

ダクト効果を有する非対称断面ツイン舵船型の開発

（第9報 水中放射雑音計測結果）

正会員 矢澤 真樹^{*1} 正会員 栗林 定友^{*2}
 稲田 博久^{*2} 正会員 木村 校優^{*3}
 武田 俊文^{*4} 黒河 保^{*4}
 小山田 俊英^{*5} 正会員 角谷 拓紀^{*1}
 正会員 深澤 正樹^{*1} 正会員 佐々木 紀幸^{*6}

The New Hull Form with Twin Rudders Utilizing Duct Effects
 (Results of Under Water Radiated Noise Measurement)

by Masaki Yazawa, *Member* Sadatomo Kuribayashi, *Member*
 Hirohisa Inada Koyu Kimura, *Member*
 Toshifumi Takeda Tamotsu Kurokawa
 Toshihide Oyamada Hiroki Kakya, *Member*
 Masaki Fukazawa, *Member* Noriyuki Sasaki, *Member*

Key Words: Twin Rudder, GATE RUDDER[®], Under Water Radiated Noise,

1. 緒言

船舶の省エネ装置の中で船尾に取り付ける省エネ装置は、これまでも様々な形態が開発されてきたが、それらのほとんどが原理的には既存の省エネ装置の延長上にあると言っても良い。一方、ここで述べるダクト効果を利用する非対称ツイン舵は、従来の舵を2分割し、プロペラの前後ではなくその両側に配置させ、かつ非対称断面とすることで舵に大きな推力を発生させ、省エネ効果を得ようとする新しい発想に基づいている。本報告ではこの舵を以下、ゲートラダーと称す。

前報まで⁴⁾においてゲートラダーの操縦性能や速力試験結果等を報告してきたが、今回、ゲートラダー搭載船「しげのぶ」と、その同型船でフラップラダー搭載船を用いて同一海域における水中放射雑音計測を実施した。その結果を報告する。

2. 対象船

今回、実船での水中放射雑音計測を実施したゲートラダー搭載船「しげのぶ」と、フラップラダーを搭載した同型船の船体主要目を Table 1 に、プロペラ主要目を Table 2 に示す。また舵の外観を Fig. 1 に示す。両船共に可変ピッチプロペラを搭載したコンテナ船である。

船体主要目、主機定格出力は同一だが、ゲートラダーのダクト効果によるプロペラ流入速度が大きくなるため、「しげのぶ」のプロペラ直径は小さくなり、プロペラピッチ比が高くなっている。またプロペラ直径が小さくなることにより、僅かだが可変ピッチプロペラのハブ比も小さくなっている。



Fig.1 Flap rudder(left) and GATE RUDDER(right)

Table 1 Principal dimensions of Shigenobu & the sister ship

	同型船	しげのぶ
Loa[m]	111.4	
B[m]	17.8	
d[m]	5.24	
Main Engine	3309kW x 220rpm	
Rudder	フラップラダー	ゲートラダー
就航年	2016年	2017年

Table 2 Principal dimensions of both propellers

	同型船	しげのぶ
Diameter[m]	3.5	3.3
Hub Ratio	0.274	0.273
EAR	0.530	0.512
P/D(0.7R)	0.690	0.835
翼数	4	
回転方向	船尾から見て時計回り	

*1 かもめプロペラ株式会社

*2 栗林商船株式会社

*3 株式会社三井造船昭島研究所

*4 山中造船株式会社

*5 東京計器株式会社

*6 University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK

原稿受付（学会にて記入します）

公開日（学会にて記入します）

秋季講演会において講演（学会にて記入します）

©日本船舶海洋工学会

3. 実船計測

3.1 水中放射雑音試験の概要

ゲートラダー搭載船「しげのぶ」及び同型船であるフラップラダー搭載船を対象に、両船の発する水中放射雑音をハイドロフォンにより計測した。同型船は2021年7月22日に、「しげのぶ」は2021年8月19日に実施した。

