

# 数学運動モデルを用いた練習船「大島丸」の 潮流下シミュレーションスタディ

村田光明 \*<sup>1</sup> 岩崎寛希 \*<sup>1</sup>

## T.S. OSHIMA-MARU Simulation Studies on Tidal effect with M.M.G. Model of Ship Manoeuvring Motion

Mituaki MURATA and Hiroki IWASAKI

### Abstract

We reported this paper about some simulation studies using a mathematical a model (:M.M.G.model) of ship manoeuvring motion of training ship Oshima-maru. A first simulation with M.M.G.model on tidal effects. We got some knowledge by this study, we report it hear.

**Keywords:** T.S.Oshima-maru, simulation studies, under the environment of tide

### 1 はじめに

練習船「大島丸」を対象船舶として、潮流下での操船の様子を船体運動モデルを用いて明らかにすることを目的とし、一様潮流中での様々なシミュレーションスタディを行った。そうして、潮流という要素が、操船に及ぼす影響を試算し、いくつかの知見を見出したので報告する。

### 2 練習船「大島丸」のシミュレーションモデル化 2.1 船体運動シミュレーションモデル

船体の運動をコンピュータ上で再現する手法が「船体運動の数学的運動モデルのシミュレーション」である。その運動モデルは、昭和 51 年に日本造船学会試験水槽委員会第 2 部会にて提案された「MMG モデル」<sup>1)</sup> としている。その MMG モデルでは、大型船の運動において、その 6 軸の自由度のうち、前進、横流れ、回頭の平面運動が特に顕著である。そのため、他の 3 方向の運動(上下動、ローリング、ピッチング)は省略して考える。そうして、(1)式の運動方程式を連立して逐時計算することにより、船体の運動を表現している。この MMG

モデルは、操船シミュレーション、船の設計、船体操縦性能解析と幅広く利用されている。

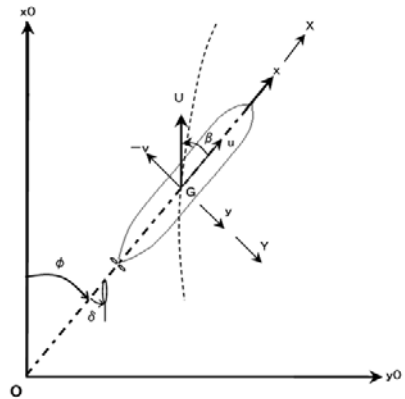


図 1 座標系

$$\begin{aligned} (m + m_x)u - (m + m_y)vr &= X \\ (m + m_y)v - (m + m_x)ur &= Y \\ (I_{zz} + i_{zz})r &= N \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

$m, m_x, m_y$  : 船の質量、x軸、y軸方向の付加質量  
 $u, v$  : x軸および y軸方向速度成分  
 $r$  : 回頭角速度

\* 1 商船学科

$I_{zz}, i_{zz}$  : 船の慣性モーメントおよび付加慣性モーメント

$X, Y$  :  $x$ 軸および  $y$ 軸方向の外力

$N$  :  $z$ 軸まわりのモーメント

この(1)式の運動方程式における右辺の外力の項を明確に表現することができれば、この式をもとに、種々の操舵あるいは制御力のもとにおける運動を解析することができる。従って、この外力の項をどのように表現するかということが最も重要となる。MMG では上記の考えのもとに、船体要素と運動要素の双方を含めて考慮し次のように表現することを提案した。

$$X = X_H + X_P + X_R$$

$$Y = Y_H + Y_P + Y_R$$

$$N = N_H + N_P + N_R$$

ここで添字の  $H, P, R$  は各々主船体、プロペラ、舵に作用する流体力の項を表わしており、各々の単独としての流体力と主船体、プロペラ、舵相互の干渉力の項も含めて表現している。流体力と主船体、プロペラ、舵相互の干渉力の項も含めて表現している。先程の図1の座標系にもとづくプロペラあるいは舵に作用する力及びモーメントの推定は、貴島氏によれば一つの方式に定まっているようである。<sup>2)</sup> しかし、主船体に働く力モーメントについては様々な推定式が存在する。そこで、それらの推定式の中から今回は以下のような(2)式を採用した。

$$X_H = \rho/2 \times LdU^2(X'_{\beta r} r' \sin \beta + X'_{uu} \cos^2 \beta)$$

$$Y_H = \frac{\rho}{2} \times L^2 dU^2 (Y'_{\beta \beta} \beta' + Y'_{r r'} r' + Y'_{\beta \beta} \beta |\beta| + Y'_{r r} r' |r'| + Y'_{\beta \beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r^2)$$

$$N_H = \frac{\rho}{2} \times L^2 dU^2 (N'_{\beta \beta} \beta' + N'_{r r'} r' + N'_{\beta \beta} \beta |\beta| + N'_{r r} r' |r'| + N'_{\beta \beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r^2)$$

----- (2)

なお、 $X'_{\beta r}$  や  $X'_{uu}$  といった添え字付きの値は、流体力微係数と呼ばれるものである。

## 2. 2 主船体に関わる力、モーメントの流体力

通常、流体力微係数は実船の 1/30~1/40 の精密模型を作製し、拘束模型試験でもって流れ角  $\beta$  を変化させながら、発生する抵抗、横力、モーメントを計測し、 $\beta$  ベースで割り出だす。

