

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 内航貨物船への適用と旋回性能）

正会員 角谷拓紀^{*1} 正会員 栗林定友^{*2}
 稲田博久^{*2} 松坂武彦^{*2}
 武田俊文^{*3} 黒河保^{*3}
 小山田俊英^{*4} 野中孝夫^{*4}
 正会員 深澤正樹^{*1} 正会員 佐々木紀幸^{*5}

The New Hull Form with Twin Rudders Utilizing Duct Effects
 (Application to coastal cargo ships and their Maneuverability)

by Hiroki Kakuya, Member Sadatomo Kuribayashi, Member
 Hirohisa Inada Takehiko Matsuzaka
 Toshifumi Takeda Tamotsu Kurokawa
 Toshihide Oyamada Takao Nonaka
 Masaki Fukazawa, Member Noriyuki Sasaki, Member

Key Words: Twin Rudder, GATE RUDDER, Maneuverability, Sea Trial,

1. 緒言

従来、港内操船などの低速時の操船性能を重視した高揚力舵は、通常の航海においては従来舵と比べてその抵抗が大きく、推進性能とはトレードオフとなっていた。そこで、通常航海時の推進性能と、港内操船時の操船性能のどちらも向上できる舵という発想からゲートラダーTMが考案された。この舵は、非対称断面の舵板をプロペラの両脇に配置することで推進性能を向上させ、舵板を舵軸からオフセットさせ、舵軸を2本とする構造により、操舵時の舵板がプロペラ後流に入ることによって低速時の操船性を確保している。さらに左右の舵角の組合せにより、状況に応じた操船が可能となる。

推進性能と操縦性能について、これまでの試験結果^{1,2)}などから通常舵と特殊舵の特徴を Table. 1 に示す。ゲートラダーは舵としての側面とともに、推進器としての側面を持つところが異なる。また、通常航海においては通常舵と同程度の旋回能力を目指し、燃費を悪化させないため高揚力舵ほど優れた旋回能力は不要と考えている。

Table. 1 Comparison of the features of each rudder

舵形式		通常舵	高揚力舵	ゲートラダー
港内操船	旋回性能	0	+	++
	保針性能	0	+	++
	推進性能	0	-	++
通常航海	旋回性能	0	++	0
	保針性能	0	+	++
	推進性能	0	-	++

初のゲートラダー装備船「しげのぶ」に続き、2020年

*1 かもめプロペラ株式会社

*2 栗林商船株式会社

*3 山中造船株式会社

*4 東京計器株式会社

*5 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

夏に499GT内航貨物船「神門丸」（以降499GRと記す）及び、509GT内航貨物船「光辰丸」（以降509GRと記す）の2隻のゲートラダー装備船が就航した。

本報ではこれら2隻の海上公試運転、499GRの実運航時の旋回試験及び離着岸時の調査等の結果によりその操縦性能について報告する。

2. ゲートラダーの設計と対象船

2.1 ゲートラダーの設計方針

509GRはゲートラダー装備を前提として新たに設計された船型であるが、499GRは建造工期の関係から逆G型の船尾形状をそのまま利用するという制限が残った。その中で可能な限り、どちらの船型においても、港湾内では操船性能を、実運航時では燃費性能を重視した設計方針を採用した。具体的には、499GRにおいては、試運転状態における旋回性能をやや犠牲にして実運航時において必要十分な旋回性能が確保でき、また燃費性能の向上が得られる最小舵面積のゲートラダーを採用した。さらに、509GRにおいても499GRで設計したゲートラダーが、同船にとってもほぼ最適であったことから、その舵形状をそのまま採用し、両船にとってコスト低減と納期の短縮が可能な配慮を行った。実際の建造工程から言うと、509GRのゲートラダーをまず製作し、それと同じゲートラダーを499GRに搭載した。

また、ゲートラダー搭載船の特徴として、これまで以下の事が分かっている。

1. 旋回中の船速低下が小さく旋回圏が真円に近くなる
2. IMO操縦性基準³⁾を適用する場合、基準が垂線間長(Lpp)で無次元化される。同じサイズの船と比較される場合、垂線間長が短くなるゲートラダーは見かけ上不利となる。したがって、将来的にはゲートラダー船の操縦性能評価は、通常舵を装備した同型船の垂線間長で無次元化する必要がある。

