制約水域における避航操船の困難度評価 —操船環境総合化モデルの実用化へのアプローチ—

井上 欣三*・宇佐美 茂*・世良 亘**

Improvement of Risk Evaluation Model of Collision Avoidance in Restricted Water

Kinzo INOUE, Shigeru USAMI and Wataru SERA

Abstract

In the previous paper, authors proposed a model to estimate the difficulty of a collision avoidance manoeuvre in a geographically restricted water area. The aim of this model was to express the mental load of the mariner, taking note that how many actions can be actually chosen amongst the action space of the course-change and the speed-reduction, from the viewpoint of the physical limitation of the manoeuvring action.

In the present paper, the results of the improvement of this model are reported. The improvements were made on a few points as follows; the introduction of a weighting function on the action space of manoeuvre, the consideration of the ship domain and the minimum passing distance against the obstacles in the restricted water and etc.

As the results, this corrected model gave suitable agreement with the subjective difficulty which the mariner would feel during the collision avoidance manoeuvre.

1. はじめに

港内水域や海上構造物の建設水域などの制約水域において他船を避航するとき、操船上の困難さの評価は従来のように船同志の出会いのみに着目するのではなく、その周辺に存在する物理的障害が操船者の感じる避航操船の困難さにどのような干渉効果をもたらすかといった面からも評価できる必要がある。このような要請に応えることのできる評価指標が開発されることにより、制約水域における交通の場の評価のみならず、水域の制約条件とそれによって操船者が感じる困難さの関係を基に操船者の許容範囲を考慮した港湾施設の配置設計など、実用面への応用が期待できる。

このような考えから著者らは、他船を避航する際の操船上の困難さに加えて、自船の操縦能力・自然的環境条件・地理的環境条件などの影響を困難度評価指標の値に反映できるモデルとして「操船環境総合化モデル」¹⁾を提案した。このモデルは制約水域において他船と遭遇するとき、衝突の危険を回避するために操船者が取り得る操作上の手段が自船の操縦能力や周囲の環境条件によってどれほど制約されているかに着目し、瞬時瞬時に操船者に課せられる困難さの程度を定量化しようとしたものである。

ここでは第 1 報以来、本モデルの実用化に向けての改良について検討した経緯と成果について報告する。

2. 操船環境総合化モデル

2.1 モデルの前提

* 正 会 員 神戸商船大学(〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 学生会員 大阪大学工学部大学院(〒565 吹田市山田丘 2-1)

ここでは「2 船がそのまま直進すれば 2 船間の航過距離が一定値以下になる状況」を出会いと定義する。そしていま、与えられた水域内で着目船が他船と出会い、その後は互いに避航動作を取らないまま接近する状態を前提とする。避航を考慮すると操船行動をとった時点でその後直面するであろう危険が解消され、操船者が本来感じたであろう負担が表面に現れなくなるが、このように避航を考慮しないで両船が航過し終えるまで一連の評価を行うことにより、その出会いに本来包含されていたはずの潜在的な負担が評価できることになる。

2.2 評価指標値

自船が他船と出会うとき、衝突の危険を回避するために操船者が取り得る手段は針路と速力の変更である。そこで、横軸に変針、縦軸に変速をとった図 1 のような 2 次元操作空間を考える。もし他船との出会いもなく、操船水域にいかなる制約も受けなければ操船者はこの空間上のすべての操作を取ることが許される状態にあり、操船上の負担は全くないと考えることができる。

一方、図中①の範囲は他船と出会うとき、衝突の危険を避けるために自船が最小限取らなければならない操作空間を示したもので、この範囲が広いほど操船者はその出会いに対し操船上の負担を大きく感じるようになる。この①の範囲以外の操作空間はすべて当該操船者に許された選択自由な操船上の余裕空間を意味するが、次に述べるような操船環境の干渉効果は、操船者が取り得る手の内にさらに制約を加えることになる。

図中①の範囲の外側を取り巻く②の範囲は、自船の操舵追従性能が劣る場合に操船者がさらに取らなければならない操作空間の広がりを示し、また、③の範囲は自船の惰力性能の優劣により、必要な時間内に目標とする速力にまで到達するような速力変更が物理的に不可能となる操作空間を意味している。このように自船の操舵追従性能や惰力性能が低下することによってこれらの範囲が広がるほど操船者にとっては取り得る手の内が狭められることになる。さらに、④で示す範囲は他船を避けるとき周辺に存在する岸壁、橋脚、操業漁船群、漁網などの障害物により選択に制限を受ける操作空間を意味しており、地理的環境条件による干渉の大きさはこの部分に反映される。