しかし、その模型や試験設備がない場合は、次の貴島氏による主要目を用いた推定式<sup>3)</sup>でもって、 $Y, N$  の流体力微係数を推定する。

$k = 2d/L$  として、

$$Y'_{\beta} = 0.5 \pi k + 1.4 C_b B/L$$

$$Y'_{r} - (m' + m'_x) = -1.5 C_b B/L$$

$$Y'_{\beta \beta} = 2.5d(1 - C_b)/B + 0.5$$

$$Y'_{r r} = 0.343d C_b/B - 0.07$$

$$Y'_{\beta r r} = 5.95d(1 - C_b)/B$$

$$Y'_{\beta \beta r} = 1.5d C_b/B - 0.65$$

$$N'_{\beta} = k$$

$$N'_{r} = -0.54k + k^2$$

$$N'_{\beta \beta} = -0.96d(1 - C_b)/B + 0.066$$

$$N'_{r r} = 0.5 C_b B/L - 0.09$$

$$N'_{\beta r r} = -(0.5d C_b/B - 0.05)$$

$$N'_{\beta \beta r} = -\{57.5(C_b B/L)^2 - 18.4 C_b B/L + 1.6\}$$

----- (3)

これら貴島氏の提案した(3)式の流体力微係数の推定式は、多くの船型の拘束模型試験データベースより統計的な手法で求められている。拘束模型試験が実施できない場合、この方法で流力微係数を推定することから、(2)式を主船体に関わる力、モーメントの式に用いる考え方が主流となってきている。この(3)式の流体力微係数の推定精度は、当然であるがデータベースに盛り込まれた船型の網羅状況に密接に関連する。もし、データベースから外れた外挿的な船型であれば、推定されたモデルは実船と異なった運動となる。そこで、芳村らは、船体運動試験中、操舵に対する定常運動特性を見るために旋回テストを、過渡応答運動特性をみるためにZテストを取り上げ、実船と推定された流力微係数を用いたシミュレーションの結果の比較を行った。さらに、流体力微係数の実船運動に対する感度分析調査を行い、流体力微係数のチューニングの仕方について示唆した。<sup>4)</sup>

日本造船学会の「操縦性研究の設計への応用」<sup>5)</sup>を参考にしながら、推定された正横方向の力  $Y$  と旋回モーメント  $N$  に関わる微係数のうち、物理的な意味からいっても  $\beta$  や  $r$  の1次項すなわち、線形項はそのまま採用し、 $\beta, r$  の高次項すなわち非線形項の流力微係数を主にチューニングの対象とした。

ところで、 $X$  方向の微係数の推定式は(3)式中にはない。そこで、 $X$  方向の微係数は  $C_b$  の近い船の既存の微係数を使うことにした。そのため、 $X$  方向の式のみ  $u, v$  ベースの式を用い、 $Y, N$  の式は貴島の  $\beta$  ベースの式を用いた。そのうち、船体抵抗に関わる  $X_{uu}$  については、縮率影響を考慮し、3次元外挿法によって推定した。

$$X_H = \rho/2 \cdot L^2 U^2 \cdot (X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 + X'_{vr} v' r' + X'_{vvv} v'^4 + X'_{uu} u'^2)$$

$$\begin{aligned}
 Y_H &= \rho / 2 \cdot L 2 U^2 \cdot (Y'_{\beta} \beta + Y'_{r} r' + Y'_{\beta\beta} \beta |\beta| + \\
 &\quad Y'_{rr} r |r| + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2) \\
 N_H &= \rho / 2 \cdot L 2 d 2 U^2 \cdot (N'_{\beta} \beta + N'_{r} r' + N'_{\beta\beta} \beta |\beta| + \\
 &\quad N'_{rr} r |r| + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

なお、式中の流体力微係数のうち、網掛けしてある項の流体力微係数(例 $X'_{vv}$ 等)は方形係数  $C_b$  の近い既存の船型のものを用いた。

### 2. 3 練習船「大島丸」の主要目

対象船舶である「大島丸」の主要目を表 1 に示す。

表 1 対象船舶の主要目

項目	練習船 大島丸
総トン数(G/T)	226 トン
満載排水量	400 トン
全長	41.0m
最大船幅	7.6m
満載喫水	2.7m
バウスラスタ	1 機、1000kN
主機関	1 機、1300 馬力×350rpm
プロペラ	1 基、4 翼可変ピッチプロペラ、直径：2.00m
舵	1 基、シリング舵、面積：3.3 m <sup>2</sup>
巡航速力	12.5k <sup>t</sup>

### 2. 4 流力微係数のチューニング

パソコンでファーストシミュレーションを行うため、(3)式の貴島氏の方法で主要目を用いて流体力微係数を推定し、シミュレーションを行うことが可能となった。

流体力微係数のチューニングを行う際には、流体力微係数のうち、特に船体運動の横流れや旋回を左右する Y 力や N モーメントの 1 次の項目( $Y_{\beta}$  や  $N_r$  など)を重点的に微調整し、旋回試験及び Z 試験の双方に合致することを目指した。また、舵とプロペラの干渉係数もチューニングした。今回のチューニングでは旋回試験よりも Z 試験の結果をより合致させることを優先させた。図 2 にチューニング後の様子を示す。