2.2 座標系と舵角の定義

本報ではこれまでの報告^{1,2,4)}で用いられてきた舵角定義とは異なり、操縦性能の分野で一般的に使用されている舵角定義に従った。舵角と座標系の定義を Fig. 1 に示す。舵角は舵軸を中心に反時計回りを正とする。ゲートラダーは左右舷で異なる舵角を取る場合があるため、右舷舵の舵角を δS 、左舷舵の舵角を δP と表記する。左右舷舵の代表舵角は δ とし、特筆しない限りはプロペラ後方に位置する舵の舵角とする。

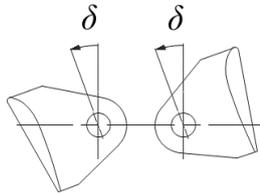


Fig. 1 Coordinate system of GATE RUDDER

2.3 船体と舵の主要目

今回、実船試験を実施した 499GR と 509GR の船体主要目を Table. 2 に示す。この 2 船型には同一形状のゲートラダーが装備されている。その主要目を Table. 3 に示す。両船の船尾形状を Fig. 2 に示す。499GR では逆 G 船型からシェーピースを取り除いた垂直ステム型の船尾形状、509GR では船尾バルブを有すマリナー型の船尾形状とそれぞれ異なっている。

Table. 2 Principal dimensions of GATE RUDDER ships

Ship	499GR	509GR
Lpp (m)	68.05	71.70
Breadth (m)	12.00	12.00
d (m)	4.132	4.095

Table. 3 Principal dimensions of GATE RUDDER

Ship	499GR	509GR
Height (m)	2.978	
Max. Cord Length (m)	1.550	
Projected Area (m ²)	4.133	



Fig.2 Installed GATE RUDDER with the same design on general cargo ships

3. 海上公試運転

3.1 試験概要

海上公試運転では 35°旋回試験、10°Z 試験、片舷旋回試験を実施した。ここでは 35°旋回試験について報告する。

試験時の喫水状態を Table.4 に、舵角の組合せと船速などを Table. 5 に示す。船速や舵角、方位角、緯度、経度などの計測値は東京計器製オートパイロット内のシリアル

通信データ収録装置に記録される。旋回航跡はこのデータにより作成された。

Table. 4 Draft conditions in sea trial

Ship	499GR	509GR
d _F (m)	1.249	1.779
d _A (m)	3.387	3.170
d _m (m)	2.293	2.490
Trim (m)	2.138	1.391

Table. 5 Conditions of ±35° turning circle test

Ship	499GR			509GR		
	$\delta P(^{\circ})$	$\delta S(^{\circ})$	V_s (kt)	$\delta P(^{\circ})$	$\delta S(^{\circ})$	V_s (kt)
35	35	20	13.9	35	-15	13.7
-35	-20	-35	13.9	-15	-35	13.7

1/5 載荷状態での公試運転は、就航後の運航条件と大きく異なる。Fig. 3 に 499GR の就航後(2020 年 8 月~2021 年 2 月)の喫水と主機回転数を示すが、公試運転が実施されている 1/5 載荷状態は、実運航とは大きくかけ離れていることが分かる。そこで本論では公試運転時の操縦性試験の評価よりも、就航後の実運航における操縦性の重要性に着目してその旋回性能について評価することとした。

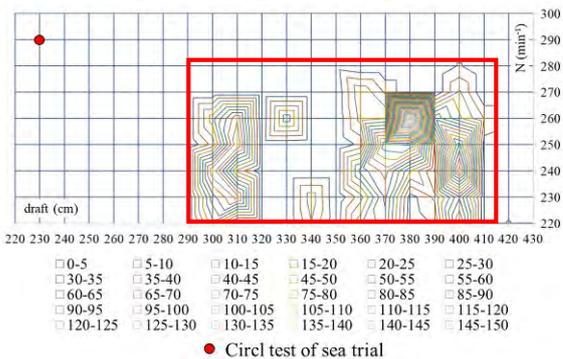


Fig. 3 Operation profile (red square) of 499GR

3.2 試験結果

(1) 旋回試験

Fig. 4 に旋回試験の航跡を示す。499GR、509GR の旋回航跡にはそれぞれ潮流修正を施している。全く同じ形状のゲートラダーを装備しているにも関わらず、499GR の旋回航跡は 509GR と比較して非常に大きくなっている。