したがって、図 1 において操船者に残された操作上の余裕はハッチ部以外の操作空間の広がりであり、本モデルではひとつの出会いのある時間断面において操船者が感じる余裕の大きさはこの面積に応じて変化するものと考えことにする。また、操船者にとっては余裕と負担は互いに補数の関係にあると思われるので、ハッチ部の面積の全体に占める割合は操船者が感じる負担の大きさに対応すると考える。

本モデルによれば、時々刻々変化する操船上の余裕または負担の大きさを出会いの開始から終了まで積算することにより、出会い全体の評価を行うことができる。このとき、一つの時間断面から次の時間断面までの計算時間間隔は船舶の特性時間^②を参考に 15 秒と定めている。図 2 は一連の出会いに対する負担の積算値を、避航操船に制約を与える各要素ごとの負担の積算値と共に示した

図 1 評価モデルの模式図

図 2 評価指標値の時間変化と積算値

ものである。

3. 操船環境総合化モデルの改良点

3.1 操作空間の重み付け

第1報においては操作空間上のすべての格子点に同じ重みを持たせているため、原針路・原速力で進む場合も大角度変針・急加減速をする場合も操船者の感じる負担の程度は同じとしていた。しかし、操船者にとって余裕として残された操作空間上の格子点に対してその価値観を考えると、それが原針路・原速力の近くにあるほど大きな価値があるものと考えられる。実際、操船実務者間では、少量の操作を行うことはさほど気にはならないが、ある程度以上の操作を行うとなると急に負担感が大きくなるとも言われている。

このように原針路・原速力で進む場合と大角度変針・急加減速をする場合では操船者の感覚において差があり一律に扱うことは妥当ではないと考え、本報では操作空間の変針軸および変速軸方向に図3に示すような指数関数の重みを考えた。操作空間上の任意の格子点の重みは各軸方向の重みの積で与えられるものとし、次式で求められる。なお、式中の係数 k_1 および k_2 は原針路・原速力における重みが1、操作空間の外縁上における重みが0となるよう設定した。

$$\alpha = \exp(-k_1 \cdot a_v^2) \cdot \exp(-k_2 \cdot a_c^2) \quad \dots (1)$$

ただし、 α ：操作空間上の格子点の重み

k_1 ：係数 $k_1 = 4.5$

k_2 ：係数 $k_2 = 0.00125$

$a_v = (V_0 - V)/V_0$ ($V < V_0$ ：減速)

$= 5 \cdot (V - V_0)/V_0$ ($V > V_0$ ：増速)

V_0 ：原速力[m/sec]

V ：変更後の速力[m/sec]

a_c ：変針量[deg]

図3 操作空間の重み付け

3.2 判定領域

操船者は、自船の周囲にあって他船の侵入を許さない領域の存在を常に意識しており、この領域内を通過しようとする船舶が存在すれば避航を行うことにより他船が領域内に入らないような措置を取るといわれている⁽³⁾⁽⁴⁾。この考えから、本モデルでは2船がそのまま直進するとしたとき、他船が将来このバリエーションとしての領域内(以後、他船侵入による危険の有無を判定する領域という意味でこれを判定領域と呼ぶ)を通過する場合、自船と他船の間に出会が生じたとみなし、評価を行うこととしている。第1報では他船との衝突の危険を避けるために自船が取らなければならない操作空間を求めるため、判定領域を一律に300メートルの円として仮定していたが、本報では著者らが提唱する限界航過距離⁽⁵⁾の概念に基づく図4に示すような楕円を採用した。この楕円の長軸と短軸の長さで自船の位置は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} FA &= (0.0155 \cdot L_t + 2.0764) \cdot L_o \\ SP &= (0.0077 \cdot L_t + 0.6671) \cdot L_o \\ OC &= 0.1 \cdot FA \end{aligned} \quad \dots (2)$$

ただし、 FA ：限界航過前後距離[m]

SP ：限界航過左右距離[m]

OC ：自船後方偏位量[m]

L_o ：自船の長さ[m]

L_t ：他船の長さ[m]

