

2機2軸2舵船「鶴洋丸」の旋回性能に関する考察 - II

下田 真子, 兼原 壽生, 木下 宰, 森井 康宏, 高山 久明

A Study on the Turning Ability of Twin-engine, Twin-propeller, and Twin-rudder ship “KAKUYO MARU” - II

Masako SHIMODA, Hisao KANEHARA, Tsukasa KINOSHITA,
Yasuhiro MORII and Hisaaki TAKAYAMA

We made a turning trial of a twin-engine, twin-propeller, and twin-rudder ship “KAKUYO MARU”, that has equipped the two sets of main engines and rudders, and a comparison was made between two engines and one engine as well as between two rudders and one rudder about the factors of turning. The trial results are stated below.

- 1) Comparing to the operation of two engines, the ratio of steady turning diameter (D/L), the speed reduction rate (RATE), and the time for turning (TIME) were large when the position of engine and the turning direction was the same. And, these decreased when rudder angle was large. Also, the drift angle (ANGLE) was small and increased when rudder angle was large.
- 2) In comparison with using two engines, D/L and TIME when using one engine and turning to the opposite direction of engine position were small and increased when rudder angle was large. Also, the RATE and ANGLE were large and decreased when rudder angle was large.
- 3) When using one engine, D/L and TIME of turning by one rudder were 1.1 to 1.6 times larger than these of turning by two rudders at both turning directions and decreased when rudder angle was large. Also, RATE and ANGLE were as small as 0.7 to 1.0 times and increased when rudder angle was large.

Key Words : 定常旋回径比 Ratio of the steady turning diameter, 主機関両舷・片舷 Two engines and one engine, 舵連動・手動 Two rudders and one rudder

これまで数多くの船舶が建造され運航されているが、そのほとんどが1軸1舵船であり、その操縦性能も多く研究されてきた。しかし、近年では、用途の多様化により2軸2舵船も多く航行するようになり、模型実験による操縦性能も研究されている。^{1, 2)} 著者らは実船による2機2軸2舵船の旋回性能を把握するため、長崎大学水産学部附属練習船「鶴洋丸」(総トン数155トン)を供試船として旋回性能実験を行い、2機2軸2舵での定常旋回径比などについての結果を発表した。³⁾ 2機2軸2舵船では、主機関の使用法に関しては1機使用と2機使用の2種類および舵の使用法に関しては両舷舵指示舵角(以下、連動と称す)と主機関使用舷舵指示舵角・非使用舷舵中央(以下、手動と称す)の2種類があり、これらの組合せで種々の操船形態が考えられる。ここでは、先に行った主機関2機使用-舵連動による旋回性能実験に続き、主機関1機使用と主機関2機使用および舵連動と舵

手動の旋回性能実験を行い、操船形態の違いによる旋回時の定常旋回径、減速率、360°旋回所要時間および定常旋回中の偏角について比較、検討することを目的とした。

実験方法

1) 供試船「鶴洋丸」の主要目

供試船「鶴洋丸」は2機2軸2舵船で、Fig.1のように各プロペラと舵は船首尾線より各舷側に1.15m離れて設置されており、プロペラは外回りである。供試船の主要目をTable. 1に示す。

2) 実験の方法

旋回試験の実験条件は、以下の通りを基本として設定した。

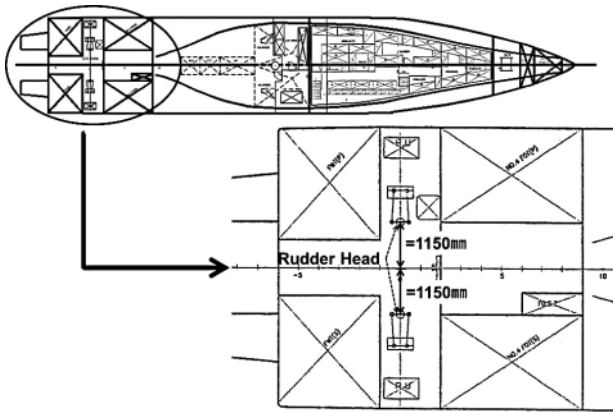


Fig. 1 Arrangement of "KAKUYO MARU"

Table 1 Principal particulars of "KAKUYO MARU"

Particulars	Items
Length over all	42.79m
Length register	35.43m
Length between perpendiculars (Lpp)	34.50m
Breadth(molded)	7.00m
Depth(molded)	3.19m
Draft designed(molded)	2.50m
Gross tonnage	155ton
Main engine	1,050Kw(1,428PS)×2
Propeller	Fixed 5 blades×2
Area of Rudder	1.28m ² ×2

- (1) 主機関回転数による船速2種類（極微速（DS/H）：575rpm, 微速（S/H）：950rpm）
- (2) 舵角3種類（10, 20および30°）
- (3) 旋回方向2種類（左および右旋回）
- (4) 進入針路2種類（南北の0°または180°と東西の90°または270°の組合せ）
- (5) 主機関使用法：1機使用と2機使用
1機使用旋回実験時の使用機関は左舷機
- (6) 舵の使用法：連動（両舷舵は同一舵角）と手動（左舷舵は指示舵角, 右舷舵は舵中央）

実船実験は、2009年10月9日、2009年10月29日および2009年11月13日に実施した。旋回はそれぞれ船首方位が720°回頭するまで行い、船位はサテライトコンパス（SC-120 FURUNO製）のGPS機能（以下、GPSと称す）を用いて船首方位と船速を1秒間隔で記録した。また、1機使用旋回実験における非使用舷のプロペラの遊転数は軸馬力計を用い5秒間隔で記録した。

3) 解析の方法

1秒間隔で記録した船位データを用いて旋回圏（Fig.2）を描くとともに、転舵発令時から船首方位の回頭が720°になるまで45°間隔で船位、船速、所要時間、偏角および速力減速率を求めた。

- (1) 定常旋回径

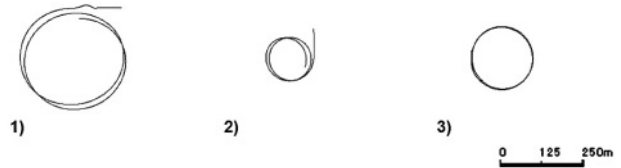


Fig. 2 Turning circle of "KAKUYO MARU" at S/H

一般的に船首方位が135°回頭時と315°回頭時の船位間の距離とされ、Fig.3に示した旋回圏⁴⁾の最終旋回径に当たる部分であるが、本研究では、船首方位が135°回頭時から720°回頭時までの各45°間隔で船位における回頭船首方位135°-315°、180°-360°、225°-405°、270°-450°、315°-495°、360°-540°、405°-585°、450°-630°、495°-675°および540°-720°における船位間の距離を漸長緯度航法で求め、それらの平均値を定常旋回径とした。