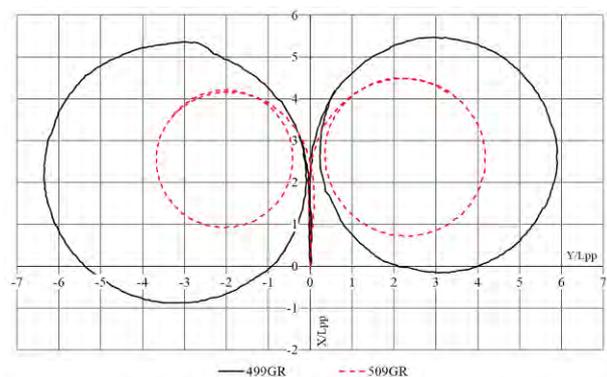


Fig. 4 ±35° Measured turning circle test trajectories

499GRの旋回航跡が大きくなった要因として、船尾形状による影響とトリムによる影響の二つが考えられる。船尾形状による影響については、山田の論文⁹⁾内で船尾形状とループ幅の関係について言及があり、逆G型の船尾を有する船型はマリナー型やスターンバルブ型の船尾を有する船型と比較して、針路安定性が良いことが報告されている。499GRは逆G型の船尾を有しており、マリナー型の船尾の509GRよりも針路安定性が良いために旋回航跡が大きくなったと考える。

またTable. 4に示す通り、499GRは509GRと比較して喫水が浅く船尾トリムが大きい。一般的に船尾トリムが大きいほど針路安定性が良くなり旋回性能が悪くなるので旋回航跡が大きくなったと考える。この影響について操縦性シミュレーション計算結果を用いて考察する。

4. 実運航状態試験

4.1 実施した試験とシミュレーションの概要

喫水の異なる実運航で旋回性能の確認のため、本船の協力を得て就航中に旋回試験を実施した。試験時の喫水などをTable. 6に、舵角や船速などの試験の条件をTable. 7に示す。計測値は海上公試運転時と同様に記録される。

海上公試運転時の旋回試験は35°で実施されているが、「実運航時の喫水での35°旋回は舵が効きすぎるため危険。」と本船より報告があり20°で旋回試験を実施した。

しかし、3.1で述べたように通常の海上公試運転と同様、35°旋回試験で評価する必要があると考え、20°旋回試験結果から、35°の旋回性能をシミュレーション計算⁴⁾を用いて推定した。その精度確認のために試運転時の35°旋回と、実運航時の20°旋回のシミュレーション計算を実施し、それぞれに対応した実船の旋回試験との比較を行い、それらが実用上、十分な精度であることを確認した。

シミュレーション計算の船速は各実船試験での値と同一とし、実運航状態の35°旋回性能の計算においては航海データより最大となる13ktとした。各シミュレーション計算に使用した線形微係数をTable. 8に示す。 Y'_β , N'_β は西日本流体技研で実施された本船の斜航試験結果より得られた値を使用し、ここに示されていないそれ以外の微係数は九州大学で実施された類似船のCMT試験結果の値を使用した。