図4 判定領域

3.3 障害物に対する離隔距離

自船周辺の岸壁や浮標など障害物の存在による干渉影響を考えると、まず避航後の針路・速力において自船の船首方向の障害物に対する TCPA と他船に対する TCPA を比較する。そして障害物に対する TCPA が他船に対する TCPA よりも小さい場合は自船が他船を航過する前に障害物と接触するため、その針路・速力による避航操船は障害物により制約を受けると判定する。第1報では障害物までの距離は物理的な距離を用いたが、本報では著者らが提唱する離隔距離⁽⁵⁾（操船者にとって障害物に対してこれ以上接近したくないという最小限の距離）を考慮することにする。具体的には、実在する障害物の周囲にその障害物の種類ごとに対応する離隔距離をとり、この離隔距離が加味された地形に対する TCPA と他船に対する TCPA を比較することにより、操作空間上における針路・速力の各格子点が障害物により制約を受けているか否かを判定する。また、障害物に対する離隔距離は次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} D(\text{浮 標}) &= 0.33 \cdot L_o \\ D(\text{防波堤端}) &= 0.54 \cdot L_o \\ D(\text{岸 壁}) &= 0.68 \cdot L_o \\ D(\text{錨 泊 船}) &= 0.89 \cdot L_o \end{aligned} \right\} \quad \dots(3)$$

ただし、 D ：障害物に対する離隔距離[m]

3.4 評価対象区間

第1報で述べたモデルでは各環境要素の評価指標値への反映を調査するため計算回数を揃え、評価の対象区間を一律に衝突の10分前から両船が衝突するまでとした。しかし、操船者が他船に対し負担を感じ始める評価の開始基準としてこのような TCPA という時間の概念を考えると、同航船のように相対速力が極端に小さい場合では目の前に存在する他船への負担が評価指標値に現れないといった現象が起こり得る。

そこで、本報では他船が視界内に現れ、その出会いが確認されることにより負担が生じると考え、評価の開始は自船と他船の距離に依存するものとした。なお、視界が制限されてきたときに操船者がその影響を意識し始める視程は平均2.77海里という調査結果⁽⁶⁾が報告されているが、制約水域では視界を遮る物が多く存在し、船舶の航行速力も低速であることなどから、ここでは視界制限状態での値を参考とし操船者が他船の存在に負担を感じ始める距離を2海里とした。

また、評価の終了時期について第1報では自船と他船の衝突まで、あるいは他船が自船の船首尾軸または正横軸を通過するまでとしていたが、ここで考えているような質点同志の出会いではこの時期より以前に他船は判定領域内に入ることになり、このとき自船にとっては操作空間上にもはやとるべき操作手段が全く残されていない衝突状態となる。このことから評価対象区間を他船との出会いから衝突までとすれば、評価は他船が判定領域の範囲に達した時点で終了することが妥当であると考えられる。

したがって本報では評価の対象区間は、他船が自船から2海里離れたところから判定領域内に侵入する瞬間までの間とした。

4. モデルの指標値と操船者が感じる主観値との対応

4.1 モデルの時間断面での値と SJ 値⁽⁷⁾

操船者の出会い状況における主観的な衝突危険度を示す指標として、原の提案する SJ 値がある。SJ 値は、シミュレータ実験の結果をもとに2船の相対距離と方位変化率から衝突危険度を計算し、その結果と操船者による主観的な危険の感じ方との対応をとったものであり、その妥当性も確認されている。そこで、ひとつの典型的な出会い

図5 本モデルの評価指数値と SJ 値の比較

いについて、本モデルによる操作空間の制約状況から操船者に課せられる負担を用いて求めた指標値の時間変化と、このときの SJ 値の時間変化を比較した。

図 5 は、周辺に障害物の無い水域において船の長さ 100m の 2 船が直交状態で出会う場面を想定したときの SJ 値と本モデルでの指標値の比較を示している。両者は共に同様な変化傾向を示している。このことから本モデルのように操作空間の制約という客観的な側面から操船者に課せられる負担を評価しようとする指標値によっても操船者が主観的に感じる危険の感覚がうまく表現されていることがわかる。

このように、本モデルによる指標値は、出会いの各場面において操船者が主観的に感じる危険感を的確に表現し得るといえる。

4.2 モデルの積算値と操船者が感じる困難度

船舶が航行中に他船と出会うとき、その出会う角度の違いにより操船者が感じる困難度がどのように変化するかを調べるため、アンケートによる調査を実施した。回答者は、内航及び外航の現役の航海士 36 名である。

