練習船「豊潮丸」の横傾斜時における操縦性能

松本 隼人¹・平田 法隆²・安川 宏紀²

Maneuverability of a Training Ship "Toyoshio-Maru" in Heeled Condition

Hayato MATSUMOTO, Noritaka HIRATA and Hironori YASUKAWA

Abstract

It is well known that the heel affects the ship maneuverability significantly, however there is no quantitative evidence on the maneuvering motions of full-scale ships so far. To capture the heel effect on the ship maneuverability, full-scale trials were carried out using a training ship "Toyoshio-Maru" of Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, Japan. Zig-zag test and turning test were conducted in 4 different heeled conditions. Motion measurement was performed using a K-GPS (Kinematic GPS) system with 3 antennas placed on the ship. The heel angle ϕ was varied as 3.5, -0.4, -1.5, and -5.6 degrees. Negative ϕ means the heel to port side. In case that the azimuth angle was -10 degrees, the turning circles become large with increasing the heel angle to port side. In case that the azimuth angle was 10 degrees, on the other hand, the turning circles become small with increasing the heel angle. The heel angle increase to the port side is corresponding to the azimuth angle increase to positive direction. In case of the present ship "Toyoshio-Maru", -2 degrees of the heel angle is equivalent to almost 1 degree of the azimuth angle.

Thus, the heel effect on the ship maneuvering motions was successfully captured in full-scale trials.

Keywords : maneuverability, heel, K-GPS, full-scale trials

キーワード: 操縦性、横傾斜、K-GPS、実船試験

1. 緒言

荷崩れや外板損傷等が原因で船体が横傾斜すると、船体の左右対称性が壊れ、操縦性能に大きな影響を及ぼすことがある。そのような横傾斜が起こった際の操縦性能を知ることは、海難事故防止への一助になると考えられる。

横傾斜しながら航行する船の操縦性能については、流体力特性を把握するための拘束模型試験をベースとした安川・平田の研究例⁽¹⁾があるが、横傾斜する船の操縦運動特性を実船試験において計測し、定量的に把握した例はないように思われる。

一方で、近年では GPS 技術の発達により、船の操縦運動を高精度で計測することが可能となっている。本研究では、K-GPS⁽²⁾を用いて、Table 1 に示す主要目を持つ広島大学生物生産学部の練習船「豊潮丸」⁽³⁾を対象に、横傾斜時にはどのような操縦運動特性を

Table 1 Principal dimensions of "Toyoshio-Maru"

L_{OA} (m)	40.50
L_{PP} (m)	35.50
B_{mld} (m)	8.50
D_{mld} (m)	3.70
V_s (m/s)	5.40

¹ 学生会員 広島大学大学院工学研究科

² 正会員 広島大学大学院工学研究科 (〒739-0046 広島県東広島市鏡山 1-4-1) nhirata@naoe.hiroshima-u.ac.jp

Fig. 1 Coordinate systems

示すのか、を把握するため実船試験を行った。なお、「豊潮丸」はバトックフロー船型を採用した電気推進船であり、舵は持たず、首振り式の推進・操舵装置2基を用いて操船する。

2. 座標系

Fig. 1 に使用する座標系を示す。空間固定系 $O-X_0Y_0Z_0$ と船体水面固定座標系 $G-xyz$ の二つの座標系を考える。原点は試験開始時における船の重心位置にとり、その時の船の船首方向に x 軸、横方向に y 軸、鉛直下向きに z 軸をとる。 X_0 軸に対して x 軸のなす角を回頭角 ψ とする。また、ロール角を ϕ とし、船を後方から見た時、時計回りの回転方向を正とする。 δ は首振り式の推進・操舵装置の首振り角であり、左右舷で同じ角度をとることとする。この船は舵を搭載していない。船体固定系の x 軸、 y 軸方向の速度成分を u 、 v とし、 z 軸まわりの回頭角速度を r とする。

3. 海上試験の概要

3.1 試験の概要

海上試験は直進航行試験、旋回試験、Zig-zag 試験（以後 Z 試験）の三種類を行った。CPP の翼角は $BA=16\text{deg}$ と一定に保ち、「豊潮丸」の横傾斜角を $\phi=+3.5\text{deg}$, -0.4deg , -1.5deg , -5.6deg の四種類に変更させて試験を実施し、それらの結果を比較することで横傾斜の影響を把握した。各試験の詳細を Table 2 に示す。直進航行試験とは、横傾斜角がついた状態

Table 2 Trial conditions

Straight moving test with heel	Keeping $\delta = 0$, Using autopilot
Turning test with heel $\phi=+3.5, -1.5, -5.6\text{deg}$	$\delta = \pm 10\text{deg}, \pm 35\text{deg}$
Turning test without heel ($\phi=-0.4\text{deg}$)	$\delta = \pm 5\text{deg}, \pm 10\text{deg}, \pm 20\text{deg}, \pm 35\text{deg}$
Zig-zag test	$\delta/\psi = \pm 10\text{deg}, \pm 20\text{deg}$