Table. 6 Draft conditions in actual operating conditions trial

d_F (m)	3.350
d_A (m)	4.350
d_m (m)	3.900
Trim (m)	1.000

Table. 7 Conditions of $\pm 20^\circ$ turning circle test

δ (°)	δP (°)	δS (°)	V_S (kt)
20	20	20	11.6
-20	-20	-20	11.0

Table. 8 Linear coefficients of mathematical model

Condition	Trial condition	Operating condition
Y'_β	0.545	0.521
N'_β	0.023	0.109

4.2 実船試験結果とシミュレーション計算結果

実運航状態の20°旋回試験航跡をFig. 5に示す。試験時は船尾より4m/sの風を受けていた。なお、外乱の修正は実施していない。

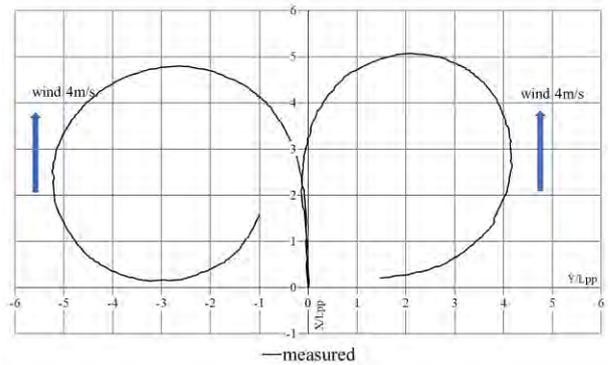


Fig. 5 $\pm 20^\circ$ Measured turning circle test trajectories

海上公試運転で実施された35°旋回試験のシミュレーション結果との比較をFig. 6に、それぞれの旋回縦距と旋回圏をTable. 9に示す。また実運航状態での20°旋回試験のシミュレーション結果との比較をFig. 7に、それぞれの旋回縦距と旋回圏をTable. 10に示す。

海上公試運転状態の試験結果とシミュレーション計算を比較すると、旋回航跡や船速の時系列変化は概ね一致している。また、実運航状態の試験結果には外乱の修正を施していないが、シミュレーション計算と比較すると、こちらも概ね一致している。

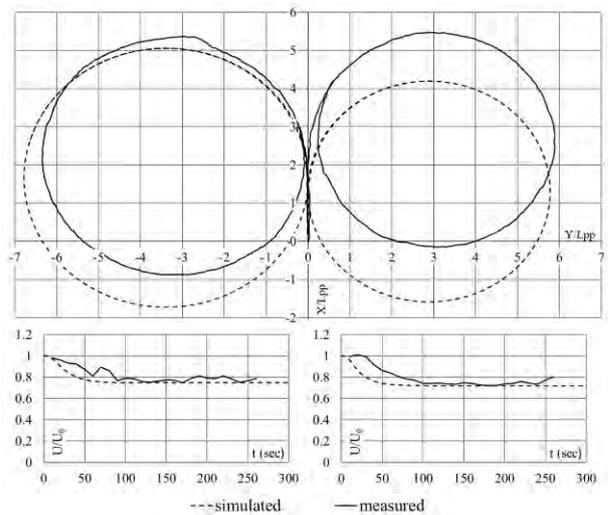


Fig. 6 Comparison of $\pm 35^\circ$ turning circle test trajectories and time histories of U/U_0

Table. 9 Comparison of advance and tactical diameter in $\pm 35^\circ$ turning circle test of trial conditions

δ (°)	simulated		measured	
	AD/L	DT/L	AD/L	DT/L
35	4.10	5.69	5.11	5.55
-35	4.98	6.69	4.95	6.09

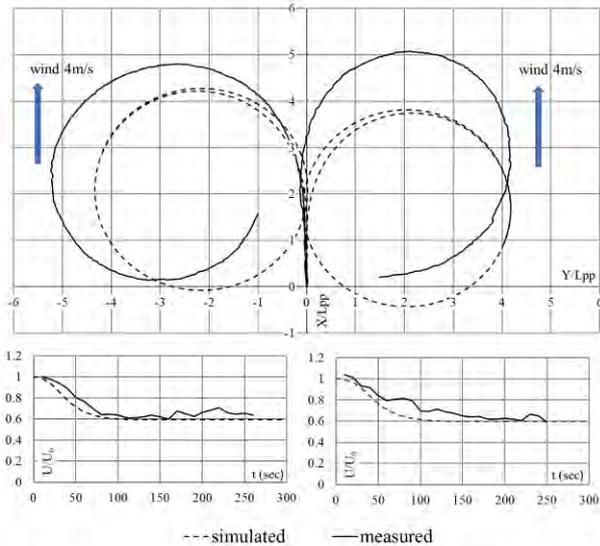


Fig. 7 Comparison of $\pm 20^\circ$ turning circle test trajectories and time histories of U/U_0

Table. 10 Comparison of advance and tactical diameter in $\pm 20^\circ$ turning circle test of operating conditions