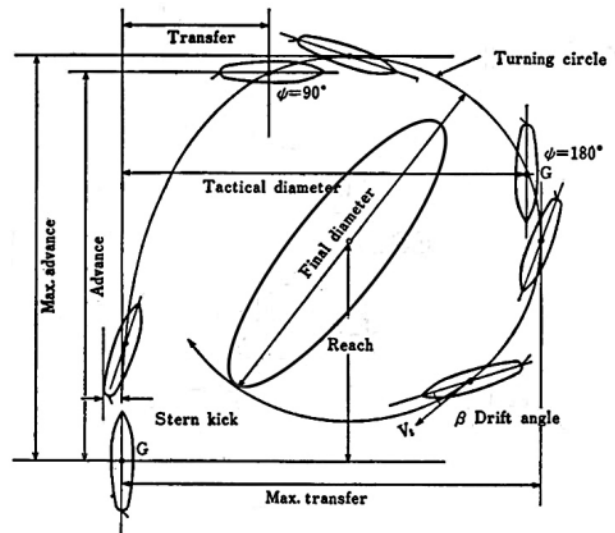


Fig. 3 Name of each part of turning circle⁴⁾

- (2) 360°旋回所要時間

転舵発令時から360°回頭時までの所要時間を360°旋回所要時間（sec）（以下、旋回所要時間と称す）とした。旋回船速は、船首方位の135°回頭時から720°回頭時までに45°間隔で記録したGPSによる船速の平均値を用いた。

- (3) 偏角

旋回実験中のジャイロコンパスによる船首方位と船体中央（船の1/2垂線長）に設置したGPSによる進路の差を偏角とし、船首方位135°回頭時から720°回頭時までに45°間隔で求めた偏角の平均値を用いた。

- (4) 速力減少率（以下、減速率と称す）

減速率（%）= {（初速 - 旋回船速） / 初速} × 100とし、船首方位135°回頭時から720°回頭時までに45°間隔で求めた減速率の平均値を旋回計測時の減速率とした。

結果及び考察

旋回実験実施時期および海域の気象条件、主機関使用法、舵の使用法および実験回数をTable 2に示す。

Table 2 Time, area and weather conditions of turning trial, and kind and number of trials

Time	Area	Average wind direction and speed (m/s)	Kind of trials		Number of trials
			Main Engine	Rudder	
October 9, 2009	Off Fukuda & Nagasaki	WSW 5.6	One	Two	22
October 29, 2009	Off Fukuda & Nagasaki	WSW 2.3	One	One	12
November 13, 2009	Off Fukuda & Shikimi	NE 4.3	Two	Two	12

定常旋回径, 旋回所要時間, 減速率, 偏角および遊転率は, 船速別, 舵角別および左右旋回別に, 2種類の進入針路の平均値を用いた。

1) 実験 I (2009年10月9日)

主機関 1 機使用, 舵連動で行った実験 I の結果を Table 3 に示す。

Table 3 Trial results of trial I (on 9, Oct. 2009)

Class	Rudder of ship angle speed (degree)	Turning direction	Steady turning diameter (m)	Time for turning (sec)	Initial ship speed (knot)	Speed deduction rate while turning (%)	Drift angle motion (°)	Idle rotary rate (%)	D/L
DS/H	10	Port	570	876	5	9	5	33	17
		Starboard	242	417	4	10	11	48	7
	20	Port	249	423	4	13	13	30	7
		Starboard	145	293	4	29	17	29	4
	30	Port	163	336	5	33	16	29	5
		Starboard	101	246	4	40	21	8	3
S/H	10	Port	561	513	8	11	9	52	16
		Starboard	248	249	8	20	16	42	7
	20	Port	230	235	7	20	17	47	7
		Starboard	155	177	7	27	24	34	5
	30	Port	151	149	7	28	22	37	4
		Starboard	105	189	7	41	26	28	3

実験 I における船速は極微速と微速の2種類, 舵角は10°, 20°および30°の3種類, 旋回方向は左と右の2種類で計22回行い, 実験条件における定常旋回径, 旋回所要時間, 減速率, 偏角および遊転率を求めた。

(1) 定常旋回径と減速率

船速と旋回方向の組合せにおける舵角と定常旋回径の大きさの関係を Fig. 4 に示す。

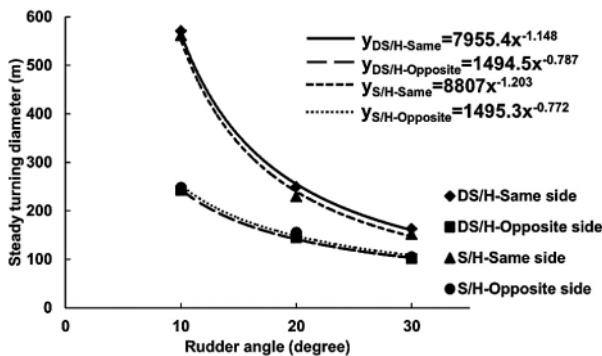


Fig. 4 Steady turning diameter by ship speed and rudder angle using one engine and two rudders (on 9, Oct. 2009)

ここで, 横軸に舵角, 縦軸に定常旋回径を示し, 船速と旋回方向の組合せは4種類である。図に示すように舵角が大きくなると定常旋回径は小さくなり, 旋回方向が反対舷の右旋回 (以下, 反対舷旋回と称す) の場合は, 舵角10°で242~248m (平均245m), 20°で145~155m (平均150m), 30°で101~105m (平均103m) であるのに対して, 旋回方向が同舷の左旋回 (以下, 同舷旋回と称す) の場合は, 舵角10°で561~570m (平均566m), 20°で230~249m (平均240m), 30°で151~163m (平均157m) であり, 反対舷旋回に対して同舷旋回の方が1.5~2.3倍と大きくなっている。Fig. 4 に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

$$\begin{aligned} \text{反対舷旋回: } Y_{DS/H-Opposite} &= 1494.5x^{-0.787} \\ Y_{S/H-Opposite} &= 1495.3x^{-0.772} \\ \text{同舷旋回: } Y_{DS/H-Same} &= 7955.4x^{-1.148} \\ Y_{S/H-Same} &= 8807x^{-1.203} \end{aligned}$$