試験海域は両船ともに広島県大崎上島沖である。両船の海域における計測時の位置を Fig. 2 に示す。試験海域における水深は海図より、50m~60m である。本来であれば水深として 75m もしくは 1 船長程度確保する事が推奨されているが、今回は 2 隻の相对比较が目的であり、両船のドックスケジュール等の制約から、両船がほぼ同じ時期に試験できる今回の試験海域を選定した。

水中放射雑音の計測は対象船と計測船の距離 65m を目標として実施した。Fig. 3 に示す通り、ハイドロフォンの深さは 30m と 37m の 2 種類としたが、本論文内の結果は全て深さ 37m の結果である。

対象船のテストコースを Fig. 4 に示す。水中放射雑音の周波数解析区間は ISO/DIS 16554.3²⁾ に従い、図中の AB 間とした。計測船と対象船プロペラ中心位置との最接近距離 CPA は GPS データより算出した。使用した計測機器については両船とも同じものを用いた。付録に計測機器のリストを記載する。



Fig. 2 Test area

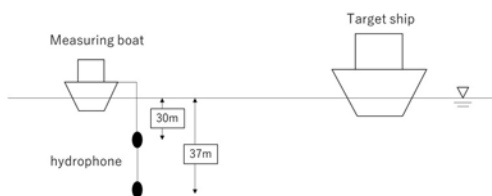


Fig.3 Arrangement of target ship & measuring boat

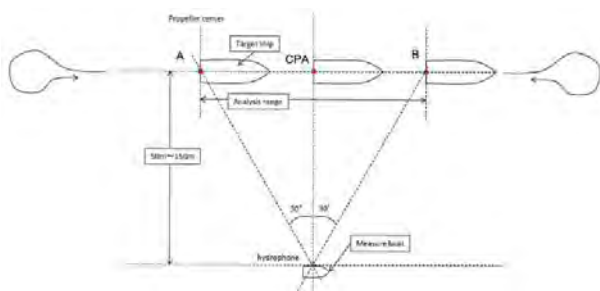


Fig. 4 Test course

本計測を実施した海域には潮流があり、また速力試験の様に同一区間を航走する事は難しいため対地船速を正として使用できない。そのため船速の同定には対水船速を用いた。計測を実施した試験状態を Table 3 及び 4 に示す。表中の R は計測船が対象船の右舷側にある状態、L は左舷側にある状態での計測を示す。今回は、同一速力での比較と、同一主機馬力での比較の 2 種類を実施した。

両船は 2020 年 12 月 30 日に同時速力試験を実施しており³⁾、その際得られたパワーカーブ上に、Table 3 及び 4

に示した船速・主機出力・回転数をプロットしたグラフが Fig. 5 及び Fig. 6 である。同型船は今回の試験日午前中まで入渠しており、船体・プロペラの汚れを完全に落とした状態で試験を実施した。「しげのぶ」は試験前日にダイバーによるプロペラ磨きを行ったものの、船体は洗浄せず、前回入渠時から約 500 日経過している状態で試験を実施した。それを考慮すると、今回計測した船速・主機馬力は妥当であると考えられる。

両船の状態を極力合わせるため、喫水についてもほぼ同じ値に設定した。試験前の喫水計による値を Table 5 に示し、試験時の両船の外観を Fig. 7 に示す。

Table 3 Conditions in same ship speed

	最終ドライ ドック	対水船速 [kt]	主機出力 [kW]	プロペラ 回転数[rpm]	CPA [m]	R/L
同型船	2021/7/22	15.3	2997	212	63.2	R
しげのぶ	2020/2/15	15.4	2824	197	82.3	L

Table 4 Conditions in same engine load

	最終ドライ ドック	対水船速 [kt]	主機出力 [kW]	プロペラ 回転数[rpm]	CPA [m]	R/L
同型船	2021/7/22	14.7	2488	199.7	92.7	R
しげのぶ	2020/2/15	14.7	2499	187.9	50.0	R

