港内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港湾計画への適用—

井上 欣三*・宇佐美 茂**

Application of Risk Evaluation Model of Collision Avoidance to a Port Reconstruction Planning

Kinzo INOUE and Shigeru USAMI

Abstract

When a port reconstruction project is planned, it is necessary to investigate ships' safety and efficiency of operation which is affected by alternation of shore shape or sphere. And nowadays, marine traffic simulation is often used to evaluate a difficulty of ship operation within a planned area.

Authors have been proposed the risk evaluation model of collision avoidance which can reflect an influence of geographical condition, sea condition and ship's manoeuvrability into the index value in the previous papers. And in this paper, as the application to a port reconstruction planning, we have evaluated the difficulties of ship's manoeuvring in a harbour area, carrying out the marine traffic simulation.

As the result of above simulation, it is found that our evaluation model of collision avoidance can express properly the mental load of mariners, and useful when it is applied to port reconstruction planning.

1. はじめに

新たな港湾施設の建設や既存施設の変更が計画されるとき、これらの計画がその水域を航行する船舶の安全性や運航効率にどのような影響を与えるかについて検討を行うことは不可欠である。今日ではこのような検討の方法として交通流シミュレーションを実施し、種々の評価モデルを用いて計画水域を航行する船舶への影響を定量的に把握しようと試みられることが多い。

港内などの制約水域中における操船困難度を評価するためのモデルとして、筆者らは「操船環境総合化モデル」⁽¹⁾⁽²⁾を提案しているが、今回は本モデルの港湾計画への適用として、港内水域を対象とした交通流シミュレーションを実施し、新しい港湾計画の実施がその海域を航行する船舶の困難さに与える影響について評価を行うことにより、評価モデルとしての適用可能性と問題点の検討を行ったのでここに報告する。

2. 評価の方法

2.1 シミュレーションの前提

今回実施したシミュレーションは一般に用いられているような避航を模擬する交通流シミュレーションとは異なり、ある着目船が与えられた水域内で他船と衝突の危険が生じて互いに避航動作を取らず、原針路・原速力のまま接近する状態を前提とする。これは、シミュレーション上で避航を模擬すると、操船行動を開始し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

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

**正会員 ナビテコ株式会社 (〒100 東京都千代田区一ツ橋 1-1-1)

に現れなくなるが、今回のように避航を模擬しないで両船が航過し終えるまで一連の評価を行えば、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と考えられるためである。

避航を模擬しないシミュレーションにはこのような利点がある反面、シミュレーションの結果から得られる船舶の航跡が、現実には避航を行っている実際の船舶の航跡と異なる場合がある。

船舶の挙動を現実に近い航跡として詳細に表現することが必要とされる場合には、例えば、航跡を再現するためには、避航操船を組み込んだシミュレーションを行うことにより船舶の挙動を求めながら、一方では、操船困難度を評価するためには、他船との出会いが生じた段階から上述のような避航を模擬しない別途シミュレーションを行うことにより評価値を求める方法も考えられる。

2.2 操船環境総合化モデル

操船困難度の評価に用いた操船環境総合化モデルの模式図を図1に示す。図1に示す矩形の範囲は操船者が避航操船を実施する際に取り得る操作上の手の内の範囲を示し、これを操作空間と定義する。ここでは縦軸として原速力に対する0%から120%の変速範囲を、横軸として原新路の左右それぞれ60度までの変針範囲を考えている。

本モデルは他船を避航する際の操船上の困難さに加えて、自船の操縦能力や自然的環境条件・地理的環境条件等の影響を困難度評価指標の値に反映することが可能であり、図1の①～④で示すハッチング部分は、それぞれ次に述べる条件によって避航操船上の操作手段に制約を受ける範囲を示している。

① この範囲内の操作量では他船との衝突の危険を避けることができないため、操船者にとって選択することができない操作範囲

本モデルで考える航行船舶は、それぞれ自船周囲に他船の侵入を許さないバリアとしての領域⁽³⁾を持っており、他船が一定期間内にこの範囲内に入ると場合には衝突の危険があるものと判断する。

避航のための操作量が図中①で囲まれる範囲内にある場合には衝突の危険を回避することができないため、操船者にとっては選択することができない操作範囲となる。

② 操舵性能の優劣による変針までの時間遅れを考えた場合に、この範囲の操作量では他船との衝突の危険を避けることができないため、操船者にとっては選択することができない操作範囲

本モデルでは自船の操舵性能を考慮しており、操舵を開始してから所要の変針角を得るまでには操舵性能に応じた時間遅れを伴う。

操舵性能を考慮したとき、避航のための操作量がこの範囲内にある場合には衝突の危険を回避することができないため、操船者にとっては選択することができない操作範囲となる。