図 2 のとおり公試運転結果とファーストシミュレーションの双方の旋回径がほぼ合致するようになった。左右の旋回試験の旋回径が異なる理由としては、対象船舶の左右それぞれの旋回試験の実施時間が異なるため、受けた潮流、風圧力等外力は相当違うものだと思われ、外力の比較的小さかった右旋回

にチューニングして合わせた。また、Z 試験については舵に対する針路の応答具合、旋回応答のテンポもよくあっており、練習船「大島丸」と同じような運動するシミュレーションモデルが用意できた。

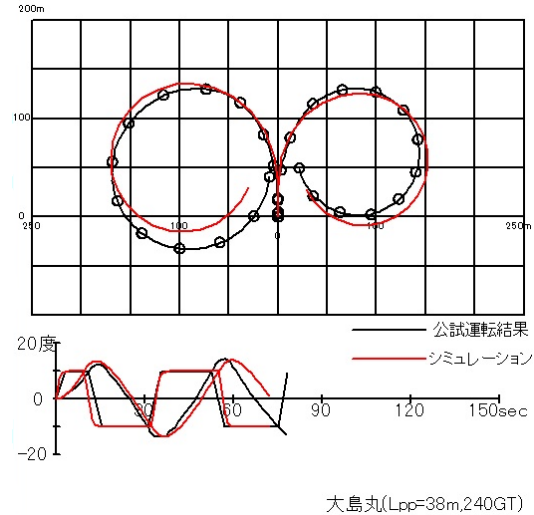


図 2 流体力微係数のチューニング後

### 2. 5 バウスラスタの導入

対象船舶の一般配置図よりバウスラスタの位置は、船体中央より前方に 14.5m の位置にあり推力は 1 トンとあった。同船の海上公試運転成績書のバウスラスタ試験結果としては、旋回までの所要時間が記載されている。図 3 には初速 0kt、バウスラスタ Full 出力で、90° 旋回させた様子であり、90° までの旋回時間が記載されている。朱色が公試運転結果であり、黒がシミュレーション結果を示している。双方はよく合致しており、図 4 には同条件での旋回航跡を示す。

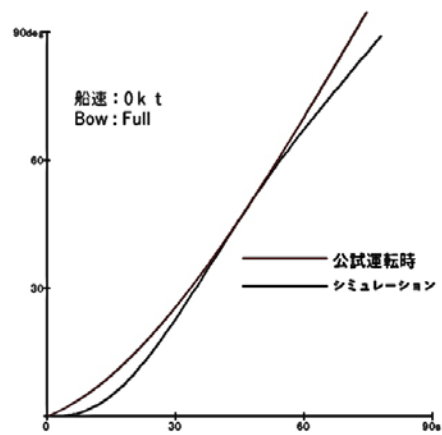


図 3 バウ Full (船速 0kt) での旋回

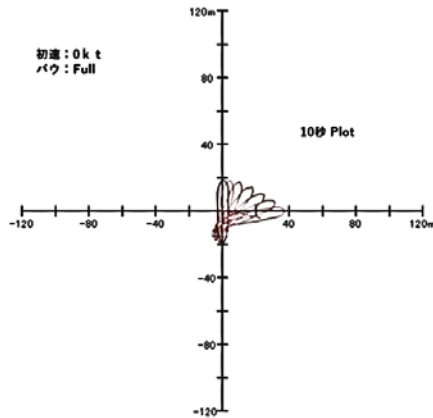


図4 バウ Full (船速 0kt)での旋回航跡

同様に図5に初速 3kt においての、バウスラスタ一Full での 90° 旋回時間と航跡である。バウスラスタ一は、船体が停止している時に最もその効果を發揮する。船に前進行き脚があると、バウスラスタ一

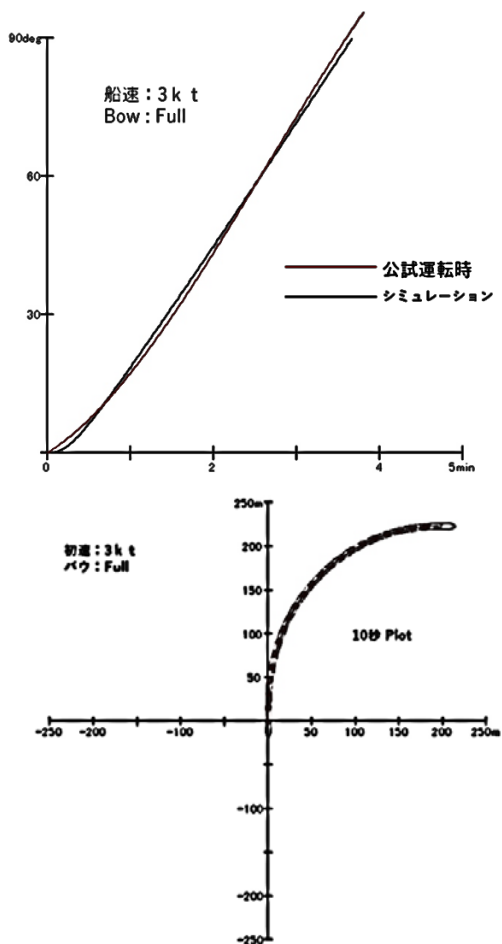


図5 バウ Full (船速 3kt)での旋回

が吐出する水流は船体周りを流れる水に向かって後方にそれることになり、それによって反力が削がれて有効推力が減少する。バウスラスタ一を使用した操船においては、このような船速の増加とともにバ

