強潮流が操縦運動に及ぼす影響

丹羽康之*・沼野正義*・福戸淳司*・多田光男**

Effect on Ship Maneuvering Motion under Strong Tidal Current

Yasuyuki NIWA, Masayoshi NUMANO, Junji FUKUTO and Mitsuo TADA

Abstract

Authors have been making observation on the tidal current and its effect on the ship motion along Kurushima Strait. An appropriate maneuvering control is essential for the safety navigation under a strong current condition. The ship maneuvering motion was analyzed using a simple response model, i. e., a KT model. Although the difference between an estimated motion by the KT model and the actual motion shows the effect of the current, a strong transient phenomenon, a side slip motion of the ship, was observed especially in entering the strongest part of the current. As the detection of the side slip is essential for the ship control, a continuous watch on water surface in front of the ship and monitoring splashing sound around bow gives effective information about the transient phenomenon.

1. はじめに

来島海峡は屈曲した狭水道であり、強潮流が発生する故、順潮時は中水道を逆潮時は西水道を航行するという「順中逆西」という航法がとられている。しかしながら転流時の水道通航の禁止により、時間帯によって水道入口での船の滞留が発生する他、海峡出入り口付近での航路の交差のために、昔から衝突事故や座礁などが多発する難所の一つである。そのため、潮流の向きに関係なく右側通航とする提案もあるが、それを実現するためには、強潮流下において潮流が操縦運動性能に与える影響を明らかにし、潮流に応じた安全な操船方法を確立する必要がある。

これまでに著者らは実際に来島海峡の潮流分布の観測を行い、潮流分布は地形効果による影響で流向に大きな変化があることを示し⁽¹⁾、潮流と船速の増減の関係について検討を行った⁽²⁾。

そこで今回は、潮流が操縦運動性能に及ぼす影響を明らかにするために、対象船舶である弓削丸の操縦運動性能を Z 試験で推定し、潮流の影響のない状

態での操縦運動方程式を求めた。そして潮流下での航行の際の回頭角速度に着目し、操縦運動方程式から求まる推定値と実際の観測結果を比較し、操縦運動方程式の有効性について考察を加えるとともに、潮流が操縦運動性能に与える影響の推定を試みた。

2. 観測概要

観測は国立弓削商船高等専門学校の練習船「弓削丸」で行った。本船の主要目は、長さ 40 m、幅(型) 8 m、満載喫水(型) 2.8 m、総トン数 240 トンである。潮流の観測には超音波ドップラー流速計(米国 RD インスツルメント社製 300 kHz 型)を用いた。今回は水深 5 m から 2 m 間隔 18 層について、東西、南北、鉛直の各方向成分を観測することにより、3 次元分布を得た。サンプリング時間は約 15 秒間隔であった。同時に船体運動収録装置で、時刻、舵角、CPP 翼角、回頭角速度、船首方位、X (船首尾方向) 対地船速・Y (船横方向) 対地船速、緯度・経度、真風向・真風速を観測した。サンプリング時間は 1 秒間隔であった。またビデオカメラにより、船首方向の海面を記録した。観測前にすべての装置の時刻を GPS 時刻に

* 正会員 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

** 正会員 弓削商船高等専門学校 (〒794-2593 愛媛県越智郡弓削町下弓削 1000 番地)

表 1 観測概要

観測No.	日付	通航方向	通航水道	潮流方向	航路IN時刻 航路OUT時刻	潮汐表による 推定潮流(※)	設定船速 CPP翼角	備考
1	9月27日	東→西	西水道	南流→北流	09:56 10:59	+3.32knot -0.47knot	9knot 9deg	
2	9月27日	西→東	西水道	北流	11:33 12:39	-2.55knot -5.96knot	9knot 9deg	
3	9月27日	東→西	中水道	北流	12:55 13:35	-6.57knot -7.61knot	9knot 9deg	
4	9月27日	西→東	西水道	北流	13:52 15:11	-7.81knot -6.82knot	9knot 9deg	強潮流時間帯 Max. -7.88knot (14:06)
5	9月27日	東→西	中水道	北流	15:28 16:01	-6.19knot -4.62knot	13knot 16deg	
6	9月27日	西→東	西水道	北流	16:17 17:01	-3.71knot -0.87knot	13knot 16deg	通航後、航路外でZ試験(設定 船速:9knot)を実施
7	9月28日	東→西	西水道	南流	09:42 10:50	+6.69knot +3.10knot	9knot 9deg	
8	9月28日	西→東	中水道	南流→北流	11:05 11:58	+2.12knot -1.47knot	9knot 9deg	
9	9月28日	東→西	中水道	北流	12:22 13:06	-3.03knot -5.56knot	9knot 9deg	
10	9月28日	西→東	西水道	北流	13:21 14:37	-6.27knot -8.31knot	9knot 9deg	強潮流時間帯

