抗増加低減の現象を解明することを目的として研究を行った。

まず実船型として波浪中抵抗増加を低減させる省エネ船型の効果を水槽試験により確認し、成果をまとめて論文発表<sup>8)</sup>を行った。その現象の解明として、次に単純化した形状の船首部で船速 0 とし、運動を固定した水槽試験を実施した。この考察により、単純化した形状の船首部について代表角度を用いたモデル化を行った。この結果は、代表角度が波向や高さ方向で変化するような、より複雑な形状の実船へつながる基礎的な考察となる。

ハイブリッド計算法において、ブラントネス係数、喫水周波数影響係数について直立壁の仮定に着目し、船速や船体運動の影響を水槽試験として分離して調査した例はこれまでなく、世界的に実用化されているハイブリッド計算法を、より高度化させるための基礎的な研究として位置づけられる。

#### <引用文献>

- 1) M. Tsujimoto, K. Shibata, M. Kuroda and K. Takagi : A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.8, pp. 147-154, 2008
- 2) H. Maruo: Resistance in Waves, Researches on Seakeeping Qualities of Ships in Japan, the Society of Naval Architects of Japan, Vol.8, pp.67-102, 1963.
- 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, Vol.4, No.6, pp.86-92, 1967
- 4) 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, pp.132-137, 1975.
- 5) Havelock, T.H.: The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle, P.R.S. Series A, No. 963, Vol.175, 1940.
- 6) Ursell, F.: The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water, Proc. Phil. Soc., Vol.42, pp.374-382, 1947.
- 7) A. Sakurada, M. Tsujimoto, and M. Kuroda: Development of COVE bow -Energy Saving Bow Shape in Actual Seas, Proc. of PRADS'2016, pp.625-632, 2016
- 8) A. Sakurada, M. Tsujimoto, and S. Yokota: Application of Energy Saving Bow Shape in Actual Seas to JBC, Proc. of OMAE2021, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Sakurada, M. Tsujimoto, and S. Yokota
2. 発表標題 Application of Energy Saving Bow Shape in Actual Seas to JBC
3. 学会等名 OMAE2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------