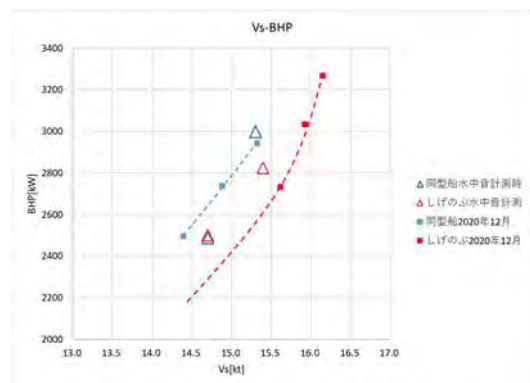


Fig. 5 Vs-BHP Power curve

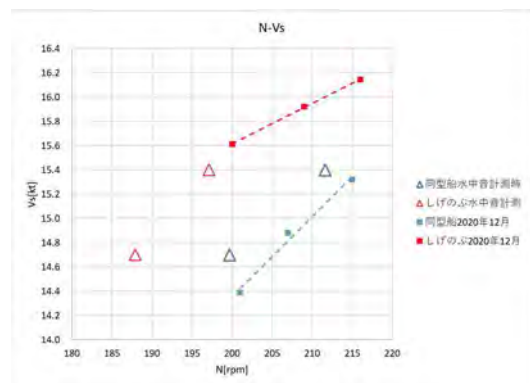


Fig. 6 N-Vs Power curve

Table 5 Draft of both ships

	同型船	しげのぶ
dF	3.50	3.50
dA	4.50	4.49
dM	4.00	4.00



Fig.7 Sister ship (left) and Shigenobu(right)

3.2 水中放射雑音計測結果

(1) 1/3 オクターブ分析結果

Fig. 4 に示す AB 間について 20Hz~31.5kHz の帯域において 1/3 オクターブバンドごとに解析した結果を以下に示す. Fig. 8 は Table 4 で示した, ほぼ同一速力における両船の音圧レベルの比較結果である. Fig. 9 は Table 5 で示した同一出力における両船の音圧レベルの比較結果である.

対象船からハイドロフォンへの距離は球面拡散を仮定して(1)式~(3)式によって音源音圧レベルに修正している.

$$D_T = \sqrt{D_H^2 - D_V^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{D_T}{D_0} \quad (2)$$

$$L_{pdn} = L_p + 20\log(R) \quad (3)$$

上式で, D_T , D_H , D_V はそれぞれ CPA におけるハイドロフォンから対象船プロペラ中心までの, 距離, 水平距離, 鉛直距離であり, D_0 は 1[m], L_p は受信音圧レベル, L_{pdn} は音源音圧レベルを示す.

背景雑音レベルは受信音圧レベルに対して十分に小さかったが, 今回は ISO17208-1:2016¹⁾により背景雑音補正を行った. 補正量は最大でも 10⁻⁵dB のオーダーである.

Fig. 8 より, 「しげのぶ」の音圧レベルは同型船よりも低周波から高周波まで全体的に改善されているが, 特に 2kHz 以上の高周波での改善量が大きく, 10dB 以上小さい事が分かる. またこの傾向は Fig. 9 の同一出力時でも同様に確認できる. この要因としては様々考えられるが, 主なものとして以下の 5 つが挙げられる.

- (1) ゲートラダーが推力を出すことによるプロペラスラストの減少
- (2) (1)による推進効率向上によるプロペラ回転数の減少
- (3) プロペラ直径の違い
- (4) ゲートラダーのダクト効果による伴流改善効果
- (5) ゲートラダーが音源であるプロペラを覆う遮音効果

上記要因があると考えられるものの, 現時点でそれらの切り分けをする事は難しい. CFD 等を用いた検討について次報にて報告したい.