旋回方向による定常旋回径の大きさは大きく異なるが, 船速による相異は小さく, 船速の速い方が定常旋回径は若干小さくなる程度であった。

また, 船速と旋回方向の組合せにおける舵角と減速率の関係を Fig. 5 に示す。

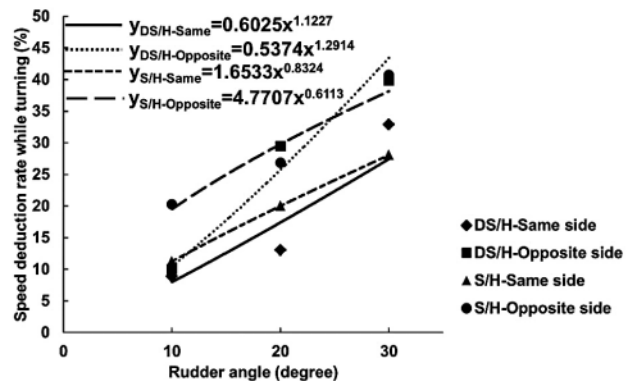


Fig. 5 Speed deduction rate while turning by ship speed and rudder angle using one engine and two rudders (on 9, Oct. 2009)

ここで, 横軸に舵角, 縦軸に減速率を示し, 船速と旋回方向の組合せは4種類である。図に示すように舵角が大きくなると減速率も大きくなり, 反対舷旋回の場合は, 舵角10°で10~20% (平均15%), 20°で27~29% (平均28%), 30°で40~41% (平均40%), 同舷旋回の場合は, 舵角10°で9~11% (平均10%), 20°で13~20% (平均17%), 30°で28~33% (平均31%) であり, 反対舷旋回に対して同舷旋回の方が0.6~0.8倍と小さく, 舵角に対する減速の割合も小さかった。Fig. 5 に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

$$\begin{aligned} \text{反対舷旋回: } Y_{DS/H-Opposite} &= 0.5374x^{1.2914} \\ Y_{S/H-Opposite} &= 4.7707x^{0.6113} \\ \text{同舷旋回: } Y_{DS/H-Same} &= 0.6025x^{1.1227} \\ Y_{S/H-Same} &= 1.6533x^{0.8324} \end{aligned}$$

(2) 旋回所要時間

船速および旋回方向の組合せにおける舵角と旋回所要時間の関係を Fig. 6 に示す。

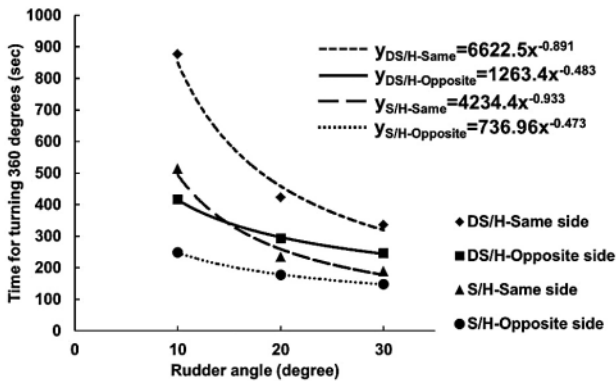


Fig. 6 Time for turning 360 degrees by ship speed and rudder angle using one engine and two rudders (on 9, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に旋回所要時間を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。舵角が大きくなると旋回所要時間は小さくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で249~417sec(平均333sec)、20°で177~293sec(平均235sec)、30°で189~246sec(平均218sec)であった。同舷旋回の場合は、舵角10°で513~876sec(平均695sec)、20°で235~423sec(平均329sec)、30°で149~336sec(平均243sec)であり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が舵角10°で約2.1倍、20°で約1.4倍、30°で1.1倍と大きかった。Fig. 6に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $Y_{DS/H-Opposite} = 1263.4x^{-0.483}$
 $Y_{S/H-Opposite} = 736.96x^{-0.473}$
 同舷旋回： $Y_{DS/H-Same} = 6622.5x^{-0.891}$
 $Y_{S/H-Same} = 4234.4x^{-0.933}$

(3) 偏角

船速と旋回方向の組合せにおける舵角と偏角の関係をFig. 7に示す。

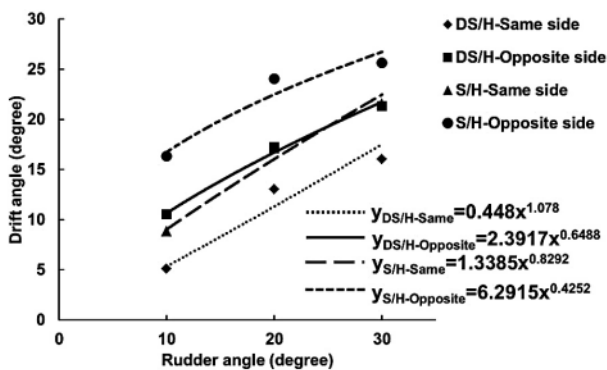


Fig. 7 Drift angle while turning by ship speed and rudder angle using one engine and two rudders (on 9, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に偏角を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。舵角が大きくなると偏角も大きくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で11~16°(平均14°)、20°で17~24°(平均22°)、30°で21~26°(平均24°)であった。同舷旋回の場合は、舵角10°で5~9°(平均7°)、20°で13~17°(平均15°)、30°で16~22°(平均19°)であり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が舵角10°で約0.5倍、20°で

約0.7倍、30°で0.8倍と小さかった。Fig. 7に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $Y_{DS/H-Opposite} = 2.3917x^{0.6488}$
 $Y_{S/H-Opposite} = 6.2915x^{0.4252}$
 同舷旋回： $Y_{DS/H-Same} = 0.448x^{1.078}$
 $Y_{S/H-Same} = 1.3385x^{0.8292}$

2) 実験Ⅱ (2009年10月29日)

主機関1機使用、舵手動で行った実験Ⅱの結果をTable 4に示す。

Table 4 Trial results of trial II (on 29, Oct. 2009)

Class of ship	Rudder angle (degree)	Turning direction	Steady turning diameter (m)	Time for turning (sec)	Initial ship speed (knot)	Speed deduction rate while turning (%)	Drift angle (°)	Idle rotary motion rate (%)	D/L
S/H	10	Port	868	802	7	9	6	51	25
		Starboard	302	294	7	15	13	41	9
	20	Port	297	306	7	20	14	46	9
		Starboard	188	203	8	25	20	36	5
	30	Port	225	282	7	27	17	41	7
		Starboard	131	169	8	36	25	32	4

実験条件における船速は微速のみで、舵角は10°、20°および30°の3種類、旋回方向は同舷と反対舷の2種類で計12回の旋回実験を行い、定常旋回径、所要時間、減速率、偏角および遊転率を求めた。