ウスラスタ一の効果が失われていく<sup>6)</sup>ことを念頭に置く必要がある。

$$T = T_0 \cdot e^{(-0.3V)} \quad \text{--- (5)}$$

- T : 船速 V ノットにおける有効推力
- T<sub>0</sub> : 船体停止時の有効推力
- V : 船速(ノット)

(5) 式を参考にすれば、概略の目安としては、自船速力が 2~2.5 ノットで効果は半減、6 ノットになるとその効果は 20% を切ることになるので、ほぼ 6 ノットの速力が効果の限界と考えるべきであろう。今回のシミュレーションでは、バウスラスタ一推力は(5) 式によって変化するようにした。

また、図6は本船停止状態から、バウスラスタ一 2 ノッチ (Half) で行った 90° 旋回の様子を示している。

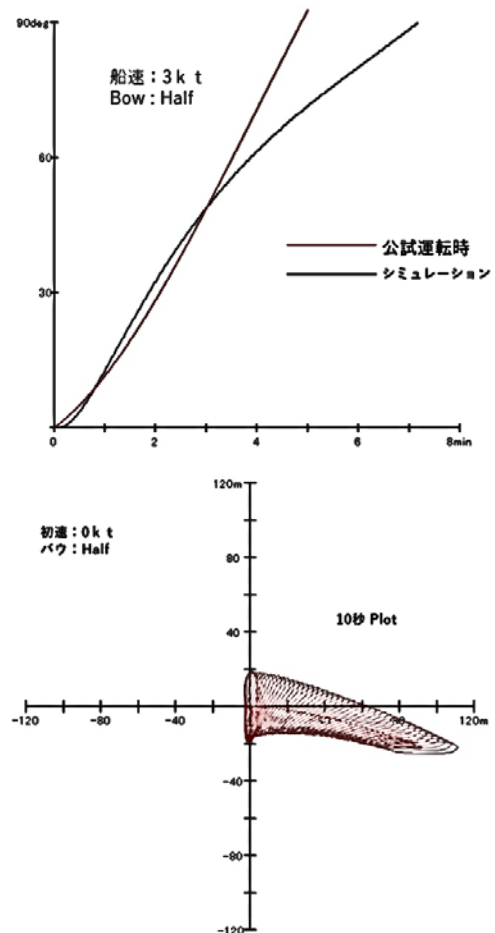


図6 バウ 2 ノッチ (船体停止)での旋回

バウスラスタ一の推力により、船首が右回頭し、同時に、船体の横移動も生じるが、船体に働く水抵抗が大きいので最初の間はこの横ドリフトは緩慢である。しかし、バウスラスタ一 2 ノッチでは有効推

力が40%減となり、旋回に要する時間が長くなり、この横ドリフトは発達してしまい、右に旋回しながら右にドリフトする運動となる。

### 3 練習船「大島丸」の潮流下のシミュレーションスタディ

2章で外力のない場合の実船「大島丸」の動きにほぼ合致するシミュレーションモデルが構築できた。この章では本船が巡行時から港内等のような低速時までにおいて、潮流の影響を受ける場合のシミュレーションスタディの結果を示す。なお、潮流はその流速、流向が一定・一様で、広く分布している場合を想定している。

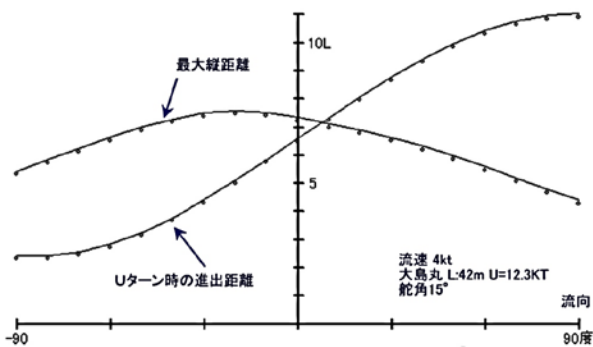
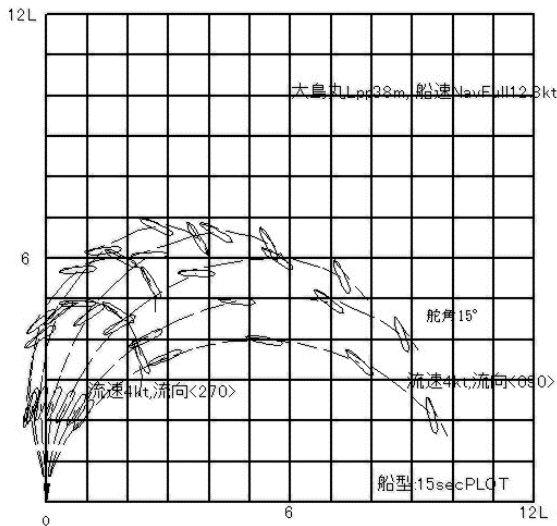