③ 自船の機関出力の限界により、選択することが不可能な操作範囲

減速あるいは増速により衝突の危険を回避する場合、衝突までに残された時間内にこの速力まで変速することが物理的に不可能であるため、操船者にとって選択することができない操作範囲。

④ 周囲に存在する障害物のため、選択することができない操作範囲

周囲に岸壁・橋脚・漁網などが存在し、この範囲の操作を取ると衝突の危険は回避できるが、他船が航過する前に障害物に接触してしまうため、操船者にとって選択することができない操作範囲。

衝突の危険を回避する場合に操船者に残された選択可能な操作範囲は図中のハッチング部分以外の範囲であり、この範囲が小さいほど操船者にとってその出会いは困難であると考えられることができる。

図1 操船環境総合化モデルの模式図

交通流シミュレーションの適用海域
図2

また、選択し得る操作範囲が原針路・原速力に近いほど操船者にとってその操作は価値があるものと考えられるため、本モデルでは変針軸方向、変速軸方向にそれぞれ原針路・原速力において最大となるような重みを与えたうえで、操船者にとって選択することができない操作範囲の大きさに着目し、すべての操作が選択できる場合を困難度0、いかなる操作も選択することができない場合を困難度1とする0から1の間の数値で避航操船の困難度を表現する。

表1 L換算係数

船型区分 (GT)	0 ~	100 ~	500 ~	3,000 ~	20,000
	100未満	500未満	3,000未満	20,000未満	以上
L換算係数	0.5	1	2	4	6

3. 適用海域および船舶発生条件

交通流シミュレーションは図2に示すモデル港湾水域を含むような、東西約6,000メートル、南北約8,000メートルの範囲を対象として実施した。

シミュレーション上で発生する船舶の船型・速力・ODなどの条件については、48時間にわたる船舶航行実態調査⁽⁴⁾のデータから、航行形態が基本的に不特定である曳押航船、特殊船、プレジャーボート、作業船およびパイロットボート等を除く船舶の通航経路をモデル化し、各通航経路ごとの発生隻数・船型・速力等を設定した。

図2において点線で示される、モデル水域南方から防波堤間の水路にかけて収束する漏斗型の図形は、シミュレーションで用いた船舶の通航経路の一例を示しており、発生する船舶はこのような通航経路に沿って発生地点から目的地に向かって所要の速力で航行するものとした。

また、シミュレーション時間については、表1に示すL換算係数を用いて算出したL換算隻数が最も多い最輻輳時刻帯を抽出し、この時刻帯の船舶交通流を40時間分再現した。

4. シミュレーションによる評価結果

シミュレーションによって得られた操船困難度評価結果の一例を図3に示す。図3は1辺100メートルのメッシュにおける1時間あたりの評価指標積算値を示しており、航行船舶隻数の多さを考慮した量的・質的な操船困難度の大小はメッシュの濃淡で表現されている。この結果によると、評価水域中央部付近に存在する防波堤の近辺では、入出港する船舶交通の集中によって衝突の危険が生じることが多くなり、量的な操船困難度が高まるとともに、周辺の陸岸や防波堤の存在によって操船水域が減少し、質的な操船困難度にも高まりが生じることが分かる。

また、通航経路ごとに見た評価船舶1隻あたりの操船困難度を一例として図4および図5に示す。図5に示すグラフの縦軸は図4に破線で示す格子の縦軸に相当する位置を示し、横軸は縦軸の位置における評価指標値の積算値を延べ隻数で除した、評価対象船舶1隻あたりの平均的な操船困難度を示している。図5に示した例は評価船舶が100～500総トン未満および20,000総トン以上の船舶の場合を示している。本結果によれば、評価船舶が100～500総トンのような小型船である場合には海域のいずれの部分

図3 操船困難度評価結果

図4 船舶の通航経路(その1)

図5 評価船舶1隻あたりの操船困難度(その1)

図6 船舶の通航経路(その2)

図7 評価船舶1隻あたりの操船困難度(その2)

においても操船困難度はさほど高まらないが、評価船舶が20,000総トンを超えるような大型船になると、特に防波堤付近の海域では船舶交通が集中するとともに、操船水域の制約の影響が現れ、操船困難度が高まる状況が見て取れる。

また、図6に示す通航経路を20,000総トン以上の船舶が岸壁から出港し、他の交通流に合流する際の評価対象船舶1隻あたりの平均的な操船困難度評価指標値を図7に示す。図7の結果によると、評価船舶が岸壁を離れた後、合流点に接近するに従って徐々に操船困難度が高まり、合流点付近では操船困難度がピークに達していることがわかる。

このように、本モデルの適用結果を、例えば、図5および図7に示すような取りまとめを行うことにより、港内における護岸や防波堤の配置による航行の制約状況や、バースと主航路の位置関係から生じる、離岸後における航路への流入操船の難しさなど、実際の港内で操船者が感じるであろう操船上の困難さをうまく表現することが可能であることがわかる。