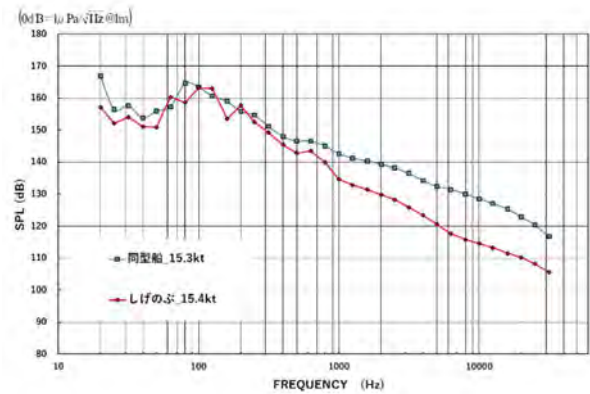


Fig. 8 Comparative sound pressure level spectrum (1/3 Oct. , abt.15.4kt)

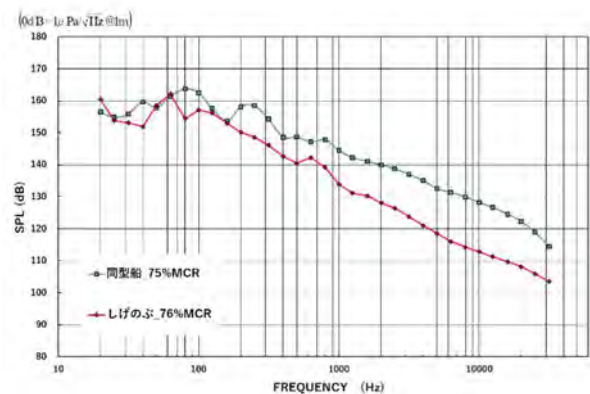


Fig. 9 Comparative sound pressure level spectrum (1/3 Oct. , abt.75%MCR)

(2) 狭帯域解析結果

キャビテーションノイズの特徴として, プロペラ翼次成分(翼数×プロペラ回転数の整数倍)がピークとして表れる事がよく知られているが, その傾向を詳細に確認するために, 狭帯域 (1Hz) 解析結果を以下に示す. Fig. 10 は Table 3 に示す同一速力条件での両船の狭帯域解析結果である. Fig. 10 より, 「しげのぶ」ではプロペラの翼次成分が顕著ではないが, 同型船では 3 次, 4 次, 5 次成分が顕著に表れている事が分かる. また, 各プロペラ翼次成分での音圧レベルは, 「しげのぶ」の方が小さく, プロペラ 5 次成分でも約 6dB の差である.

両船の乗組員へのヒアリングをした際に, 「同型船では(おそらく船体振動により)航海灯が頻繁に落ちたが, しげのぶでは, そういった事は無い」というコメントがあった. また Fig.11 は, 新造試運転時に両船の D DECK において計測された上下方向の船体振動計測結果(プロペラ 5 次成分)であるが, この結果から, 「しげのぶ」のプロペラ 5 次成分が同型船に比べて小さい事が分かる. Fig.10 で確認できた音圧レベルにおける両船のプロペラ翼次成分の違いは, こうした船体振動における傾向とも一致する.

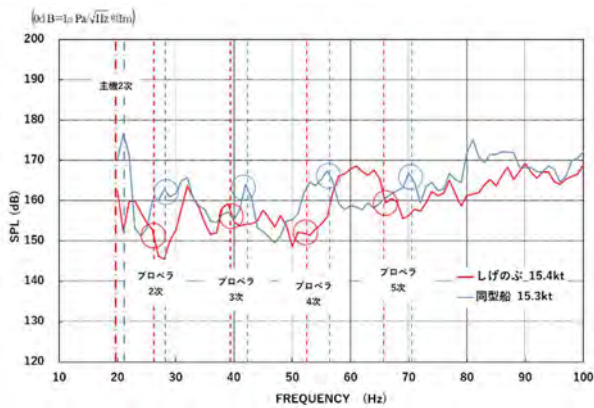


Fig. 10 Comparative sound pressure level spectrum (FFT, abt.15.4kt)