図7 流向による180°旋回航跡

#### 3.1 航走時、流向を変えての180°旋回

潮流の操船への影響をみるために、船速は巡行速度(12.3kt)で航走中、4ktの強潮流を受ける場合において、舵15°で180°旋回した様子を図7に示す。

図7上段は、流向が<090>~<270>まで変化した場合において、舵角15°を発令し、180°旋回した場合の航跡を示している。なお、流向は「流れていく方向」を示し、「<270>」と上方0°で右回り360°という航海度数で表現している。さらに図では15秒おきに船型が描いてある。

また、同図下段は流向に対する最終水平進出距離と最大縦進出距離を全長Lで換算して示している。紙面左から右へ<090>の潮流を受けながら旋回した場合、水平方向に流されつつ旋回するため旋回に要する海域が横方向に船長の10倍(以下、10Lと記す)広く必要になるが、縦方向には4Lで済む。逆に、紙面右から左へ<270>(図では-90°と記載)の潮流を受けて旋回すれば水平方向には2.5Lしか必要でなく、縦方向にも5Lで済む。一定で一様な潮流であるため180°旋回に必要な時間はどの場合も同時間となる。

図7上段からわかるように船首針路方向と船体重心の航跡の方向とに差角(流れ角:  $\beta$ )が生じている。潮流が無い場合の旋回ではこの $\beta$ は旋回内側に向くが、潮流によって横圧流され流向によって興味深い動きをする。左方向からの流向であれば $\beta$ は旋回内側に、右方向から流向の場合では $\beta$ は旋回外側に向いていることがわかる。図8には流向毎の $\beta$ の変化を示している。興味深いのは右から流向<270>と<315>の場合(ピンクと黄色)の $\beta$ の変化がまったく同じ軌跡を経ることで、左からの<090><045>(緑と赤)も同じ軌跡でとなる。

図9は針路ベースの旋回角速度の変化を流向ごとにプロットしている。左からの流向を受ける場合は針路15°~30°旋回時に旋回角速度が最大となり、同様に右から流向を受ける場合も旋回角速度のピーク

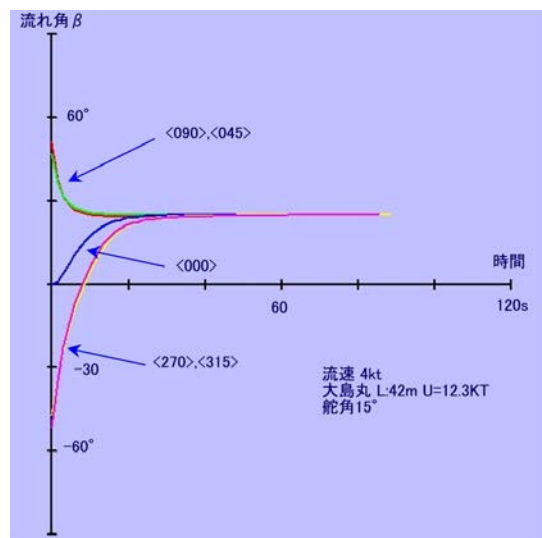


図8 流向による流れ角 $\beta$ の変化

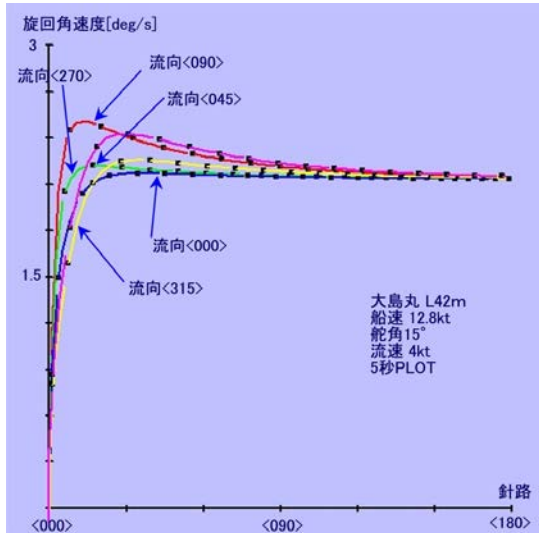


図9 旋回時の針路に対する旋回角速度

は同様となるが、その旋回角速度 2.2°/s と左潮流時より小さい。

### 3.2 潮流に対する補正針路(Tideway)について

ここでいう補正針路(Tideway)とは、図 10 にあるように船がUベクトル方向に航走したいが、潮流 s ベクトル流れている。そうすると当初から針路を迎角  $T_w$  方向に航走することで、まっすぐU方向に航海できる。この角度  $T_w$  を補正針路と名付ける。