※来島海峡中水道標準点。南流を正、北流を負とする。

図 1 (a) 観測日の潮流 (9月27日)

図 1 (b) 観測日の潮流 (9月28日)

合わせている。

観測は平成12年9月27日、28日の2日間にわたって行った。来島海峡航路を通常の通航方法に従って、繰り返し往復し、2日間で中水道4回(北航:3回、南航:1回)、西水道6回(北航:2回、南航:4回)、延べ10回観測を行った。表1に観測時の航行の概要を示す。

観測日の潮流(潮汐表から推定:来島海峡中水道標準点)を図1(a)、(b)に示す。なお今回の観測時の潮流最強時は9月28日14時37分であり、潮流は北流8.31ノット(4.27m/s)であった。

超音波ドップラー流速計による潮流観測値、船体運動収録装置による各種観測値の信頼度を高めるため、観測期間の一通航中はCPP翼角を常に9degもしくは16degの二種類のいずれかになるようにした。超音波ドップラー流速計による潮流観測値の標準偏差は、1パルスのエコーでは0.03m/sであり、複数パルスのデータを採用することにより、信頼度を

高めている。CPP翼角の9degもしくは16degは、平水中を航行中する場合であれば、それぞれ対水船速が9ノット(4.5m/s)、13ノット(6.5m/s)に相当するものである。この対水船速を設定船速と呼ぶ。今回の解析では、設定船速9ノット(4.5m/s)のデータを用いる。

3. 観測・解析結果

3.1 Z試験の結果および操縦運動方程式

9月27日の第6回目の観測後、来島海峡東側の航路外で標準的なZ試験である舵角10deg/回頭角10degの試験を行った。設定船速は9ノット(4.5m/s)とした。図2(a)に舵角 δ [deg]と船首方向変位の結果を示す。またZ試験の結果を1次系近似の操縦運動方程式(KTモデル)

$$T \frac{dr}{dt} + r = K(\delta + \delta_r) \quad (1)$$

を仮定したところ、操縦性指数は $K=0.2[1/s]$ 、 $T=$

図 2 (a) Z試験結果 (舵角、船首方位変位)

図 2 (b) Z試験結果 (回頭角速度)

12[s]、当て舵量 $\delta_r=1.2[\text{deg}]$ がその推定値として得られた。観測された回頭角速度 r 、推定した操縦性指数および観測結果の舵角 δ を利用して求めた推定回頭角速度 r_{KT} を図 2 (b)に示す。

風の影響については、Z試験開始時の進行方向に対して、右60 degの方向から平均1.1 mと弱いものであった。また弓削丸の船橋はほぼ船体の中央であるため、風による旋回への影響は小さいものと考えられる。

なおZ試験時の潮流は0.5 m/s以下かつほぼ一定であった。よって式(1)は、平水中での適用ができると考える。

3.2 船体運動へ影響する潮流のモデル化と解析方法

強潮流下で船体に働く運動は、通常の舵による運動と、潮流による回転運動と並進運動が重畳されたものと仮定し、実際に観測した回頭角速度からKTモデルを用いた推定回頭角速度の差を求め、潮流による影響を推定する。

しかしながら実際には単なる重畳だけではなく、式(1)に従わない過渡現象も起きると考えられるため、この点についても解析を行う必要がある。そこで平水中と潮流下での違いを検討するために、対地速度と潮流から対水速度を推定し、船体と潮流の相対的な関係を明らかにし、式(1)が適用できるのか、それともそれに従わない過渡現象が起こっているか、起きているとすればどのような過渡現象が起きているのかを考察する。

