外乱下における変針制御について

小林 弘明*・田中 清隆**

A Study on the Evaluation of Ship Handling Ability under the Disturbance

Hiroaki KOBAYASHI and Kiyotaka TANAKA

Abstract

In the recent years, the study on the evaluation of ship handling ability have been proceeding. Because of relating to the safety management of harbor and design of ship and fairway, it is important to evaluate the ship handling ability.

In this paper, we discussed the ability of ship handling under the disturbance, especially, position control ability in the fairway under the current disturbance.

Firstly, the factors of evaluation were discussed from view-point of following items:

- (1) amount of control
- (2) motion condition resulted by control
- (3) human workload

Finally, the formula which include the item (1), (2) has been gotten to evaluate the ability of ship handling including maneuverability under the disturbance.

The adequacy of formula has been verified by the rating of human operator using ship maneuvering simulator.

It will be necessary to confirm the usability of this proposed method in the every fields of safety assessment consistently.

1. ま え が き

本論文では、外乱として潮流を考え、一様潮流中における変針操船の困難度を評価する一般的方法について述べる。

一般に、広い海域における一様な潮流中の船の操縦運動は、潮流と共に移動する座標系から見れば、平水中の操縦運動とほぼ同一と考えられる。しかし、一様な潮流下であっても対地固定の航路など、制限された水域においては、変針操船は操船者に大きな負担を強いることになる。これは、一様な潮流中であっても船の運動方向の変化と共に船体に作用する相対的な潮流の方向、流速が刻々変化し、固定座標に対する船体運動が変化する点に変針操船の困難さがあると考えられる。

本論では、船の種類、潮流の強さ、方向及び航路の曲がり角に対する変針操船の困難度を評価することとした。操船の困難度を評価する場合、一般に、次の項目を考慮して行われる。

- ① 操作量の大小
- ② 操船結果の良否
- ③ 操船者の負担の大小

困難度の評価はこれらのどの項目を考慮するかが大変重要である。これらの項目に含まれるどの要素を考慮し

* 正会員 東京商船大学 (〒135 江東区越中島2-1-6)

** 正会員 日本海事協会 (〒102 千代田区紀尾井町4-7)

表1 操縦特性等

L	300.0	150.0
B	50.0	21.43
d	8.0	9.32
T'	2.95	2.95
K'	1.60	1.60
C _s	0.586	0.81
a _{vv'}	0.0333	0.0339
a _{rr'}	0.761	0.666
a _{ll'}	0.103	0.245
a _{nn'}	0.0000177	0.0000702
a _{ny'}	-0.000613	-0.00169
ε	0.7639	0.7639
g ₁	-837.892	-418.946
g ₂	-3.7479	-3.7479
g ₃	-0.00436	-0.00873

て評価を行うかを検討するために操船者（人間）と船（機械）のそれぞれの特性について調べる必要がある。本報告ではまず船単独の特性が変針操船に与える影響について検討する。次に変針操船における操船者の特性について検討し、最後に船と操船者及び環境を一体とした変針操船の困難度評価をすることにする。

2. 数値操船シミュレーション

潮流中の変針運動における船の特性を知るために船の種類、航路の曲がり角、潮流の強さ、方向を順次変化させた自動操縦による数値操船シミュレーションを行った。

ところで、この自動操縦は、船の特性が十分発揮される操縦系であることが必要となる。船の特性が十分発揮されるという観点から最適レギュレータとして設計された自動操縦系を考えた。

本シミュレーションに用いたモデル船は、SR151において開発された表1に掲げるEモデルで、船の長さが300mのタンカータイプ、150mのコンテナ船である。

2.1 自動航行のための制御則

航路が与えられた時、その航路に沿うための自動操縦系は一定の評価関数のもとで最適レギュレータとして求められる。

一般に、操縦の入力は舵角と主機の回転数であるが、本論では操舵系のみを考えることとする。広い海域における変針操船は針路の制御のみで十分であるが制限された水路では位置制御が重要となる。

そこで評価関数として、

$$J = 1/\tau \int_0^\tau \{ (y/y_{max})^2 + (\delta/\delta_{max})^2 \} dt \quad \dots\dots(1)$$