δ (°)	simulated		measured	
	AD/L	DT/L	AD/L	DT/L
20	3.67	4.11	4.72	3.97
-20	4.14	3.97	4.49	4.86

4.3 実運航状態での 35° 旋回性能予測

実運航状態での 35° 旋回性能のシミュレーション計算結果を Fig. 8, Table. 11 に示す。Fig. 8 から旋回航跡は、Fig. 4 の海上公試運転結果と比較してかなり小さい結果となり、IMO の操縦性基準³⁾の、旋回縦距：4.5Lpp、旋回圏：5.0Lpp に収まっている。これらの結果より 499GR の海上公試運転時の大きな旋回航跡は排水量とトリムの影響によるものと判断でき、実運航での旋回性能は海上公試験結果より良い旋回性能を有していると判断する。

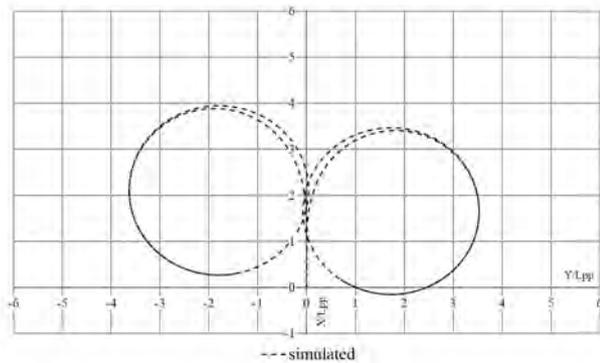


Fig. 8 $\pm 35^\circ$ turning circle test trajectories by simulation

Table. 11 Advance and Tactical diameter in $\pm 35^\circ$ turning circle test simulation of operating conditions

δ (°)	AD/L	DT/L
35	3.31	3.45
-35	3.78	3.54

3.1 で海上公試運転時と実運航状態での喫水に差があることを示した。喫水の差が旋回性能に及ぼす影響を海上公試運転結果とシミュレーション計算結果で比較すると Fig. 9 のようになり、499GR の実運航状態での旋回性能は通常舵を装備する同型船と同等と思われる。

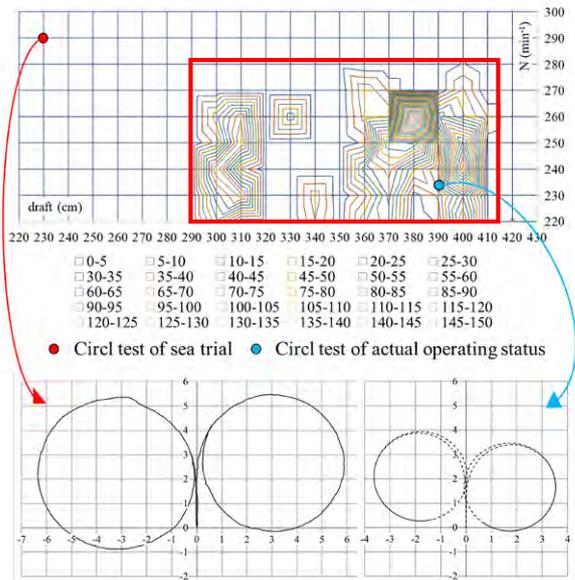


Fig. 9 Draft condition and turning ability

5. 離着棧性能に関する調査

5.1 本船の離着棧性能

先にも述べたが、ゲートラダーの特徴として通常航海時と港内操船時では最大舵角の切り替えが可能である。Fig. 10 に茨城港での 499GR の入出港時の航跡を示す。航跡を示す青線はブリッジにある GPS アンテナの位置で記録されている。岸壁の幅は約 200m で、入港時は北西より、出航時は北北西より微風があった。入港時の旋回航跡より、499GR は約 1.5Lpp の旋回径で旋回しており十分な離着棧性能を有していると判断する。