回答者は記入に先立ち自船の種類、全長、速力を想定し、他船については自船と同じ種類、大きさ、速力(ただし、追越しの場合は自船の半分の速力)の船舶と仮定した。質問はまず Head on の行会い、90 度の横切り、Over taking の追越しの、航法の異なる 3 種類の出会いについて図を示し、一対比較によりどちらの出会いがどの程度困難に感じるかを 5 段階評価で記入させた。次に、横切りの出会いにおいて出会い角 45 度、90 度、135 度の 3 種類を取り上げ、同様に一対比較によりどちらの出会いがどれだけ困難に感じるかをやはり 5 段階評価で記入させた。図 6 に回答を AHP により解析した結果を Head on の値を基準値 1 としたときの比率として示す。Head on から 135 度までは出会う角度の増加と共に困難度も増加しているが、Over taking では困難度が減少している。この結果を航法の範囲と対応させて考えると、行会いの航法から横切りの航法の範囲では出会い角の増加に伴い困難度は連続的に増加し、追越しの航法に変わるところで連続性が途絶えて、追越しの航法の範囲は他の航法と独立した困難度を持つものと考えられる。

図 7 は、アンケートと同じ条件での本モデルの評価結果を、自他船の船の長さが 50m、100 m、200m のそれぞれの組み合わせについて積算値で示したものである。いずれの船の長さにおいても、出会い角と操船者が感じる困難度の関係は良い対応関係にあることがわかる。このように、出会い角の異なる一連の評価においても、それぞれの出会いにおいて潜在的に操船者に課せられる負担が操作空間の制約に着目したインデックス上にうまく反映されていることがわかる。

図 6 操船者の主観的な困難度

図 7 出会い角の違いによる評価値の変化

5. 水域の制約等の影響の比較

本モデルの特徴は、避航操船に際し操船者に課せられる負担の大きさを自船の操縦性能や交通環境条件はもとより、風等の自然的環境条件、岸壁や漁網の存在といった地理的環境条件などさまざまな環境条件の影響を加味して評価することが可能なことである。図8は、中央に示される障害物の無い水域で船の長さ100mの2船が直交衝突針路で出会う計算条件で行った評価値を基準値1とし、それぞれの環境要素の変化の影響を反映した評価値をこの基準値に対する比で示したものである。ここで示した環境要素のバ

図8 環境要素の評価値への影響

リエーションは、自・他船の大きさの組み合わせのほか、前方航過距離の大きさ、自船の操縦能力として操縦性指数 T' 、 K' の大きさ、急速停止時間 t_s 、また自然的環境条件として主要な8方位からの風向、ただし、風速は10m/sの風とし、風向は自船船首方向に対する真風向で表している。そして、地理的環境条件については平行岸壁水路の中央を航行する場合の水路幅、1辺200mの正方形の構造物が自船の進行方向に対し平行あるいは垂直に連続して並ぶ障害物を考えた。岸壁、障害物の配置は図9、図10に示すとおりである。

このように、これまででは特に定量的に評価することが困難であった防波堤、護岸、海上構造物、漁網等々、物理的な障害物の操船負担への影響が定量的なインデックスのもとで明らかにできるようになったことにより、今後は単に避航操船環境の評価にとどまることなく、操船者に課せられる操船負担の面から護岸や防波堤など港湾水域施設の配置の問題、港内航路の形状設計、海上工事や漁網の存在と船舶交通とのコンフリクト解消へと応用の道が開けたといえる。

6. 3船以上の出会いにおける評価

輻輳海域においては、他船を避航する際に別の第3船が存在することにより自船の操作空間がさらに制約される場合がある。このような3船以上の出会いの場合、全ての船舶と衝突を避けるような手段を取らなければならない。このとき、1つの操作空間上で操船者のとれる手の内を考えるならば、全ての船舶を避航できる操作だけが操船者の余裕に、他は全て負担に対応すると考えられる。つまり、それぞれの船舶

図9 平行岸壁水路

図10 障害物の配置

に対する避航に伴って制約される領域を1つの操作空間上で重ね合わせることで、3船以上の出合いも2船の出合いと同様に評価することができる。

図11に示すようにHead onと出合い角90度の2隻の他船と同時に衝突針路で出会うとき、2次元操作空間の制約状況は図12上図に示すHead onの船舶により負担を課せられる領域と、中図に示す出合い角90度の船舶により負担を課せられる領域を重ね合わせた下図のようになる。なお、同一方向から数隻の船舶が接近する場合は、最も近い船舶により負担を課せられる領域が後方の他の船舶により負担を課せられる領域を含んでしまうため、最も近い船舶1隻の場合と同じ負担になる。