(1) 定常旋回径と減速率

旋回方向における舵角と定常旋回径の関係をFig. 8に示す。

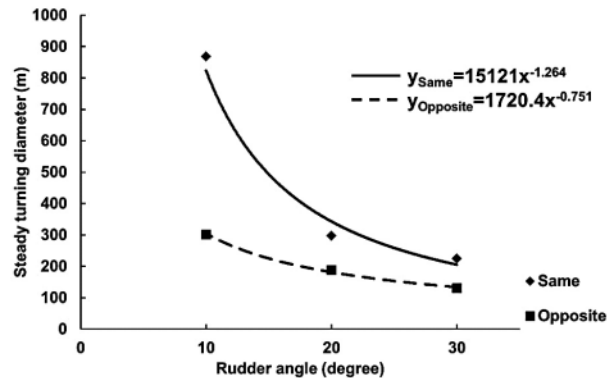


Fig. 8 Steady turning diameter by rudder angle using one engine and one rudder (on 29, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に定常旋回径を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。舵角が大きくなると定常旋回径は小さくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で302m、20°で188m、30°で131mであったのに対し、同舷旋回の場合は、舵角10°で868m、20°で298m、30°で225mであり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が1.6~2.9倍大きくなった。Fig. 8に示す旋回方向別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $Y_{Opposite} = 1720.4x^{-0.751}$
 同舷旋回： $Y_{Same} = 15121x^{-1.264}$

また、旋回方向における舵角と減速率の関係をFig.9に示す。

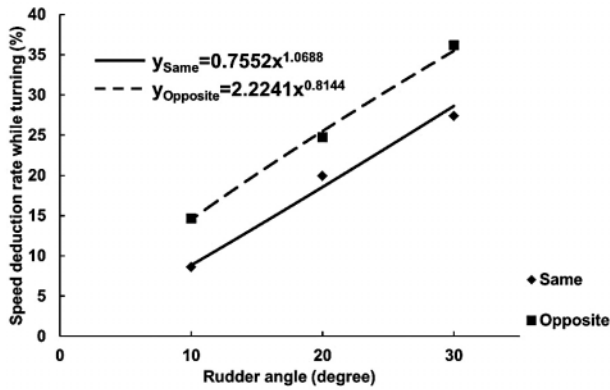


Fig. 9 Speed deduction rate while turning by rudder angle using one engine and one rudder (on 29, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に減速率を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。舵角が大きくなると減速率も大きくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で15%、20°で25%、30°で36%、同舷旋回の場合は、舵角10°で9%、20°で20%、30°で27%であり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が0.6~0.8倍と小さく、舵角に対する減速の割合はほぼ同程度であった。Fig.9に示す旋回方向別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $y_{Opposite}=2.2241x^{0.8144}$

同舷旋回： $y_{Same}=0.7552x^{1.0688}$

(2) 旋回所要時間

旋回方向における舵角と旋回所要時間の関係をFig.10に示す。

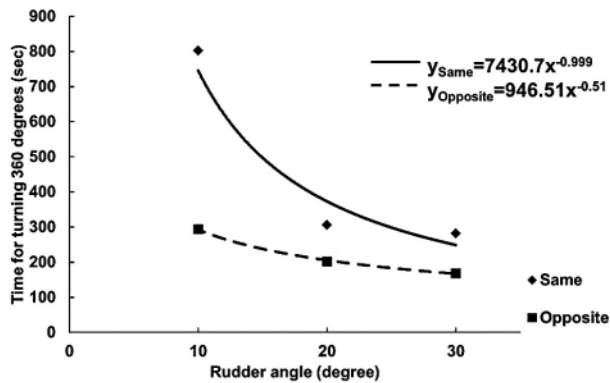


Fig.10 Time for turning 360 degrees by rudder angle using one engine and one rudder (on 29, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に旋回所要時間を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。舵角が大きくなると旋回所要時間は概ね小さくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で294sec、20°で203sec、30°で169sec、同舷旋回の場合は、舵角10°で802sec、20°で306sec、30°で282secであり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が舵角10°で約2.7倍、20°で約1.5倍、30°で1.7倍と大きくなった。Fig.10に示す旋回方向別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $y_{Opposite}=946.51x^{-0.51}$

同舷旋回： $y_{Same}=7430.7x^{-0.999}$

(3) 偏角

旋回方向における舵角と偏角の関係をFig.11に示す。

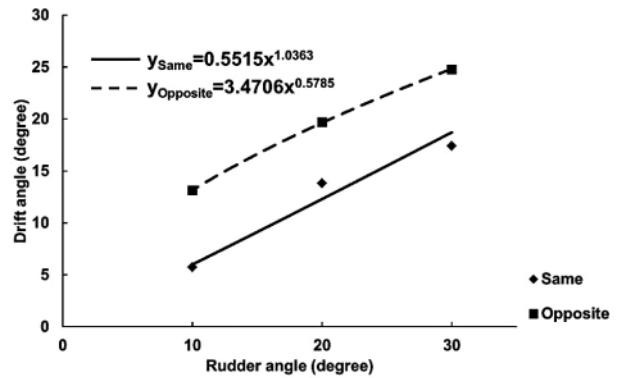


Fig.11 Drift angle while turning by rudder angle using one engine and one rudder (on 29, Oct. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に偏角を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。舵角が大きくなると偏角も大きくなり、反対舷旋回の場合は、舵角10°で13°、20°で20°、30°で25°、同舷旋回の場合は、舵角10°で6°、20°で14°、30°で17°であり、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が、舵角10°で約0.5倍、20°および30°で約0.7倍と小さかった。Fig.11に示す旋回方向別に求めた回帰曲線は次のようになった。

反対舷旋回： $y_{Opposite}=3.4706x^{0.5785}$

同舷旋回： $y_{Same}=0.5515x^{1.0363}$

3) 実験Ⅲ (2009年11月13日)

主機関2機使用、舵連動で行った実験Ⅲの結果をTable 5に示す。

Table 5 Trial results of trialⅢ (on 13, Nov. 2009)

Class of ship speed	Rudder angle (degree)	Turning direction	Steady turning diameter (m)	Time for turning (sec)	Initial ship speed (knot)	Speed deduction rate while turning (%)	Drift angle (°)	D/L
DS/H	10	Starboard	378	470	5	2	10	11
	20	Starboard	183	259	5	16	17	5
	30	Starboard	127	210	5	28	22	4
S/H	10	Starboard	364	276	9	6	12	11
	20	Starboard	181	156	9	19	22	5
	30	Starboard	128	129	9	32	28	4

実験条件における船速は極微速と微速の2種類、舵角は10°、20°および30°の3種類、旋回方向は反対舷旋回のみで計12回の旋回実験を行い、定常旋回径、旋回所要時間、減速率および偏角を示した。