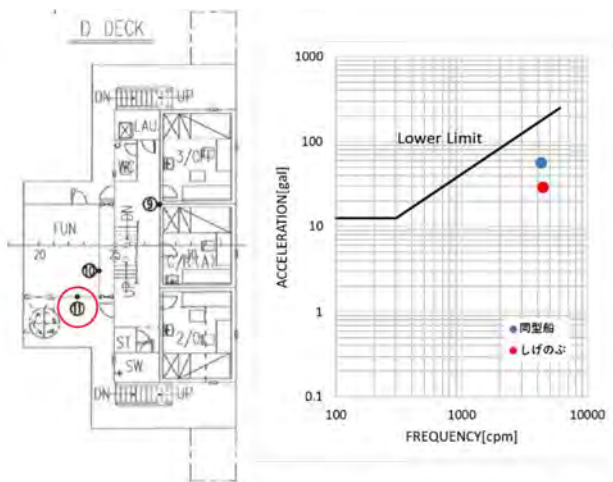


Fig. 11 Comparative vibration at D CECK of Shigenobu & the sister ship (85%MCR, 208rpm)

5. 結 言

ゲートラダー搭載船「しげのぶ」とフラップラダー搭載の同型船について、実船で同一海域における水中放射雑音計測を実施し、両船の結果を比較した。得られた知見・成果を以下に示す。

- ゲートラダー搭載船「しげのぶ」はフラップラダー搭載の同型船に比べて、同一船速で比較した場合、低周波から高周波まで全体的に改善されているが、特に 2kHz 以上の高周波領域で改善量が大きい事を確認した。また、同一主機負荷でも同様な傾向であることを確認した。
- 上記の差の要因としては、①ゲートラダーが推力を発生する事によるプロペラスラストの減少、②①に起因するキャビテーションの減少、③プロペラ直径と回転数の減少による翼端速度の減少④ゲートラダー船尾の伴流改善効果、⑤ゲートラダーの遮音効果、の5つが考えられるが、それぞれの寄与については、キャビテーション試験やCFDによる検討等、さらなる調査が必要である。
- 今回計測したデータの狭帯域解析結果によれば、「しげのぶ」ではプロペラの翼次成分が顕著ではなく、同型船に比べて小さい。この傾向は試運転時の振動計測結果や、乗組員のヒアリング結果と一致す

る。

- 今回、両船の水中放射雑音レベルの比較を目的としたため、同一海域での実施を最優先にした。しかしながら、今回の試験海域ではやや水深が浅く、海底からの反射の影響等を考えると最適な海域とは言えない。同様の試験をする際には、十分に深い水深の海域で実施する事が望ましい。

謝 辞

今回の試験実施にあたり、対象船の使用のご承諾と運航スケジュールの調整を頂きました、井本商運株式会社 船舶部長 藤田昌行様、山中造船株式会社 代表取締役社長 浅海真一様、計測船をお貸し頂きました、小池造船海運株式会社 代表取締役 小池英勝様、並びに試験に立会頂き、貴重なご助言を頂きました、一般財団法人 日本海事協会 尾道支部 木戸浩貴様、増山聡様に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships
- ISO/DIS 16554.3 Ships and marine technology - Measurement and reporting of underwater sound radiated from merchant ships -Survey measurement in deep water.
- N.Sasaki, M.Yazawa et al, JOINT SEA TRIAL OF SHIPS WITH GATE RUDDER® AND CONVENTIONAL RUDDER, Royal Institution of Naval Architects Full Scale Ship Performance online conference, 2021
- 角谷拓紀, 佐々木紀幸他:ダクト効果を有する非対称断面ツイン舵船型の開発 (第8報), 日本船舶海洋工学学会公演論文集, 第32号, 2021
- 栗林定友, 佐々木紀幸他:ダクト効果を有する非対称断面ツイン舵船型の開発 (第1報~第7報), 日本船舶海洋工学学会公演論文集, 第19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26号, 2014~2018.

付 録

計測に使用した機器のリストは以下の通りである。

Table 6 List of measuring equipments

名称	型式	メーカー
ハイドロホン	Type8104	Bruel&Kjaer
チャージアンプ	Type2650	Bruel&Kjaer
ピストンホン(校正器)	Type4229	Bruel&Kjaer
データレコーダ	LX-120	TEAC
周波数解析ソフト	LP-U4101	DEICY
GPS	A325	Hemisphere