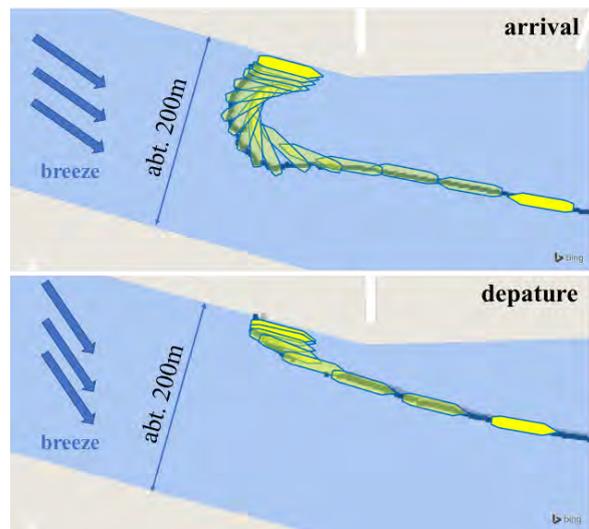


Fig. 10 Trajectories of 499GR at port operation

499GR は固定ピッチプロペラを装備しており、最低軸回転数がねじり振動の関係で比較的高い負荷での回転数にセットされている。当初、この影響があり一部の船長から、さらに大きな舵角での操船が可能なクラビングモ

ードを希望される声もあった。本船の最低回転数でのボラード推力が最大出力時の推力の 40%程度あり、港内操船時に大舵角を取った場合でも、前進推力が残ってしまうケースがあったためと考えられる。

5.2 実船におけるクラビングモード使用例

5.1 で述べた一部の船長コメントにあったクラビングモードについて、ゲートラダー装備船である「しげのぶ」のクラビングモードの有効性を示す神戸港への入港例を Fig. 11 に示す。航跡を示す青線はブリッジにある GPS アンテナの位置で記録されている。

岸壁の間隔は約 150m で、着岸時は西から風速 5~12m/s の風が吹いていた。Fig. 11 に示される入港時の航跡より、かなり狭隘な港湾でその場旋回できていることがわかる。クラビングモードを使用することで、このような強風下においてもこのような狭隘な港湾でその場旋回出来るのは、頻繁に出入港を繰り返す内航船においては、状況により有効な機能と考えられる。



Fig. 11 Trajectories of Shigenobu entering port

6. 結言

新たに就航したゲートラダー装備船の操縦性能について、海上公試運転結果、実運航時の操縦性能試験結果及び離着岸時の調査などより得られた結果について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

1. 同一形状の内航貨物船用ゲートラダーを神門丸(499GR)と光辰丸(509GR)に装備し、それらの操縦性能を確認した。
2. 両船の試運転状態は、実運航状態とは大きくかけ離れているため、旋回圏のやや大きかった神門丸(499GR)については、実運航状態の旋回性能についても調査を行った。
3. 499GR の海上公試運転で旋回航跡は 509GR より大きくなった。
4. その要因として排水量とトリム状態、および船尾形状の影響が考えられ、排水量とトリムの影響を考慮した実運航時の 35°旋回シミュレーション計算結果から、実運航時には IMO の操縦性基準内に収まることが予測できた。
5. 本船は試運転状態のような軽排水量で運航行されることがないために、旋回性能に問題はないことが確認された。
6. 今後 499GR のように、試運転時のような排水量とトリムで運航される船舶の場合には、船尾形状や舵形状に注意が必要となるので、設計段階で実運航状態の把握が重要となる。

7. ゲートラダー装備船においてクラビングモードは離着岸多い内航船では状況により有効な機能となることが示された。
8. 航海時には必要十分な操縦性能を確保し、港湾内では強力な操船性能の確保を目指すゲートラダーの設計指針の正しさが、あらためて両船の調査で確認できた。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、貴重なデータのご提供にご承諾を頂きました、協同商船株式会社 代表取締役社長 福田正美様、流体テクノ株式会社 代表取締役 玉島正裕様、小池造船海運株式会社 常務取締役 松本博明様、並びに神門丸で就航中の旋回試験を実施していただいた日立船舶株式会社 取締役社長 池田正人様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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), 日本船舶海洋工学会公演論文集, 第19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26号, 2014~2018.
- 2) Fukazawa M., Turkmen S., Marino A., Sasaki N. : Full-Scale GATE RUDDER Performance obtained from Voyage Data, A. Yücel Odabaşı, Colloquium Series: 3rd International Meeting, Istanbul, 2018
- 3) IMO (2002): Interim Standards for Ship Maneuverability, Resolution MSC137 (76).
- 4) Carchen A., Turkmen S., Piaggio B., Weichao, S., Sasaki N., Atlar M.: Investigation of the maneuverability characteristics of a Gate Rudder system using numerical, experimental, and full-scale techniques, Applied Ocean Research Volume 106, 2021
- 5) 山田孝三郎: 針路安定・追従性から見た大型肥大船型の船尾プロファイル形状と舵面積の決定法, 関西造船協会誌, 第236, pp.167-174, 2001