を考える。但し、 τ は十分長い評価時間、 y_{max} 、 δ_{max} は位置偏差及び操舵角の許容最大値であり y は設定航路からの横偏差を表す。最適制御入力とは次式の操縦運動方程式に対して J を最小とする最適レギュレータ問題を解くことによって得られる。

$$T\ddot{\phi} + \dot{\phi} = K\delta \quad \dots\dots(2)$$

K , T : 操縦性指数 δ : 操舵角 ϕ : 回頭角

但し、 $\cdot$, $\ddot{\cdot}$ は時間微分を表す。

J を最小にすることは変針操船において使用舵角 δ をなるべく小さく保ちながら横偏差をできるだけ小さくすることを意味する。

その結果、角速度 $\dot{\phi}$ 、針路誤差 ϕ_e 及び横偏差 y を含む制御則

$$\delta^* = g_1(\dot{\phi}/v) + g_2\phi_e + g_3y \quad \dots\dots(3)$$

となる⁽¹⁾。尚、 g_1 , g_2 及び g_3 の各係数は、上述の最適レギュレータのフィードバック・ゲインとして与えられる係数で、運動特性指数 K , T 及び制御系設計パラメータ(δ_{max} , y_{max})によって決定される。潮流の影響は次式によって考慮される。

$$\phi_e = \phi_A - \phi_0 + \phi_{Cy} \quad \dots\dots(4)$$

ϕ_e : 針路誤差 ϕ_A : 変針後の目標針路 ϕ_0 : 自船針路 ϕ_{Cy} : 潮流に対する偏角

2.2 シミュレーション結果

本シミュレーションに用いた運動方程式は、船速の応答を考慮した次の応答モデルを選んだ⁽²⁾。

$$T_1'T_2'(L/V)^2\ddot{\phi} + (T_1' + T_2')(L/V)\dot{\phi} + \phi + \alpha'(L/V)^2\dot{\phi}^3 = K'(V/L)g_{(S)}\{\delta + T_3'(L/V)\dot{\delta}\} \quad \dots\dots(5)$$

$$\dot{V} + a_{vv}V^2 + a_{rr}\dot{\psi}^2 + a_{\delta\delta}V^2\delta^2 = a_{nn}n^2 + a_{nv}nV (J_s > 0) \quad \dots\dots(6)$$

T_1', T_2', T_3' : 操縦性指数 α' : 非線形項の係数 $g(s)$: プロペラスリップの影響

L : 船の長さ V : 船速 n : 主機の回転数 J_s : 前進率

$a_{nv}, a_{\delta\delta}, a_{rr}, a_{nn}, a_{vv}$: 前後運動方程式の常数

但し, $\dots\dots$ はそれぞれ1階, 2階, 3階の時間微分を, また'は無次元値を表す。

自動航行のための操船系を設計する際に用いた運動方程式は線形運動方程式であったが本論では非線形項を含んだ応答モデル(5)式を用いて数値シミュレーションを行っている。これは, 船の操縦運動をより正確に表現出来ることを目的とするためである。

シミュレーション結果から一例として40度変針における航跡を図1及び図2に示す。数値操船シミュレーションにおいて針路変更が滑らかに行われていることが判る。この他の潮流の強さ及び方向を変化させた数値操船シミュレーションにおいても針路変更は滑らかに行われている。また, 線形運動方程式に対する最適レギュレータとして求められた制御則が非線形運動方程式に対してもよく制御できることが判る。

図1 変針操船航跡図 ($L=150\text{m}$)

3. 考 察

3.1 記号

本論で使用している記号等を図3に示す。本船の針路及び潮流の方向は, 絶対座標系においてY軸から右回りに表す。また, 位置偏位誤差(D)は設定された航路線と自船の航跡とによって囲まれる面積で誤差面積に当たる量である。

3.2 評価要素

操船の困難さを評価する場合, 先に示した三つの項目のどの要素を選ぶかということが大変重要な点である。そして, 困難度を評価する内容には, 潮流下操船において一般に言われるつぎの内容が表現出来ることを配慮することとした。

- ① 潮流が強い程操船は困難である。
- ② 大型船程針路補正は難しくなるので困難度は増加する。
- ③ アンケート結果によれば, 順潮, 逆潮よりも, 横方向からの潮流によって操船の困難度は増加する。

このことを考慮して, 先に示した困難度評価に関する各項目に対応する要素について検討を加えてゆく。

最初に, 操作量の大小に関する要素と

図2 変針操船航跡図 ($L=150\text{m}$)

図3 記号

図4-1 操舵角量 ($L=150\text{m}$) 図4-2 操舵角量 ($L=300\text{m}$)

して主機の回転数と操舵角があるが、変針操船に主機の操作を伴わないことから操舵角量のみを考えることにする。図4に時々刻々の操舵角の積算値を時間平均した値を示す。潮流の方向 (ψ_c) が0度から130度付近及び250度付近から360度にかけて潮流流速が強い程評価が小さくなっており、“潮流が強い程操船は困難である”という内容が表現出来ておらず困難度を評価する要素としては適切ではないことが判る。

次に、“操船結果の良否”という観点から評価要素として操船結果である回頭角速度、回頭角、及び船位の偏差が挙げられる。以下、これらの要素を個々に検討する。

まず回頭角速度について考える。図5は潮流の方向を横軸にとり回頭角速度を評価量として縦軸に選んでいる。回頭角速度も舵角量と同じく、潮流流速の強さに関して評価が逆転している部分があり、困難度の評価量としては適切ではないことが判る。