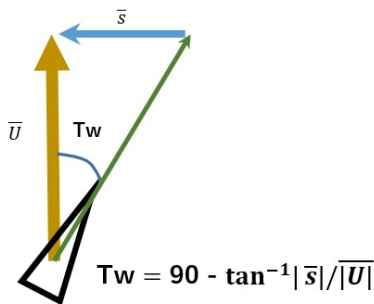


図10 潮流に対する補正角  $T_w$

この  $T_w$  は図 10 中にあるように簡単な式で算出できるが、その補正針路に操舵しながら保針しなくてはならず、簡易的なPD制御のオートパイロットをプログラムに導入し、あえてシミュレーションで  $T_w$  を調査した。それが、図 11 である。図 11 は流速が 1,2,3,4kt と 4 段階に強めながら、しかも、「大島丸」の船速も巡行速度、S/B Full(9kt), Half(6.3kt) と 3 通り、計 12 通りの場合を図示している。

この図 11 によると、船速が速いほど  $T_w$  は小さくて済む。流向が小さいほど  $T_w$  は小さくなる。当然であるが、流速が増すほどいずれも  $T_w$  はその流速に応じて大きく針路をずらさなくてはならない。

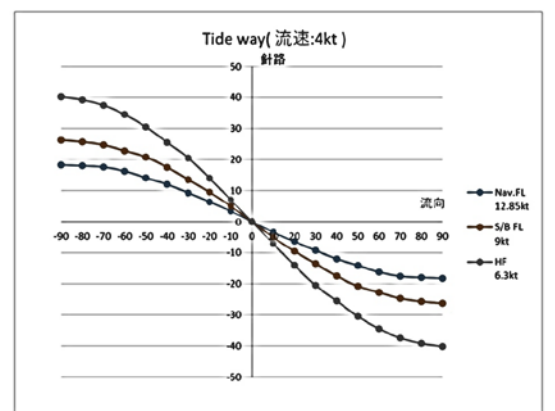
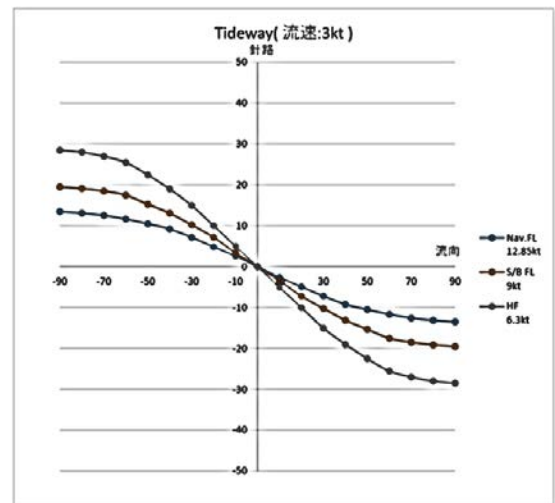
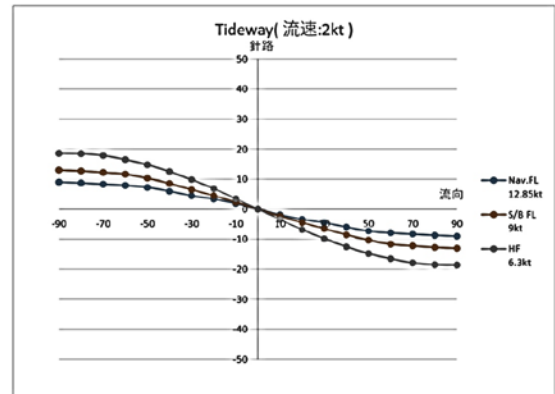
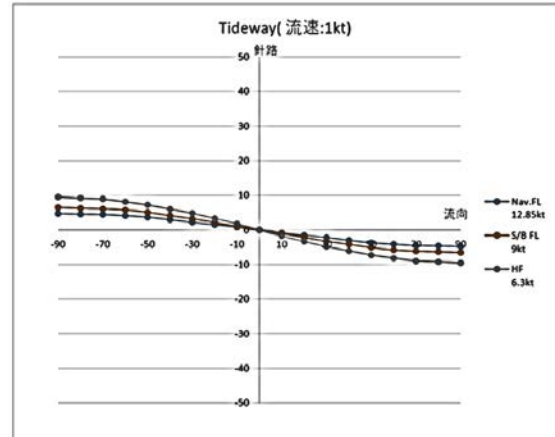


図11 船速別・潮流に対する補正針路  $T_w$



### 3.3 潮流下におけるバウスラスタースでの 180°旋回

図 12、図 13 には流速 0.2kt~3kt まで変えながら、しかも流向が<270>~<090>まで 30°刻みで変化させた場合で、バウスラスター Full で 180°旋回した航跡を描いている。図中の水色の矢印が潮流の流向を示し、その放射方向の各座標軸に描かれているのが対象船の航跡である。本船停止している状態において、バウスラスター4 ノッチ(Full)を発令する。180°旋回したところまで 10 秒ごとに船型を赤く描いている。

バウスラスターの推力が船首位置付近に作用するため、船体は右旋回しながらも右方向に変位してし

まう。それからすると、流速が 0.2kt では、潮流の影響がさほど表れておらず、どの流向でも右変位しながら旋回する。また、流速が 0.5kt では多少、流向によっては潮流の影響が大きくなっているが、右変位しながら旋回できているといえる。