(1) 定常旋回径と減速率

船速における舵角と定常旋回径の関係をFig.12に示す。

ここで、横軸に舵角、縦軸に定常旋回径を示し、船速は極微速と微速の2種類である。舵角が大きくなると定常旋回径は小さくなり、舵角10°で364~378m (平均371m)、20°で181~183m (平均182m)、30°で127~128m (平均127m)で

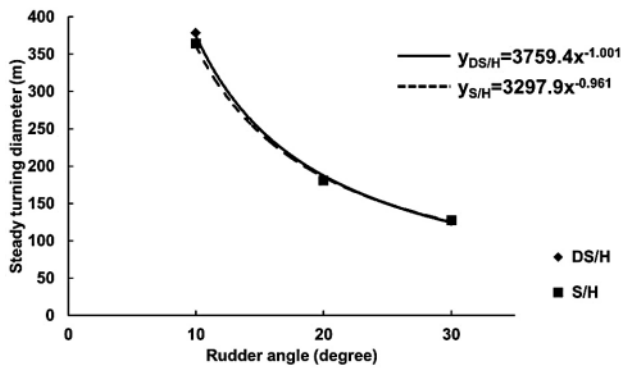


Fig.12 Steady turning diameter by ship speed and rudder angle using two engines and two rudders (on 13, Nov. 2009)

あった。Fig.12に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになり、船速による定常旋回径の差はほとんど無かった。

極微速： $y_{DS/H} = 3759.4x^{-1.001}$
 微速： $y_{S/H} = 3297.9x^{-0.961}$

また、船速における舵角と減速率の関係を図.13に示す。

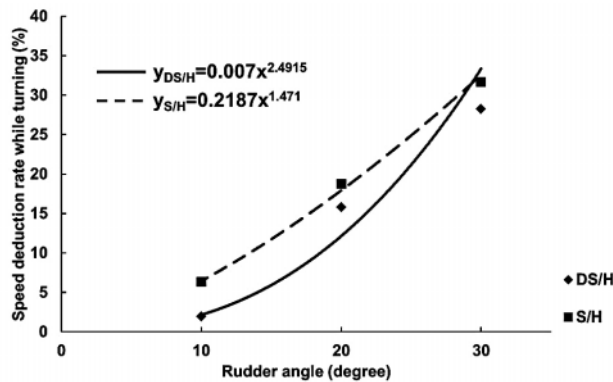


Fig.13 Speed deduction rate while turning by ship speed and rudder angle using two engines and two rudders (on 13, Nov. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に減速率を示し、船速は極微速と微速の2種類である。舵角が大きくなると減速率も大きくなり、舵角10°で2～6%（平均4%）、20°で16～19%（平均18%）、30°で28～32%（平均30%）であった。Fig.13に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

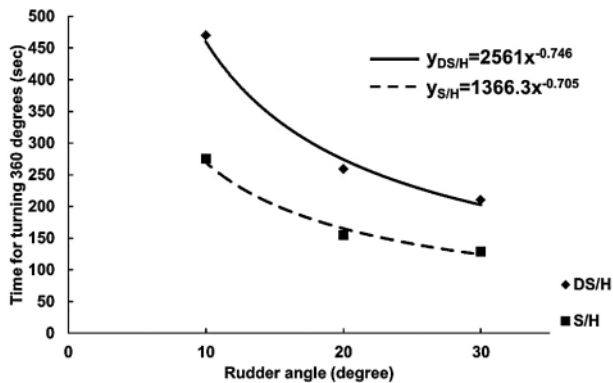


Fig.14 Time for turning 360 degrees by ship speed and rudder angle using two engines and two rudders (on 13, Nov. 2009)

極微速： $y_{DS/H} = 0.007x^{2.4915}$

微速： $y_{S/H} = 0.2187x^{1.471}$

(2) 旋回所要時間

船速における舵角と旋回所要時間の関係をFig.14に示す。

ここで、横軸に舵角、縦軸に旋回所要時間を示し、船速は極微速と微速の2種類である。舵角が大きくなると旋回所要時間は小さくなり、舵角10°で276～470sec（平均373sec）、20°で156～259sec（平均208sec）、30°で129～210sec（平均170sec）であった。Fig.14に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

極微速： $y_{DS/H} = 2561x^{-0.746}$

微速： $y_{S/H} = 1366.3x^{-0.705}$

(3) 偏角

船速における舵角と偏角の関係をFig.15に示す。

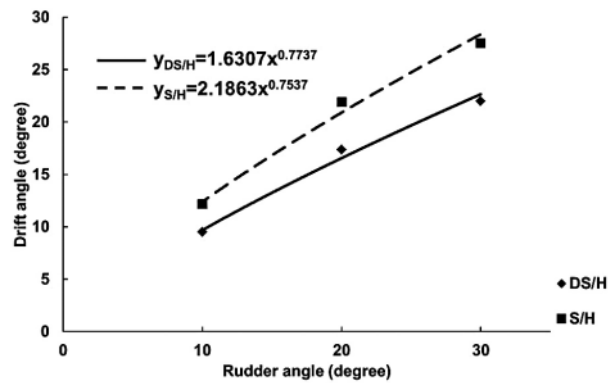


Fig.15 Drift angle while turning by ship speed and rudder angle using two engines and two rudders (on 13, Nov. 2009)

ここで、横軸に舵角、縦軸に偏角を示し、船速は極微速と微速の2種類である。舵角が大きくなると偏角も大きくなり、舵角10°で10～12°（平均11°）、20°で17～22°（平均20°）、30°で22～28°（平均25°）であった。Fig.15に示す船速別に求めた回帰曲線は次のようになった。

極微速： $y_{DS/H} = 1.6307x^{0.7737}$

微速： $y_{S/H} = 2.1863x^{0.7537}$

4) 2機使用時と1機使用時の比較

1軸1舵船における前進旋回中の転心点は船首尾線上にあり、その位置は船の重心から前方1/3L～1/4Lの所にある⁴⁾とされるが、2機2軸2舵船におけるプロペラおよび舵の位置は左右対称であり、2機使用の場合も同様である。しかし、2機2軸2舵船の供試船ではプロペラおよび舵の位置が船首尾線から1.15m舷側に偏しており、1機使用航行ではプロペラが船首尾線上の転心点に2.3～3.8°の角度で偏って推力を与えることとなるため、舵中央でも反対舷に回頭しようとする。ここでは、主機関を2機使用した場合と1機使用した場合における旋回時の諸要素を比較するため、実験Ⅰの主機関1機使用、舵連動の旋回実験と実験Ⅲの主機関2機使用、舵連動の旋回実験の結果を用い、主機関2機使用時に対する1機使用時の定常旋回径比（D/L：定常旋回径/船の垂線間長（L_{pp}））、減速率、旋回所要時間、偏角の割合を求めTable 6に示した。