さらに同時に観測したビデオ画像を利用して、過渡現象の確認と把握を行う。

3.3 解析対象範囲

図 3 は観測結果の可視化ソフトウェア⁽³⁾の画面である。9月27日の第4回目の観測結果の航跡、水深5 mの潮流および地形を表示している。本ソフトウェアは任意の方向から鳥瞰図として眺めることが

可能であるが、ここでは上空から鉛直下向きに眺めた画面を表示している。潮流は水深5 mから2 m間隔で観測したが、水深5 mから15 mの範囲では、流速・流向ともほぼ同様の傾向であることを確認している。今回の船体運動に影響する潮流の解析において、潮流の代表値は、水深5 mの観測結果を利用することとする。

図 3 は西水道の入口に向かって、西から東へ航行し、小島・馬島間を通航するために、右へ旋回する場面を中心としたものである。潮流分布に着目すると、A地点付近では、小島の影となっているため、0.5 m/s以下と非常に小さな値を観測している。その後、小島・馬島間を流れる潮流の影響により、北向きの潮流に出会うが、これに抗して右へ旋回し、南へ航行している。そこで今回は船体運動に影響する潮流の解析の対象範囲を、潮流の弱い場所から、強潮流に対して斜めに進入し、さらに旋回を行うという一連の動作の範囲とする。具体的な範囲は、図 3 のA地点(9月27日、14時19分53秒、 $t=0[\text{s}]$ とする)からB地点(9月27日、14時26分44秒、 $t=411[\text{s}]$)までの7分弱の時間である。この間の潮流観測点数は約15秒間隔、27点である。

3.4 潮流影響の推定

3.1節で求めた操縦性指数および実際の舵角から、平水中を航行していると仮定して、式(1)を用いて、推定回頭角速度 r_{KT} を求める。実際に観測した回頭角速度 r と推定回頭角速度 r_{KT} との差 Δr を潮流等の外乱影響の推定値として求める。

$$\Delta r = r - r_{KT} \quad (2)$$

図 4 の(a)から(e)は、順番に船首方位 θ 、舵角 δ 、回頭角速度 r 、推定回頭角速度 r_{KT} 、外乱 Δr を示している。また図 4 (a)に潮流観測区間(27区間)番号を示す。図 4 (e)の値が潮流等の外乱影響の推定値であるが、 $t=0[\text{s}]$ から $t=90[\text{s}]$ までの範囲(区間1か

図3 観測結果

ら区間6)では、小さな値であり、潮流影響が小さいことを示している。その後潮流に対して斜めに進入し、右へ旋回していく $t=90[s]$ から $t=175[s]$ までの範囲(区間7から区間12)では、負の値、すなわち船首が左側へ振られる外乱が働いていることがわかる。これは右前方からの強潮流部分に進入することにより、回転モーメントが発生するためと考えられるが、3.5節で後述する斜航状態になること等による影響も含まれると考えられる。 $t=175[s]$ から $t=310[s]$ の範囲(区間13から区間21)では、外乱影響は小さな値である。なお区間19で今回の解析区間では最強の潮流 3.8 m/s が観測された。この区間は強潮流区間であるものの、潮流の流向に大きな変化がないことを確認した。このため、式(1)が適用できる範囲の運動であると考えられる。 $t=310[s]$ から $t=345[s]$ の範囲(区間22から区間23)で、再び、大きな外乱が働いている。この外乱影響は3.6節で後述するビデオ画像を利用することにより、潮目に突入して船首が振られていることを確認している。

以上、KTモデルから推定した回頭角速度 r_{KT} と実際に観測した回頭角速度 r の差 Δr が、潮流による影響と仮定して推定した。しかしながら、実際には r_{KT} が有効でない現象が起きていることも考えられ

るので、船体の対水運動について着目した。

3.5 対水速度の推定および過渡現象

推定回頭角速度 r_{KT} はZ試験の実験結果を基に推定しているが、Z試験の実験条件は平水中である。そのため、実際に来島海峡のような強潮流下において適用可能なのか考察する必要がある。そこで、図5に示すように、対地速度ベクトルと潮流ベクトルの差をとることにより、対水速度ベクトルを推定することとした。なお潮流は解析区間のほぼ全範囲で、サンプリング数の80パーセント以上が標準偏差 0.03 m/s 内に収まる信頼度を有している。