図5-1 回頭角速度 ($L=150\text{m}$) 図5-2 回頭角速度 ($L=300\text{m}$)

次に、回頭角について検討する。図6に横軸に潮流の方向をとって回頭角の変化を示している。潮流の強さに対する評価は一部矛盾はあるが大略前述の一般的評価内容を表現出来ていると考えられる。しかし、“大型船程針路補正は難しくなるので困難度は増加する”という内容に関してはその傾向を示しておらず、必ずしも適切な評価量と言えないであろう。

図6-1 回頭角 ($L=150\text{m}$) 図6-2 回頭角 ($L=300\text{m}$)

図7は、船位の偏差を横変位誤差によって表現し、これを評価量として潮流の方向に対して示したものである。この要素についても舵角量と同じく潮流の強さに関する評価に矛盾があり評価要素として適切でないことが判る。

以上の点から、唯一の要素によって変針操船の困難度を評価することは評価の対象とする要素が不足していると考えられる。

一方、現実の操船困難度は複数の要素をもって評価していると推測される。そこで、複数の要素を組み合わせた困難度の評価量について検討する。

図7-1 横偏位誤差 ($L=150\text{m}$) 図7-2 横偏位誤差 ($L=300\text{m}$)

複数の要素によって評価するとき、二つの課題が生じる。第一は、どの要素を組み合わせるかという点である。第二は、どのように組み合わせるかである。はじめの点については、変針操船が針路と位置及び回頭角速度をコントロールしながら達成されることに注目するならば、この3要素が評価量として有力であると考えられる。次に、どのように組み合わせるか、すなわち物理量の異なる3要素にどのような重みをつけるかという点について次のように考えられる。これら三つの要素は船を制御するために必要な情報と位置づけられる。一方、数値操船シミュレーションの自動操縦においても、これら三つの要素と同類の要素が評価、即ち重みづけされて操作量を決定している。このことから困難度評価を行う各要素に同様の重みを考慮することは十分妥当であると考えられる。

こうして複数の評価要素を組み合わせた困難度の評価関数は(7)式のように表すことが出来る。

$$E = g_1(\sqrt{\sum \phi^2}/v) + g_2\sqrt{\sum \phi^2} + g_3\sqrt{D} \quad \dots\dots(7)$$

上に述べた関数 E と先に検討した操舵角量との相違は次の通りである。操舵角量は時々刻々の目標値に対する補正量を決定しているが、関数 E は目標値からの誤差を評価している点に違いがある。また、操舵角量による評価では舵角制限があることにより、最大舵角を必要とするような操船あるいはそれ以上に困難な操船に対する困難度の評価が操舵角量と対応しなくなる。さらに、操舵角量を困難度の評価量とすると制御の複雑さが評価できないこととなる。つまり、操舵角を決定する要素は複雑な変化をするが、時々刻々の操舵角は各要素の和となるために制御の複雑さが前提となり複雑さの評価が出来なくなる。

今得られた評価関数 E を使って数値操船シミュレーションの結果を評価したものが図8である。“潮流が強い

図8-1 評価関数 E ($L=150\text{m}$) 図8-2 評価関数 E ($L=300\text{m}$)

ほど操船は困難である”という内容について一部矛盾があるが全体的にはよく表現出来ているといえる。“大型船程針路補正は難しくなるので困難度は増加する”という内容については矛盾なく表現できていることが判る。また、“アンケート結果によると、順潮、逆潮よりも横方向からの潮流によって操船の困難度は増加する”という内容についてもよく表現出来ていると考えられる。

こうして、船（機械）についての変針操縦における困難度の評価関数として E が有効であることが判った。

4. 変針操船における操船者の特性

前節で有効であると考えた評価関数 E が変針操船における操船者の特性を含めた人間（操船者）と機械（船）

を評価する評価量として妥当であるかどうかを検討するために簡単な操船者によるシミュレータ実験を行った。

4.1 シミュレータ実験

シミュレータ実験はパーソナル・コンピュータを使って CRT 上に設定航路を描きその航路に沿って航行するという設定によって行った。操舵角の入力はキーボードから数値を入力する方法とした。操船者に与えられた情報は、ディスプレイ上にデジタル表示された現在の操舵角、回頭角、回頭角速度及び船速である。また、各シミュレータ実験は潮流にバランスするための偏角をあらかじめ設定した状態で開始している。この設定は先に述べた数値操船シミュレーションと同様の設定となっている。この時、操船者は潮流の強さや方向に関する情報は与えられていないが、初期に設定されている偏角及び自船の移動する速度から潮流に関する概略の情報を得ることが出来る。操船者は充分学習を積んだ学生である。