付 録

ここでは海上公試運転で実施された Z 試験と片舷旋回試験について述べる。

(1) Z 試験

Table. 12 に船速や舵角等の試験条件を示す。

Fig. 12 に Z 試験結果を、Table. 13 にオーバーシュート角を示す。両船共にオーバーシュート角は小さく、針路安定性が良いことがわかる。特に 499GR は 509GR より全体的に小さな値となっており、非常に顕著である。

Table. 12 Conditions of $\pm 10^\circ$ zig-zag test

δ (°)	499GR			509GR		
	δP (°)	δS (°)	V_s (kt)	δP (°)	δS (°)	V_s (kt)
10	10	10	13.9	10	10	13.7
-10	-10	-10	13.9	-10	-10	13.7

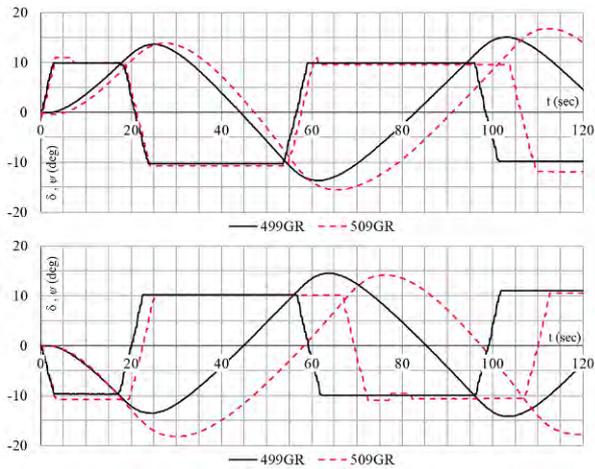


Fig. 12 Time histories of $\pm 10^\circ$ zig-zag test

Table. 13 Comparison of overshoot angles in $\pm 10^\circ$ zig-zag test

δ ($^\circ$)	499GR(Trial)		509GR	
	1 st OSA ($^\circ$)	2 nd OSA ($^\circ$)	1 st OSA ($^\circ$)	2 nd OSA ($^\circ$)
10	3.9	3.3	3.8	4.8
-10	3.8	4.3	7.4	4.0

(1) 片舷旋回試験

Table. 14 に船速や舵角等の試験条件を示す。

Fig. 13 に 499GR の片舷旋回試験結果を示す。旋回航跡には潮流修正を施している。作動していない舵の舵角は 0° となっている。試験結果より、旋回航跡は通常の 35° 旋回試験と比較して大きくなってしまいが、前舵と後舵のどちらでも旋回が可能である事がわかる。この試験は初期船速を 11.7kt にて実施したが、実際に片舷舵が故障し操舵不能になった際は、船速を下げた航行するため、ここで得られた旋回航跡よりも小さくなると考えられる。

Table. 14 Conditions of one side rudder turning circle test

δ ($^\circ$)	499GR		
	δP ($^\circ$)	δS ($^\circ$)	V_S (kt)
-	35	0	11.7
-	0	20	11.7

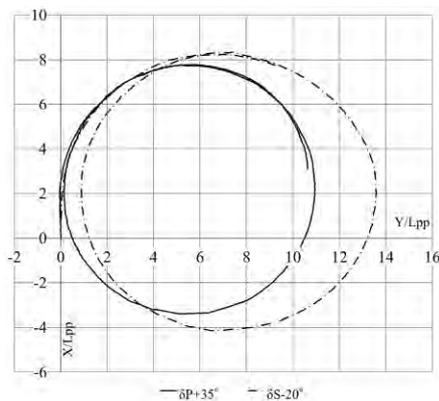


Fig. 13 Turning circle test trajectories of one side rudder