Table 6 Ratio between one engine and two engines

Class of ship speed	Rudder angle (degree)	Turning direction	D/L	Time for turning	Speed deduction rate while turning	Drift angle
DS/H	10	Same side	1.51	1.87	4.53	0.53
		Opposite side	0.64	0.89	5.10	1.11
	20	Same side	1.37	1.63	0.83	0.75
		Opposite side	0.79	1.13	1.87	0.99
	30	Same side	1.28	1.60	1.16	0.73
		Opposite side	0.80	1.17	1.41	0.97
S/H	10	Same side	1.54	1.86	1.77	0.72
		Opposite side	0.68	0.90	3.18	1.34
	20	Same side	1.27	1.51	1.07	0.78
		Opposite side	0.86	1.14	1.43	1.10
	30	Same side	1.19	1.47	0.89	0.78
		Opposite side	0.82	1.15	1.29	0.93

(1) D/L

船速と舵角の組合せにおける主機関2機使用旋回時のD/Lに対する主機関1機使用-同舷旋回と主機関1機使用-反対舷旋回のD/Lの割合をFig.16に示す。

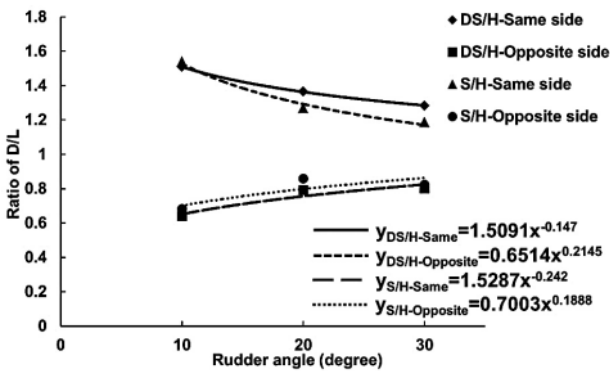


Fig.16 Ratio of D/L between one engine and two engines by ship speed and rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に2機使用旋回のD/Lに対する1機使用旋回のD/Lの比を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。2機使用旋回に対して同舷旋回のD/Lは1.2~1.5倍と大きいですが、各船速とも舵角が大きくなると比は小さくなり、2機使用旋回との差は小さくなった。その回帰式は次のようになった。

極微速: $Y_{DS/H-Same} = 1.5091x^{-0.147}$
 微速: $Y_{S/H-Same} = 1.5287x^{-0.242}$

また、2機使用旋回に対して反対舷旋回のD/Lは0.6~0.9倍と小さいが、舵角が大きくなると比も大きくなり、2機使用旋回に近づいた。その回帰式は次のようになった。

極微速: $Y_{DS/H-Opposite} = 0.6514x^{0.2145}$
 微速: $Y_{S/H-Opposite} = 0.7003x^{0.1888}$

(2) 減速率

船速と舵角別の組合せにおける2機使用旋回時の減速率に対する同舷旋回および反対舷旋回の減速率の割合をFig.17に示す。

ここで、横軸に舵角、縦軸に2機使用旋回の減速率に対する1機使用旋回の減速率の比を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。1機使用旋回の初速は2機使用旋回の初速の約85%であり、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類であるが、どちらの場合も舵角が大きくなると減速率も大

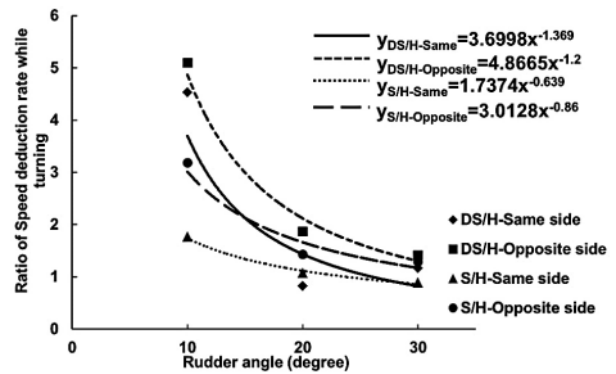


Fig.17 Ratio of speed deduction rate while turning between one engine and two engines by ship speed and rudder angle

きくなる傾向は同じである。各舵角における同舷旋回の減速率は2機使用旋回に対して1機使用旋回の方が大きいですが、舵角が大きくなると比は小さくなり、その値は舵角10°で1.3~4.5倍に対し、舵角20°で0.8~1.1倍、30°で0.9~1.2倍と2機使用旋回と大差が無かった。その回帰式は次のようになった。

極微速: $Y_{DS/H-Same} = 3.6998x^{-1.369}$
 微速: $Y_{S/H-Same} = 1.7374x^{-0.639}$

また、反対舷旋回でも2機使用旋回に対して1機使用旋回の減速率が大きく、舵角が大きくなると比は小さくなるが、その値は舵角10°で2.2~5.1倍、20°で1.4~1.9倍、30°1.3~1.4倍といずれの舵角でも大きくなった。その回帰式は次のようになった。

極微速: $Y_{DS/H-Opposite} = 4.8665x^{-1.2}$
 微速: $Y_{S/H-Opposite} = 3.0128x^{-0.86}$

(3) 旋回所要時間

船速と舵角の組合せにおける2機使用旋回時の旋回所要時間に対する同舷旋回および反対舷旋回の旋回所要時間の割合をFig.18に示す。

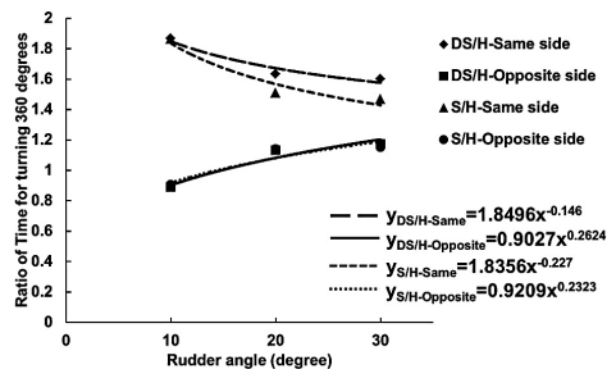


Fig.18 Ratio of time for turning 360 degrees between one engine and two engines by ship speed and rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に2機使用旋回の旋回所要時間に対する1機使用旋回の旋回所要時間の比を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。同舷旋回では2機使用旋回に対する1機使用旋回の旋回所要時間は1.5~1.9倍と大きく、各船速において舵角が大きくなると比は小さくなり、その回