各シミュレーション実験の終了後、操船者によってその操船の困難度について非常に難しいから非常に易しいまで5段階による評価がされている。この評価によって、後に示すレーティングを行う。

4.2 シミュレータ実験の結果に対する評価

シミュレータ実験の結果を評価関数 E を用いて評価した結果について述べる。

ここで、 E^* という評価量を定義する。 E^* はシミュレータ実験の結果からもとめられた刻々の回頭角、回頭角速度及び横変位誤差を(7)式の評価関数 E を用いて得られる値である。そして、実験結果を E^* により評価した結果と操船者によってなされた困難度評価（レーティングスケール）との関係を示したのが図9である。図中

図9 操船者によるシミュレータ実験の評価

図10 潮流流速に対する E と E^* との相関

に示した2本の斜線は最小自乗法により求められた直線を平行移動し図中のデータの80%を挟んだものである。 E^* が増加すると共に操船者の困難度評価（レーティングスケール）も高くなっていることが判る。尚、図の左下辺にデータがないのは、その評価に対応する実験の設定がなかったことによる。

この図にプロットされている点は船の大きさ、航路のまがり角、潮流の強さ、方向の各パラメータのいろいろな組合せとなっている。 E^* と操船者の困難度評価に強い相関があるということから、操船者の困難度評価が評価量 E^* によって表現出来ることを示している。

5. 船と操船者及び環境を一体とした変針操船の困難度評価

本節では船と操船者及び環境を一体とした変針操船の困難度評価について述べる。

E と E^* との相違について、 E は船単独の特性が変針操船に与える影響を評価した値であり、 E^* は操船者及び船（人間—機械）の特性が変針操船に与える影響を評価した値である。それ故 E と E^* が関係づけられることにより船（機械）単独の困難度評価と操船者（人間）を含んだ困難度評価との関連が明確となる。

図10は、航路の曲がり角、潮流の方向を一定にし、潮流流速のみを変化させた場合の E と E^* との関係を示している。この図から、 E は潮流の影響を含んでいるが、操船者は E の評価に加えて潮流流速の影響を受けることを示している。このことから潮流流速の変化を考慮することにより E と E^* が関係づけられると考えられる。関係づけのために潮流の流速 V_c と自船の船速 V との比が操船の困難度に影響を及ぼすと仮定して、次の潮流流速船速比の関数を導入する。

$$H = k((V + V_c)/V)^p \quad \dots\dots(8)$$

V : 自船の船速 V_c : 潮流流速

即ち操船者の要素 H を含めることによって評価関数 E に操船者の評価要素が考慮されることになる。 E は船単独の性能から求められる値である。これに対して E^* は操船者が変針操船を行った場合の困難度評価値である。これら二つの評価値の違いは操船者が変針操船している点である。そこで E に操船者の操船特性を考慮することによって E^* と関係づけることを考える。ここで操船者の変針操船の特性を H と表現しているので H は操船者の要素ということが出来る。図10から最小自乗法により各係数を求めると、 $k=1.0$ 、 $p=1.5$ がえられた。

図11は求められた係数を H の式に代入して E に乗じた $E \cdot H$ と E^* との相関について示している。 H によって E と E^* とがよく関係づけられていることが判る。このことから、変針操船における船のみの困難度評価関数 E に操船者による操船の影響 H を考慮することにより操船者と船を一体とした困難度評価が妥当であると考えられる。

図11 潮流流速に対する $H \cdot E$ と E^* との相関

6. まとめ

本研究では、潮流下における変針操船の困難度として船（機械系）に対し E という評価関数を提案した。そして、この関数に H という人間の要素を乗ずることにより潮流下における操船者、船及び環境を一体とした変針操船の困難度を評価できることを示した。

今後、数多くのシミュレータ実験により H が正確に求められれば、実時間の操船シミュレータ実験を行わず数値計算によって様々な潮流のある水路において安全な運航のためのガイドラインを得ることができると考えられる。

参考文献

- (1) 清水健：航路内自動誘導システムに関する研究，東大修論，昭和59年
- (2) 芳村康男，野本謙作：増減速を伴う操縦運動の取扱いについて，造船論，第144号，昭和53年12月

質 疑 応 答

福戸淳司(船舶技術研究所)：一般に最適レギュレータの評価関数 J は $J = \{(y/y_{max})^2 + (\delta/\delta_{max})^2\} dt$ を最小にするように設定されますが難易度の評価値の中に δ の項が入れられなかった理由をお教えてください。

田中清隆：評価関数“ E ”を構成する要素は回頭角，回頭角速度及び横変位誤差と成っておりこれは数値シミュレーションに使用した自動操舵の制御則と同じ要素となっています。そのため，さらに操舵角の要素を考慮すると同じ要素を二重に考慮することになってしまうためです。