5. 評価指標値の検討と問題点

操船環境総合化モデルから得られる評価指標値は0から1の間の数値で操船困難度を表現するものであるが、今回のシミュレーションによって得られた平均的な操船困難度は最大で0.7程度となり、このような状況が操船者にとって許容できるものであるか否かについて検討を行う必要がある。

図8はシミュレーション実施中に評価指標値として0.7程度の操船困難度が得られたときの、操作空間の制約状況を一例として示している。この結果によると、

まず、変針操船についてみれば、原針路から右への変針は自船の右舷側に存在する陸岸や防波堤などの障害物により制約を受けるため、選択することが不可能となっている。また、原針路から左への変針は、約20度から25度にかけては浮標に著しく接近してしまうために選択することができず、また、40度以上では、陸岸や防波堤などの障害物のために選択することができない状況を示している。

さらに変速操船について見れば、他船の接近時間内に原速力の約30%以下の速力まで減速することは物理的に不可能であり、また、単なる変速操船のみでは他船との衝突の危険を回避することは不可能であるため、左への変針操船あるいは、変速操船と左への変針操船を組み合わせた操船方法を実施する必要があることを示している。

なお、このような状況が実際に生じた場合に、操船者にとってどの程度許容できるものであるかについては、今後ビジュアル式操船シミュレータ等を用いた実験を行うなどして、本モデルによる評価指標値と、その状況が許容できると考える操船者の許容レベルとの関係を明らかにすることにより、絶対評価が行えるよう研究を進めていく必要がある。

ところで、海上において他船と衝突の危険が生じたとき、操船者は危険を認識した後はその変化傾向を継続的に観察し、操船者ごとの判断基準をもって避航開始時期や避航操船方法を決定するのが一般的である。

この避航操船開始時期に関する判断基準は、2船の相対速力や相対距離、あるいは相対方位の変化率等でモデル化されており⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、交通流シミュレーションにおいては避航操船モデルとして用いられている。

ここで、避航操船開始に関する操船者の行動を、避航操船を行うときに操船者に残された操作の手の内の範囲が他船の接近に伴って狭まり、操船者が感じる避航操作上の困難度がある一定のレベル以上となる以前に避航操船を実施することにより、避航操船に伴う困難さを解消する行動であると考え、このときの避航開始時期を決める操船者の判断基準とは、避航操作上の困難度に対して個々の操船者が持つ許容水準の値に応じて判断され、決断されるとき、操船環境総合化モデルによる操船困難度がどれほどの値の時に操船者は避航操船を開始することになるのかは興味ある問題である。

表2は周囲に障害物のない水域において、速力10ノットで航行する長さ100メートルの自船が、速力8ノットで航行する長さ100メートル、200メートルおよび300メートルの他船と様々な針路交差角で衝突するという条件下で、長澤氏の避航操船モデルによって算出される避航開始時期（2船間の距離）と、そのときの操船困難度を示す操船環境総合化モデルによる評価指標値の関係を示したものである。

図8 操作空間の制約状況の一例

表2 避航操船モデルによる避航開始時期と
操船環境総合化モデルによる操船困難度評価指標値

CASE	他船針路 (deg)	自船長さ 100 m 自船針路 000 deg 自船速力 10 ノット		他船長さ 100 m 自船針路 000 deg 自船速力 10 ノット		他船長さ 200 m 自船針路 000 deg 自船速力 10 ノット		他船長さ 300 m 自船針路 000 deg 自船速力 10 ノット	
		100		200		300		400	
		d	IV	d	IV	d	IV	d	IV
1	000	1135	0.028	1794	0.023	2537	0.022		
2	045	1631	0.215	2579	0.169	3647	0.144		
3	090	2721	0.197	4301	0.165	6082	0.145		
4	135	3753	0.135	5933	0.119	8390	0.104		
5	180	4414	0.076	6980	0.068	9871	0.062		
6	225	4427	0.113	6998	0.102	9897	0.090		
7	270	3692	0.146	5837	0.123	8255	0.104		
8	315	2408	0.138	3808	0.114	5384	0.093		
平均			0.131		0.110		0.096		

d : 避航操船モデルによる避航開始距離

IV : 操船環境総合化モデルによる操船困難度

比較の対象とした避航操船モデルは港外など広い水域におけるモデルであるのに対して、操船環境総合化モデルは防波堤より内側の制約された水域におけるモデルであることを考慮する必要があるが、この結果によれば、避航操船モデルによって算出された避航操船開始時期に対応する操船困難度評価指標値は行き会い・横切り・追いつきなど出会いの状況によって若干異なるものの、おおむね0.1程度の値となる。