帰式は次のようになった。

極微速： $Y_{DS/H-Same}=1.8496x^{-0.146}$

微速： $Y_{S/H-Same}=1.8356x^{-0.227}$

また、反対舷旋回では2機使用旋回に対する1機旋回の旋回所要時間は0.9~1.2倍であり、舵角が大きくなると比も大きくなったが、舵角10°では2機使用旋回より小さく20°と30°では大きくなった。これは1機使用旋回の船速が2機使用旋回の約85%と遅い上に、減速率も大きくなったことに起因している。その回帰式は次のようになった。

極微速： $Y_{DS/H-Opposite}=0.9027x^{0.2624}$

微速： $Y_{S/H-Opposite}=0.9209x^{0.2323}$

(4) 偏角

船速と舵角の組合せにおける2機使用旋回時の偏角に対する同舷旋回および反対舷旋回の偏角の割合をFig.19に示す。

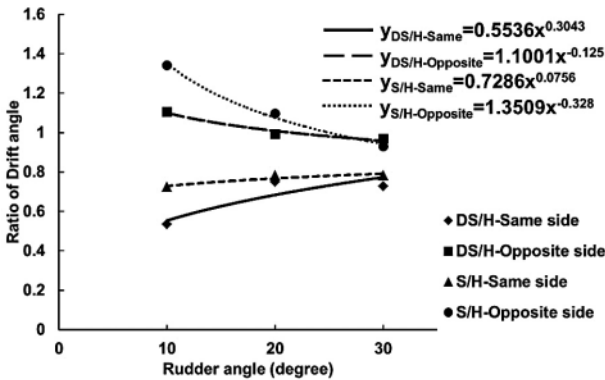


Fig.19 Ratio of drift angle while turning between one engine and two engines by ship speed and rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に2機使用旋回の偏角に対する1機使用旋回の偏角の比を示し、船速と旋回方向の組合せは4種類である。同舷旋回では2機使用旋回に対して1機使用旋回の方が小さく0.5~0.8倍であるが、各船速において舵角が大きくなると比も大きくなり、その回帰式は次のようになった。

極微速： $Y_{DS/H-Same}=0.5536x^{0.3043}$

微速： $Y_{S/H-Same}=0.7286x^{0.0756}$

また、反対舷旋回では2機使用旋回に対する1機使用旋回は0.9~1.4倍で、舵角が大きくなると比は小さくなり、舵角10°で2機使用旋回より大きく、20°ではほぼ同値であり、30°では小さくなった。その回帰式は次のようになった。

極微速： $Y_{DS/H-Opposite}=1.1001x^{-0.125}$

微速： $Y_{S/H-Opposite}=1.3509x^{-0.328}$

これらの結果、2機使用旋回に対して同舷旋回では偏角および減速率は小さいが、D/Lおよび旋回所要時間は大きくなった。また、反対舷旋回では、減速率は大きく、D/Lは小さくなったが、偏角および旋回所要時間に大差は無かった。2機2軸2舵船のプロペラ推力が船首尾線から舷側に離れていることで、その作用線は船首尾線の上にはなく、供試船の場合の作用線は船首尾線に約3°の角度をなしているものと推定される。2機使用時では、2機のプロペラ推力が同じであり、その作用線の交点は船首尾線上にあるが、1機使用時

では一方のプロペラ推力は遊転による回転によるのみで弱く、その交点は反対舷に移動するものと思われる。このため、同舷旋回では舵効に対しプロペラ推力による直進力が反対舷に働き旋回力を低下させた結果、D/Lおよび旋回所要時間は大きくなり、減速率および偏角は小さくなった。一方、反対舷旋回ではプロペラ推力による直進力が舵効と同方向に働き旋回力を向上させた結果、D/Lおよび旋回所要時間が小さく、減速率および偏角が大きくなったと考えられる。

5) 連動と手動

2機2軸2舵船では、主機関だけでなく舵もそれぞれ単独で使用できる。通常は連動させて使用するが、出入港時では単独を多く利用している。ここでは、舵連動と舵手動の旋回における諸要素を比較するため、実験Iの微速での舵連動の1機使用旋回実験と実験IIの微速での舵手動の1機使用旋回実験の結果を用いて、旋回方向別の舵連動に対する舵手動のD/L、減速率、旋回所要時間および偏角の割合を求めTable 7に示した。

Table 7 Ratio between one rudder and two rudders

Rudder angle (degree)	Turning direction	D/L	Time for turning	Speed deduction rate while turning	Drift angle
10	Same side	1.55	1.56	0.77	0.65
	Opposite side	1.21	1.18	0.72	0.80
20	Same side	1.30	1.30	1.00	0.81
	Opposite side	1.21	1.14	0.92	0.82
30	Same side	1.49	1.49	0.98	0.81
	Opposite side	1.25	1.13	0.89	0.97

(1) D/L

旋回方向における舵角とD/Lの舵連動に対する舵手動の比（以下、手動/連動と称す）の関係をFig.20に示す。

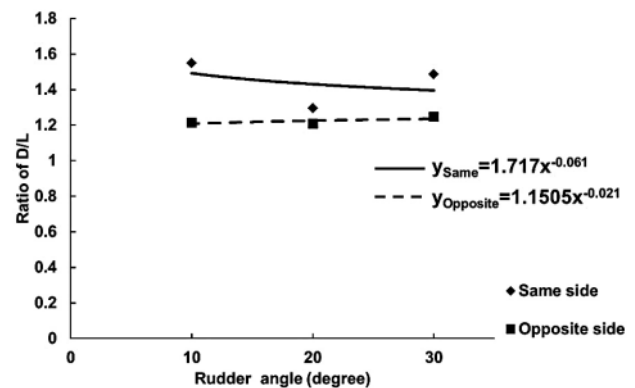


Fig.20 Ratio of D/L between one rudder and two rudders by rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸にD/Lの手動/連動の関係を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。D/Lの手動/連動は舵角と旋回方向に違いに関係なく1を超えて、舵手動が舵連動より大きくなり、同舷旋回で1.3~1.6倍、反対舷旋回で1.2~1.3倍であった。さらに、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が1.1~1.3倍であった。その回帰式は