図6(a)は、Z試験時の対水速度を図5に基づき推定したものである。大きな変針をとる航行であるが、潮流が一様で弱く平水中に近い状態における航行のため、対水速度の横方向成分(Y対水速度)は小さな値を示している。すなわち対水速度は船首方位と一致しており、斜航状態はみられない。

一方、図6(b)は、解析対象範囲の対水速度の推定値である。解析区間の前半である $t=0[s]$ から $t=77[s]$ までの範囲(区間1から区間5)は、比較的潮流が弱い区間であり、○印で示している。対水速度の横方向成分(Y対水速度)は小さな値を示しており、平水中でのKTモデルが適応できる範囲である

図 4 (a) 船首方位変化

図 4 (b) 舵角変化

図 4 (c) 回頭角速度変化

図 4 (d) 推定回頭角速度変化

図 4 (e) 外乱変化

図5 対水速度の推定方法

と考えられる。

図中の●印は、前節で大きな外乱が働いていると述べた区間の周辺である、 $t=77[s]$ から $t=191[s]$ までの範囲（区間6から区間13）である。この間は船首方位と対水速度ベクトルのなす角は大きな値（15 degから30 deg）となっており、斜航状態が続いていると考えられる。この状態は約2分程度の間起きていることがわかる。図7は可視化ソフトウェアで拡大画面であり、船首方位、対地速度ベクトル、

潮流ベクトルを示しており、この図からも斜航状態がわかる。このような斜航状態の場合では、平水中でのKTモデルの適応範囲から外れているものと考えられる。

その後の $t=191[s]$ から $t=310[s]$ までの範囲（区間14から区間21）では、再び船首方位と対水速度ベクトルのなす角は小さな値に戻っている（○印）。前節でも述べたように、強潮流下ではあるものの、潮流の流速・流向に大きな変化がないため、斜航状態にはならずKTモデルが適応できる範囲であるとえられる。

さらに図6(b)中の▲は $t=310[s]$ から $t=345[s]$ までの範囲（区間22から区間23）であり、ここでも船首方位と対水速度ベクトルのなす角は大きな値（20 degから30 deg）となっていることから、斜航状態になり、KTモデルの適応範囲から外れているものと考えられる。

前節で推定した Δr について考察する。強潮流部分に進入する際は、まず船首を左側に振る回転モーメントが働く。弓削丸の全長40 mと船速から、1船舶長進む時間は約10秒であり、その間は潮流変化による影響と考えられる。その後の Δr の値は、潮流による影響だけではなく、斜航状態となりKTモデルが適用できない範囲であり、 r_{KT} の値が実際と異なるための影響が含まれていると考えられる。

以上、対水速度を推定し、過渡現象として斜航状態になる場合があることを確認した。このことから、前節で推定した外乱影響 Δr は単なる潮流との重畳

図6(a) 対水速度 (Z試験時)

図6(b) 対水速度 (来島海峡航行時)

図7 観測結果 (拡大図)

効果だけではなく、*KT*モデルに従わない過渡的な現象によるものも含まれていると考えられる。この過渡的な現象の要因について考えてみる。*Z*試験の場合、大きな変針をとっているにもかかわらず、対水速度は船首方位で、一定の値をとっている。一方、今回の解析区間においては、強潮流区間に突入し船首が振られ、その後は斜航状態が続き、短時間では対水速度が船首方位に戻らない現象が起きており、*KT*モデルが適応できないものと考えられる。*KT*モデルは平水中の運動、すなわち対水速度の方向が船首方位であることが条件の一つであるため、今回のように斜航状態が長時間続く場合は、舵角を切っても、舵角量通りの水流が舵に当たらず、舵が効かない状態、すなわち*KT*モデルに従わない状態に陥るものと考えられる。