一方、図 13 において、流速が 1kt になると様子は異なり、流向によっては右変位が押し戻されてその場で旋回するケースがでてくる。さらに流速が 2kt、3kt と強くなると、もはやバウスラスターの効果は失われて潮流下に圧流されて右回頭ができない状況が流向によっては生じてくる。

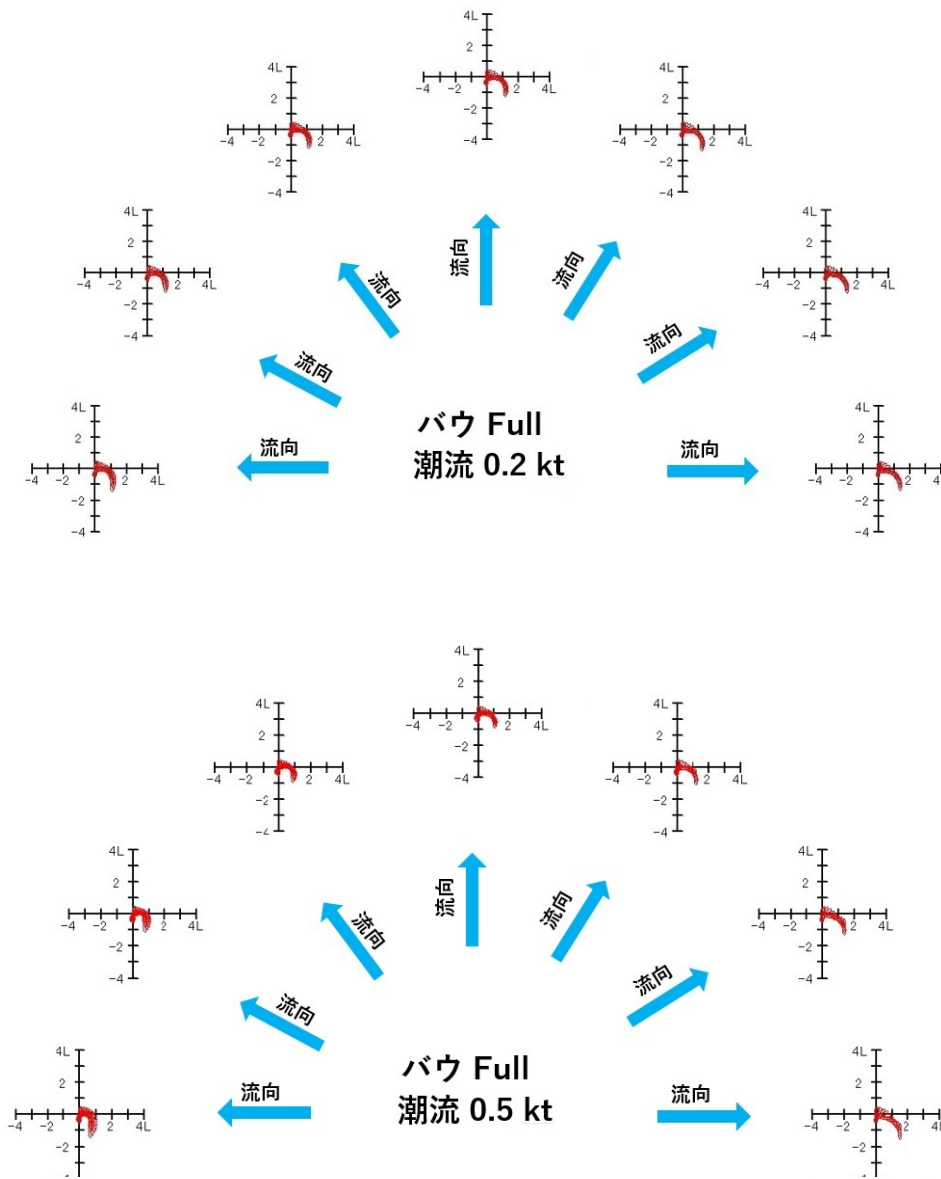


図 12 流速別・流向別バウスラスターによる 180°旋回(流速 0.2~0.5kt)