このように、本モデルでは3船以上の船舶との出合いについても検討が可能である。

7. 障害物のブラインド効果

$$R = \frac{a}{b} \cdot R_B = \beta \cdot R_B$$

R_B : 他船が視認されてからの評価指標値の積算値
 a : 他船が遠方から視認できるときの評価開始距離
 b : 他船が視認されたときの2船間距離

図13 障害物のブラインド効果

図11 3船の出合いの状況

図12 3船の出合いにおける操作空間

他船が障害物の陰に隠れて発見できず自船の至近距離で突然現れるような場合、操船者が感じる操船上の負担の程度は他船を遠方から発見している場合よりも増加するはずである。そこで、そのような感覚を表現する手法として次のような修正係数 β を考えた。

$$R = \frac{a}{b} \cdot R_B = \beta \cdot R_B \quad \dots (4)$$

ただし、 R : 修正後の負担

R_B : 他船が視認されてからの評価指標値の積算値

a : 他船が遠方から視認できるときの評価開始距離

b : 他船が視認されたときの2船間の距離

図13は、他船が視認された後の評価指標の積算値 R_B と修正係数 β 、そして他船が突然現れたことによる負担の増加を加味した負担値 R を他船が現れる距離を横軸にとって示したものである。修正係数 β をかける事により、他船の視認が遅れるほど

操船上の負担が増加する様子が表現されている。港内で岸壁護岸や建物の陰から突然他船が現れたり、霧、雨による視界制限状態や、他船の急な変針により近距離で突然出合いが生じた場合なども、このような考え方で評価することが可能である。

この計算例では0.2海里での評価値は2海里での評価値の4倍程度になっているが、他船の視認が遅れたときに操船者が感じる負担がどのように増加するかについてはまだ調査していないため、この係数が定量的に操船者の主観値と対応が取れているかどうかは今のところ不明である。今後早急にこれらの調査を行い、定量的にも使用可能な係数にする必要がある。

8. むすび

本研究では操船環境総合化モデルの改良について報告した。モデルの改良は、操作空間への重み付け、判定領域の設定、離隔距離の考慮、評価対象区間の設定について行った。これにより操作空間の制約という物理的側面から操船者に課せられる負担を表そうとする指標によっても、操船者が感じる主観的な困難感をうまく表現する事が可能になった。

本モデルを用いることにより、これまでは直接その影響を評価することが難しかった避航操船における周辺物理的障害物の影響、例えば、操業漁船群の漁網の存在が操船者に与える影響、岸壁や防波堤の配置が操船者に与える影響、埋立てや架橋工事などの海上工事が周囲の交通に与える影響、障害物による死角影響、霧などによる視程狭塞の影響等々、操船環境に制約を受ける水域において操船者に課せられる負担を定量的に評価することが可能になった。この評価手法は海上航行環境そのものを評価するのに利用できるだけでなく、操船者に負担を与えない港湾の設計など土木工事のあり方に対し操船者の視点からの意見を反映することにも役立つものと考えている。今後はこのモデルを実際の海域に適用しながら、実用段階で現れる種々の問題点に対処していきたい。

参 考 文 献

- (1) 井上欣三・宇佐美 茂・世良 亘：避航操船の困難度評価指標の開発—操船環境総合化モデルの提案—, 日本航海学会論文集, 第89号, pp.187~195, 平成5年9月.
- (2) 藤井弥平・巻島 勉・原 潔：海上交通工学, pp.14~16, 海文堂出版, 昭和56年8月.
- (3) 藤井弥平：避航領域についての一考察, 日本航海学会誌, 第44号, pp.49~58, 昭和45年12月.
- (4) 藤井弥平：避航領域の定義について, 海上交通工学研究部会資料, pp.1~13, 昭和55年5月.
- (5) 井上欣三・宇佐美 茂・柴田登紀子：制約水域における航過距離と離隔距離に関する操船者意識のモデル化, 日本航海学会論文集, 第90号, pp.297~306, 平成6年3月.
- (6) 社団法人 日本海難防止協会：航行環境の定量的評価手法に関する調査研究 完了報告書, 平成4年3月.
- (7) 原 潔：輻輳海域における避航操船基準の有効性, 日本航海学会論文集, 第85号, pp.33~40, 平成3年9月.

質 疑 応 答

小林弘明(東京商船大学)：操作空間の重み付け内容の根拠を示してください。

世良 亘：操船実務者に対しヒアリングを行ったところ、少量の操作を行うことはさほど気にはならないが、ある程度以上の操作を行うとなると急に負担感が大きくなるという回答が得られたので、そのような感覚に合う形状として指数関数を考え、原針路・原速力が1、操作空間の端部では0に近づくように重みを設定しました。また、直線や他の指数関数の重みを付けた評価も行い、重みの違いによる影響等も調査しましたが、ここに示したものが操船者の意識を最もよく表現するように思います。