で、直進航行するときの操縦運動を計測するものであり、首振り角は 0deg とした場合とオートパイロットを使用した場合の二つを実施した。できるだけ外乱影響を排除するために 0.926km の航路を往復した。船速の平均は 4.4m/s であった。

3.2 試験状態

Table 3 に海上試験における船の载荷状態と環境状況を示す。2012 年 5 月 16 日に $\phi=-1.5\text{deg}$, -5.6deg の試験を、2012 年 5 月 17 日に $\phi=+3.5\text{deg}$, -0.4deg の試験を実施した。試験は瀬戸内海の宮島南沖で実施した。両日とも風・波ともに穏やかであった。

Fig. 2 に K-GPS アンテナと重りの設置位置を示す。K-GPS アンテナを三基、基線長前後 5m 、左右 9m になるように設置し、本船の位置と姿勢の計測を行った。過去の実績⁽²⁾より、K-GPS の位置精度は数 cm 、方位精度はアンテナ間の基線長から roll が 0.2deg 程度、yaw が 0.1deg 程度であったと見込まれる。横傾斜は、別途、高さ $1,410\text{mm}$ ×幅 $1,010\text{mm}$ ×長さ $1,220\text{mm}$ 、

Table 3 Ship loading conditions and environmental conditions in trials

Date	May 16	May 17
Displacement $W(\text{m}^3)$	561.61	559.30
Fore draft $d_f(\text{m})$	2.45	2.50
Aft draft $d_a(\text{m})$	3.05	3.00
Trim (m)	0.48	0.46
GM(m)	0.68	0.68
Weather	Partly cloudy	Sunny
Wind direction	SSW	SSE
Wind speed (m/s)	0.1~9.0	0.1~3.0

● GPS antennas ■ Weight ($\phi=-1.5\text{deg}, -5.6\text{deg}$)

■ Weight ($\phi=+3.5\text{deg}, -0.4\text{deg}$)

Fig. 2 Position of GPS antennas and block weights

Table 4 Test condition of block weight and water weight in freshwater tank

Date	$\phi(\text{deg})$	Block weight position (m)		Freshwater tank (m^3)	
		x	y	Left side	Right side
May 17	+3.5	-14.80	0	0	12
May 17	-0.4	-14.80	0	6	6
May 16	-1.5	-14.80	-2.25	6.5	6.5
May 16	-5.6	-14.80	-2.25	13	0

重さ 4040kg の重りを 1 個特別に用意して甲板に配置し、重さ約 6000kg の清水タンク内の水を移動させることによって実現した。

Table 4 に重りと清水タンクの水の横傾斜との関係を示す。清水タンクの水が減るのは、試験期間中に船員の生活用水として使用したためである。

4. 試験結果

4.1 直進航行試験

Fig. 3 に各横傾斜状態における航跡のグラフを示す。保針操作は行わず、首振り角 0deg での結果である。黒色の航跡は横傾斜角がほぼ 0deg であるにも関わらず、右舷側に回頭しており、理由は不明だが、本船はそのような特性を持つことが分かる。右舷側に横傾斜が付いた状態で前進すると左舷側に回頭し、一方、左舷側に横傾斜が付いた状態で前進すると右舷側に回頭することが明確に見て取れる。また、Fig. 4 に横傾斜に対する定常旋回時の回頭角速度を示す。その傾向は、横傾斜角の大きさとほぼ線形関係にある。図中、平均線を入れている。傾きが負であることから、右舷側に横傾斜が付いた状態で前進すると左舷側に回頭することがわかる。このような傾向は、安川・平田が指摘したもの⁽¹⁾と一致している。

Fig. 5 にオートパイロットを用いて直進した際の保針操作量(首振り角)の平均を示す。横軸が横傾斜角、縦軸が当て舵の大きさを表す。参考のために

Fig. 5 Offset azimuth angle to keep the course in heeled conditions

記入した近似直線は右肩上がりになっている。これは、右舷側に横傾斜が付くほど左舷側に回頭しようとするので、右舷側に回頭する方向に首振り角を取っていることを表している。図から、横傾斜角 0deg のときの保針操作量(首振り角)は約 -0.7deg であり、右舷側に約 1.6deg 横傾斜を付けると、保針操作量(首振り角)は 0deg となることが分かる。また、近似直線の傾きから、保針操作量(首振り角)は横傾斜角のおよそ 0.5 倍必要であることが分かる。すなわち、本船の横傾斜角 2deg は、首振り角約 -1deg に相当することを意味する。安川・平田⁽¹⁾によると、フェリー船型の場合、横傾斜角 3deg が、舵角約 -1deg に相当するとしている。そのフェリーと比較すると、本船は横傾斜に対してヨー運動が誘起されやすいことが分かる。