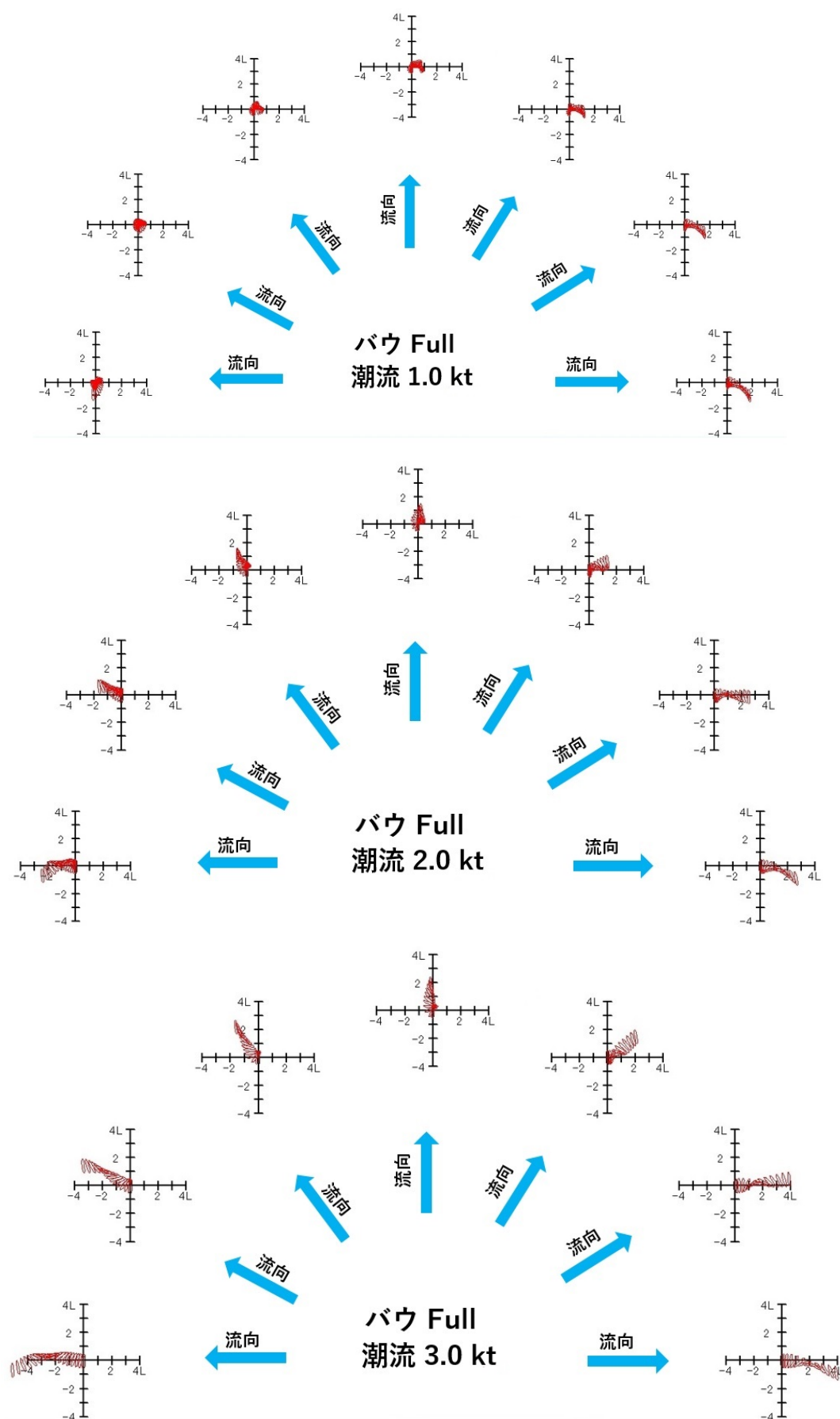


図 13 流速別・流向別バウスラスターによる 180° 旋回(流速 1.0~3.0kt)



#### 4 おわりに

練習船「大島丸」を対象船舶として、潮流下での様々な操船に対する船体の動きを、船体運動モデルを用いて明らかにした。そうして、潮流という要素が、操船に及ぼす影響を試算し、対大島丸に関してのいくつかの知見を下にまとめる。

①固定された流速下で、巡航速度で航走中、舵角  $15^\circ$  で旋回すると、流向によっては水平方向の最大進出距離は  $2\sim 11L$  と大きく差が出る。旋回方向と同方向の流向の場合、潮流下方向に圧流されるため、ターニングベースンが広く必要となる。また、縦方向の進出距離は  $4\sim 8L$  であるが、そのピークは逆潮となる場合より反時計回り  $30^\circ$  くらいから潮流を受けられる場合となる。

②潮流を受けて旋回時、流れ角  $\beta$  は進行方向の左方向からの流向を受ける場合は旋回内側に、右から受ける場合は外側に生ずる。

③潮流に対する針路・補正角(Tideway)については、針路方向逆潮となる場合を境に左右点对称の関係となる。補正角の大きさは流速が大きいほど、流向が左右に大きく開くほど、船速遅くなるほど大きくなる必要がでてくる。

④バウスラスターを用いた  $180^\circ$  旋回については、流速が  $1\text{kt}$  未満では流向によってターニングベースン広くとる必要がでてくるが、旋回は可能である。流速が  $1\text{kt}$  を超えだすと、流向によっては潮流下に圧流され、旋回が困難となる場合が生ずる。

#### 参考文献

- 1) 日本造船学会：第3回操縦性シンポジウム, (1981)
- 2) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y., and Fukukawa, Y. : On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition, 日本造船学会論文集、第 168 号 (1990)
- 3) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y., and Fukukawa, Y. : On the Manoeuvring Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition, 日本造船学会論文集、第 168 号 (1990)
- 4) 日本造船学会：操縦性研究の設計への応用，運動性能研究委員会，第 12 回シンポジウム, pp.91, (1995)
- 5) 日本造船学会：操縦性研究の設計への応用，運動性能研究委員会，第 12 回シンポジウム, pp.91, (1995)
- 6) 井上欣三, 操船の理論と実際, p 111, 成山堂書店, (2011)