次のようになった。

同舷旋回： $Y_{Same}=1.717x^{-0.061}$

反対舷旋回： $Y_{Opposite}=1.1505x^{-0.021}$

(2) 減速率

旋回方向における舵角と減速率の手動/連動の関係をFig.21に示す。

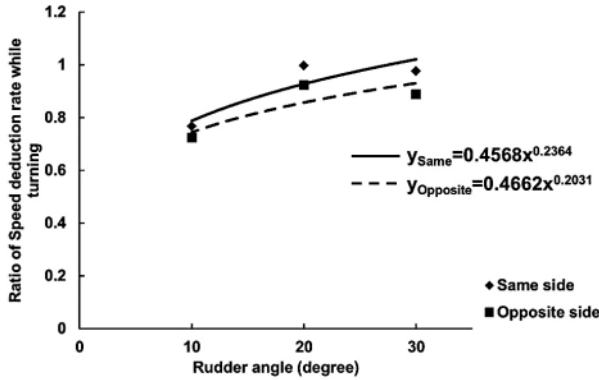


Fig.21 Ratio of speed deduction rate while turning between one rudder and two rudders by rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に減速率の手動/連動の関係を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。減速率の手動/連動は舵角と旋回方向に関係なく1未満で、舵手動は舵連動の0.7~1.0倍であるが、舵角が大きくなると大きくなり1に近づいた。さらに、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が1.1倍と大きかった。その回帰式は次のようになった。

同舷旋回： $Y_{Same}=0.45682x^{0.2364}$

反対舷旋回： $Y_{Opposite}=0.4662x^{0.2031}$

(3) 旋回所要時間

旋回方向における舵角と旋回所要時間の手動/連動の関係をFig.22に示す。

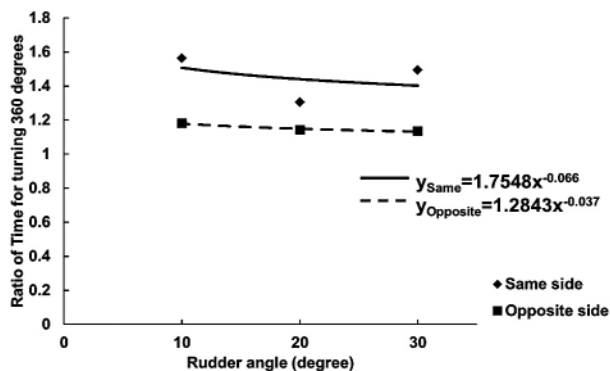


Fig.22 Ratio of time for turning 360 degrees between one rudder and two rudders by rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に旋回所要時間の手動/連動の関係を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。旋回所要時間の手動/連動は舵角と旋回方向に関係なく1を超えて舵手動が舵連動より大きくなり、同舷旋回で1.3~1.6倍、反対舷旋回で1.1~1.2倍であった。さらに、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が1.1~1.3倍と大きく、その傾向

はD/Lの場合に極似していた。その回帰式は次のようになった。

同舷旋回： $Y_{Same}=1.7548x^{-0.066}$

反対舷旋回： $Y_{Opposite}=1.2843x^{-0.037}$

(4) 偏角

旋回方向における舵角と偏角の手動/連動の関係をFig.23に示す。

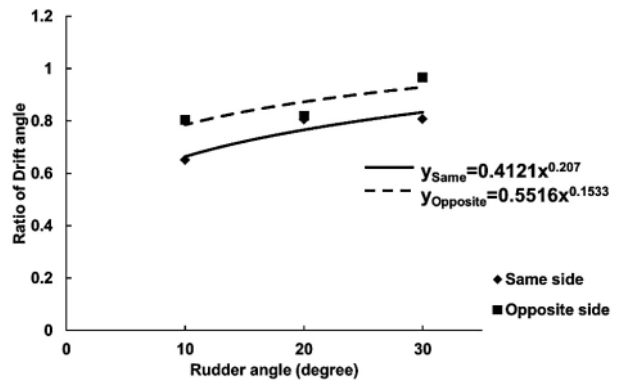


Fig.23 Ratio of drift angle while turning between one rudder and two rudders by rudder angle

ここで、横軸に舵角、縦軸に偏角の手動/連動関係を示し、旋回方向は同舷方向と反対舷方向の2種類である。偏角の手動/連動は舵角と旋回方向に関係なく1未満で、舵手動が舵連動より小さく0.7~1.0倍であるが、舵角が大きくなると大きくなり1に近づいた。さらに、反対舷旋回に対して同舷旋回の方が0.8~1倍と小さかった。その回帰式は次のようになった。

同舷旋回： $Y_{Same}=0.4121x^{0.207}$

反対舷旋回： $Y_{Opposite}=0.5516x^{0.1533}$

これらの結果、いずれの場合もD/Lおよび旋回所要時間は舵手動が舵連動より1.1~1.6倍大きく、減速率および偏角では0.7~1.0倍小さかった。また、同舷旋回ではその差は大きく、反対舷旋回では小さくなった。これは、旋回時には非使用舷のプロペラも遊転を起し、その割合はTable 3およびTable 4に示したように使用舷のプロペラ回転数の約30~50%の回転数で回っており、その推力が主機関使用舷の反対舷に作用しているのも一要因と考えられる。

おわりに

以上の旋回実験の解析により、2機2軸2舵船における主機関前進の同一舵角における旋回では、主機関1機使用・舵連動・反対舷旋回の場合で旋回径および旋回所要時間が最も小さく、主機関1機使用・舵手動・同舷回頭の場合で旋回径が大きく旋回所要時間も長い結果となった。船舶が航行する場合の主機関にかかる負荷は船速および舵角に比例して大きくなる。2機2軸2舵船の主機関にかかる負荷は2機使用航行に比べ1機使用航行で大きくなる。また、2機使用旋回においては、旋回の内側になる同舷の主機関にかかる負荷が外側になる反対舷の主機関よりさらに大きくなる。これらから

1 機使用航行時に回頭する場合は、船速のみならず回頭方向により舵角を決定することが肝要である。供試船での旋回では中速における舵角 30° で同舷主機関が過負荷となる可能性が発生した。したがって、本研究では最大負荷を微速の舵角 30° としての実験となった。

謝 辞

本研究の資料収集にあたり長崎大学水産学部附属練習船「鶴洋丸」の乗組員一同にご協力を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林弘明・石橋篤・長谷川祐司・中西裕司：二軸二舵船の操縦性能に関する研究，日本航海学会論文集No.86, pp.205-213.(1992)
- 2) 小林弘明・石橋篤・長谷川祐司：二軸二舵船の船体・プロペラ・舵の相互干渉について，日本航海学会論文集 No.87, pp.171-178.(1993)
- 3) 兼原壽生・内田淳・青島隆・木下宰・島田亜加里・高山久明：二機二軸二舵船「鶴洋丸」の旋回性能に関する考察，長崎大学水産学部研究報告 No.90, pp.1-7, (2009).3
- 4) 本田啓之輔：操船通論，成山堂書店，pp.16-39.(1986)