Fig. 3 Ship trajectories in straight moving test with heel $\delta=0\text{deg}$

Fig. 4 Steady turning yaw rate in straight moving test with heel $\delta=0\text{deg}$

Fig. 6 Comparison of turning trajectories for various heel angles ($\delta=\pm 10\text{deg}$)

Fig. 7 Comparison of turning trajectories for various heel angles ($\delta=\pm 35\text{deg}$)

Fig. 8 D_T/L_{PP} in turning tests versus azimuth angle ($\phi = -0.4\text{deg}$)

4.2 旋回試験

旋回試験では、旋回縦距(以後 A_D/L_{PP})と旋回圏(以後 D_T/L_{PP})によって旋回性能の評価を行う。旋回航跡については、文献⁽³⁾に示した方法で、旋回航跡における潮流によるドリフトの補正を行っている。

Fig. 6 に $\delta = \pm 10\text{deg}$ の旋回航跡を示す。図中の太線は A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} の二つの位置を示している。左舷側に回頭する $\delta = -10\text{deg}$ の旋回航跡に注目すると、横傾斜角が小さくなるほど、 A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} が大きくなる。一方、右舷側に回頭する $\delta = +10\text{deg}$ の旋回航跡に注目すると、横傾斜角が小さくなるほど、 A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} が小さくなっており、 $\delta = -10\text{deg}$ の旋回とは逆の特徴が表れている。

Fig. 7 に $\delta = \pm 35\text{deg}$ の旋回航跡を示す。Fig. 6 と比較して、 A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} の位置が重なっているよう

Fig. 9 D_T/L_{PP} in turning tests versus heel angle

Fig. 10 A_D/L_{PP} in turning tests versus heel angle

に見えるが、左舷側に回頭する $\delta = -35\text{deg}$ の旋回航跡では、横傾斜角が小さくなるほど、 A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} が大きくなっており、一方、右舷側に回頭する $\delta = +35\text{deg}$ の旋回航跡では、横傾斜角が小さくなるほど、 A_D/L_{PP} と D_T/L_{PP} が小さくなっており、Fig. 6 の結果と定性的には同じである。ただし、Fig. 6 の結果のように、横傾斜角の影響は顕著ではない。本船の横傾斜角 2deg は、首振り角約 -1deg に相当すると述べたが、左舷側に回頭した場合、 $\phi = +3.5\text{deg}$ 旋回航跡(赤)が約 37deg 旋回、 $\phi = -5.6\text{deg}$ 旋回航跡(緑)が約 32deg 旋回の航跡に相当すると考えられ

Fig. 11 Comparison of time histories of u , v , r and ϕ in turning ($\delta = +10\text{deg}$)

Fig. 12 Comparison of time histories of u , v , r and ϕ in turning ($\delta=-10\text{deg}$)

る。首振り角が 10deg に対して首振り角 12deg を比較すると、首振り角が 35deg に対して首振り角 37deg を比較することでは、首振り角の大きさが船の操縦運動に与える影響が異なるため、先ほどの結果のように横傾斜角の影響は目立たなくなると考えられる。

Fig. 8 に $\phi = -0.4\text{deg}$ 時の D_T/L_{PP} と首振り角の関係を示す。首振り角の絶対値が小さいところで D_T/L_{PP} の大きさの変化量が大きくなっていることがわかる。

Fig. 9 に横傾斜角と D_T/L_{PP} の関係を示す。右舷側に回頭した場合を、赤色の近似線で示し、左舷側に

回頭した場合を、青色の近似線で示している。赤色の近似線は、どちらも右肩上がりである。これは、左舷側に横傾斜が付いた時に右舷側への旋回性能が向上し、右舷側に横傾斜が付いた時に右舷側への旋回性能が低下（すなわち、左舷側への旋回性能は向上）することを意味している。青色の近似線は、どちらも右肩下がりであり、逆の特徴が表れる。

図の上に位置する $\delta=\pm 10\text{deg}$ 旋回の近似直線の傾きと、図の下に位置する $\delta=\pm 35\text{deg}$ 旋回の近似直線の傾きを比較すると、 $\delta=+35\text{deg}$ 旋回では、傾きの絶対値が $\delta=+10\text{deg}$ に対して 4% と小さい。また、 $\delta=-35\text{deg}$ 旋回では、傾きの絶対値が $\delta=-10\text{deg}$ に対して 8% と小さい。このことから、首振り角が増大すると横傾斜による D_T/L_{PP} の大きさの違いが目立たなくなることがわかる。Fig. 10 に横傾斜角と A_D/L_{PP} の関係を示す。なお、Fig. 10 も Fig. 9 に現れる特徴と同じ傾向を示している。