3.6 ビデオ画像の活用

3.4節でふれたビデオ画像で確認できた潮目突入前後の画像を図8に示す。図8(a)は潮目突入前($t=300[s]$ 、区間21)の画像であり、前方に潮目が

確認できる。図8(b)は潮目突入後($t=322[s]$ 、区間22)の画像であり、船首が左側に振られ、正面が馬島に変わっていることがわかる。今回はビデオの再生により潮目を確認しているが、宮崎・桐谷らによりリアルタイム解析を行う波浪計測システムの開発⁽⁴⁾も進められており、潮目の検出が可能になり、潮目の影響を相殺する舵角量を求めることができれば、有効な操船支援システムの一つになる。

3.7 操船方法に対する考察

図4(b)は、舵角を示しているが、この操船方法について考察を加える。区間6から右へ変針するために、数回に分けて、舵角を約10 degと0 degを繰り返してBang-Bang制御をとっている。しかしながら区間8までの船首方位は、右旋回するための舵角をとっているにもかかわらず、ほぼ一定である。回頭角速度をみても負の値をとることがあり、潮流の影響や斜航状態により、船首が右に向かないことを示している。このことから強調流部分に進入する際には、まず船首が左に振られるモーメントが働くため、まずそのモーメントを相殺する当て舵を取り、一旦舵角を0 degに戻し、右旋回への対応は次のステップ以降で行っていることがわかる。また潮目に突入する際には、目視によりこれを確認し、経験則に基づく予測、突入時には船の波切り音が変わることなどにより、当て舵をとるタイミング決定している。

このように潮流変化が大きい場所や潮目に突入する際は、まず船首が振られるのを相殺するための舵を切り、その後旋回するための舵を切っている。当て舵のとりタイミングは波切り音の変化などがきっかけとなる。

図8(a) ビデオ画像 ($t=300[s]$) 図8(b) ビデオ画像 ($t=322[s]$)

4. まとめ

来島海峡といった強潮流下において、潮流に応じた操船方法を確立するために、弓削丸で来島海峡の潮流と船体運動ならびにビデオにより海面の観測をした。

Z試験結果からKTモデルの操縦性指数を求め、回頭角速度についてこの指数を基にした推定値と実際の観測結果を比較し、潮流が船体運動へ与える影響を評価した。しかし対水速度を求めたところ、KTモデルによる推定値が適用できない斜航状態が続くという過渡現象が起きる場合があることがわかった。この現象は、潮目に突入する場合等が顕著であり、ビデオ画像により確認することができた。

今後は斜航状態における船体運動のモデル化やビデオ画像からの潮目の検出、当て舵量の推定方法、波切り音の変化を検出し当て舵を取るタイミングの決定方法などについて検討を行い、安全かつ効率的な操船方法の確立を目指したい。

謝 辞

本研究は運輸省船舶技術研究所（現在、独立行政法人海上技術安全研究所）と国立弓削商船高等専門学校との共同研究として行った。観測には弓削丸船長をはじめ、関係各位に協力して頂いた。この場を借りて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 多田光男・村山雄二郎・沼野正義・緒方純俊：来島海峡航路内での流動構造と船体挙動の観察，日本航海学会論文集，第100号，pp.113-119，1999.
- (2) 丹羽康之・沼野正義・福戸淳司・室原陽二：強潮流下における弓削丸の操縦運動解析，日本航海学会論文集，第101号，pp.103-108，1999.
- (3) Mitsuo Tada et al.：“Development of 3D Tool for Tidal Current and Ship Movement Analysis and Its Application to Real Observations”，Proceedings of ECM&SP '99，1999.
- (4) 宮崎 剛・桐谷伸夫他：ビデオ画像を用いた船側相対水位計測手法の開発，平成13年度海上技術安全研究所研究発表会講演集，pp.55-58，2001.

質 疑 応 答

大津皓平（東京商船大学）：強潮流下のモデルとして、それではどのようにKTモデルを変更すれば良いのか、見通しはありますか。

丹羽康之：今回の解析結果で明らかにしたことは、潮流の変化等により船首が振られ、その後斜航状態が続くことがあり、KTモデルの適応範囲外の運動になるということです。今後の検討課題として、KTの数値自身に潮流影響のパラメータを加えるモデルを作成することが考えられますが、その前に画像等からにより、定量的な舵角操作量の算出を行う必要があると考えられます。それが実現できれば、KTモデルの変更が可能になるものと考えております。また、海面状態の観測により、斜航状態に陥らないようなコース取りのための情報を得ることが有効な支援となると考えます。