Fig. 11 に 4 つの横傾斜の $\delta=+10\text{deg}$ 旋回試験の時系列結果を示す。過渡期では、横傾斜角が小さくなるほど回頭角速度 r が大きくなる。よって、前進速度は他の横傾斜状態よりも早く減少している。右舷側への旋回の場合、横傾斜角が小さくなるほど旋回性能は向上するため、 $\phi=-5.6\text{deg}$ の v , r の絶対値が一番大きくなるという傾向はあるものの、定常旋回時では、 $\phi=-0.4\text{deg}$ と $\phi=-5.6\text{deg}$ の u , v , r は約 2% しか違いがなく、ほぼ同値となっている。これは、 $\phi=-0.4\text{deg}$ と $\phi=-5.6\text{deg}$ の D_T/L_{PP} の大きさが約 2% しか違いがなく、ほとんど同じになることを表している。また、横傾斜が旋回運動によって変化する傾向は、初期傾斜角を保ったまま一定の間隔でずらした様に見えることから同じ特徴を持つことがわかる。

Fig. 12 に 4 つの横傾斜の $\delta=+10\text{deg}$ 旋回試験の時

Fig. 13 Comparison of time histories of heading angle and azimuth angles in 10/10Z test

Fig. 14 1st OSA in zig-zag tests versus heel angle

Fig. 15 2nd OSA in zig-zag tests versus heel angle

系列結果を示す。また、Fig. 11 において先ほど説明した特徴は、Fig. 12 に示す $\delta=-10\text{deg}$ 旋回の結果でもほとんど同じように表れている。

4.3 Z 試験

次に、Z 試験の結果を示す。第一行き過ぎ角(以後 1st OSA)と第二行き過ぎ角(以後 2nd OSA)によって保針・変針性能の評価を行う。Fig. 13 は 10/10Z 試験結果を示している。右舷側に横傾斜が付いた時に 1st OSA が減少し、2nd OSA が増加している。また、左舷側に横傾斜が付いた時には逆の特徴が表れていることがわかる。

Fig. 14 に各横傾斜における 1st OSA を示す。横軸が横傾斜角、縦軸が 1st OSA である。赤色の近似直線は 10/10Z もしくは 20/20Z 試験の結果である。丸印が 10/10Z の結果、角印が 20/20Z の結果を表しており、どちらも右肩下がりである。これは、右舷側に横傾斜が付いた時に 1st OSA が減少し、左舷側に横傾斜が付いた時に 1st OSA が増加する傾向を表している。青色の近似直線は -10/-10Z もしくは -20/-20Z 試験の結果であり、上とは逆の特徴が表れている。

Fig. 15 に各横傾斜角における 2nd OSA を示す。1st OSA の場合と異なり、赤色の近似直線は、右舷側に横傾斜が付いた時に 2nd OSA が増加し、左舷側に横傾斜が付いた時に 2nd OSA が減少する。また、青色の近似直線は逆の傾向を示す。

これらは、安川・平田が示しているように⁽¹⁾、右

舷側に横傾斜したときには、左舷側へ回頭するような一定のオフセット舵角をとったような現象が起きていると考えることによって説明が付く。

5. 結 言

強制的に横傾斜を付けて航行する船(「豊潮丸」)の操縦運動を、3 台の K-GPS⁽²⁾を用いて実船計測し、横傾斜状態で航行する船の操縦性能に及ぼす横傾斜の影響を把握した。まとめると次の通りである。

- 右舷側に横傾斜すると船は左舷側に回頭し、左舷側に横傾斜すると船は右舷側に回頭する。
- 船体横傾斜はあたかも舵角にオフセットを付けたように作用し、本船の場合、横傾斜角 2deg は、首振り角約 -1deg に相当する。安川・平田⁽¹⁾によると、フェリー船型の場合、横傾斜角 3deg が、舵角約 -1deg に相当するとしており、そのフェリーと比較すると、本船は横傾斜に対してヨー運動が誘起されやすい。
- これらの知見は、安川・平田の検討結果⁽¹⁾と定性的に一致した。

謝 辞

実船試験を行うにあたり、多大なるご協力をいただいた「豊潮丸」の乗組員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 安川宏紀、平田法隆：横傾斜状態で航行する船の流体力微係数と操縦性、日本船舶海洋工学論文集第 17 号、2013.6.
- (2) 平田法隆、松村和昌：K-GPS による OP 級ヨットの運動計測、日本航海学会論文集 第 124 号、2011.3.
- (3) 平田法隆、浮田寛之、安川宏紀：練習船「豊潮丸」の操縦性に及ぼすトリム影響、日本航海学会論文集 第 126 号、2012.3.