一般に避航開始という動作を操船者に許された操作上の手の内の範囲が大きく狭められる前に、変針・変速等の処置により操作上の手の内の範囲を広げて出会いの困難感を解消する動作と考えれば、ここに適用した操船困難度指標値との対応のなかで避航開始時期を求めていくという方向性は、大胆型から慎重型までの操船者個人個人の操船特性をわかりやすく表現できるという意味でも合理的であると思われる。

今後、この点からの検討することによっても、評価指標値に対する操船者の許容基準レベルの策定問題にアプローチする予定である。

6. むすび

本稿では港内水域を対象とする交通流シミュレーションを実施し、操船環境総合化モデルを用いて新しい港湾計画の実施がその水域を航行する船舶の困難さに与える影響について評価を行うことにより、評価モデルとしての適用可能性と問題点の検討を行った。

その結果、港内における護岸や防波堤の配置による航行の制約状況や、離岸後における航路への流入操船の難しさなど、実際の港内で操船者が感じるであろう操船上の困難さをうまく表現することができ、本モデルを港湾計画の評価に適用することの可能性が確認できた。

しかしながら、現時点で本モデルは絶対評価を行うための基準を有しておらず、ある操船困難度評価指標値が得られるような状況が生じたとき、いかにどの操船者がその状況を許容できるのか、といった対応関係は得られていない。このため、実際に港湾計画等に適用する場合には、計画の実施前と実施後というように、地形条件、交通条件等を変えた複数のシミュレーションケースを設定し、相対評価により判断を行う必要があるが、今後はビジュアル式操船シミュレータを用いた実験を行うなどして、本モデルを用いた絶対評価基準の策定にアプローチする予定である。

また、本モデルによる評価指標値を目安に避航操船時期を決定するという避航操船モデルへの応用の可能性も伺えたため、今後この方向性についても検討していきたい。

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) 井上欣三・宇佐美 茂・世良 亘：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—, 日本航海学会論文集, 第91号, pp.213~220, 平成6年9月。
- (3) 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。
- (4) 株式会社郵船海洋科学：平成3年度東京港臨海道路船舶航行実態調査報告書。
- (5) 長澤 明：避航を考慮した海上交通シミュレーション, 日本航海学会誌, 第80号, pp.28~34, 昭和59年6月。
- (6) 岩崎寛希・原 潔：あいまい推論を用いた避航操船モデル, 日本航海学会論文集, 第75号, pp.69~77, 昭和61年9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

中村 紳也(株式会社郵船海洋科学)：興味深い講演ありがとうございます。下記の点についてご教示願います。

- (1) 課題で示された「許容できる困難度の程度」を、操船シミュレータ実験との対応で求めることを考

えた場合には、シミュレーションにおいて避航操船モデルを考慮した結果に、ご提案の評価モデルを適用した方が求めやすいのではないのでしょうか。

(2) 評価結果で示された操船困難度は衝突状況をも含む平均値と理解しますが、操船シミュレータ実験との対応においても避航操船を行わずに実験を行うのでしょうか。

(3) ご提案の評価モデルを避航操船を行った結果に適用することはいかがでしょうか。

宇佐美 茂 (ナビテコ株式会社)：以下、ご質問の順にお答えいたします。

(1) ここで述べた「操船者にとって許容できる困難度の程度と操船シミュレータ実験との対応」とは、他船との衝突までに時々刻々変化する評価指標値が各時間断面において、それぞれの程度の許容レベルに対応するのかについて明らかにすることを意味しています。

ここで、避航操船モデルを考慮した場合のシミュレーションとの対応を考えると、避航動作を開始した時点で衝突の危険が解消されるため操船困難度が0となってしまう、その後はシミュレータ実験の結果と対応させるべき評価指標値が存在しなくなります。

本モデルの使用目的は、ある水域に潜在する危険や負担の数値化であるので、衝突直前の0.8や0.9といった潜在的な困難度も考慮する必要があり、やはり、避航操船を考慮しないシミュレーション結果と、操船者の許容レベルを対応づけることが適当であると考えます。

(2) 本モデルによる評価指標値と操船者の許容基準との対応関係を求める場合には、シミュレータ実験で避航操船を実施すると、それ以後は衝突の危険が解消され、操船者の主観的評価が得られなくなるため、避航を行うシミュレータ実験結果と対応させることは不适当であると考えられます。

確かに、評価結果としてメッシュで示した操船困難度は、衝突という困難度1の状況を含み得るものですが、その反面、非常に困難度の低い状況も含めた、ある分布をなす評価指標値群を平均化することにより代表値として示したものであり、その代表値とその値に対する操船者の許容レベルを対応づけることは不自然ではないと考えます。

(3) 避航を模擬しないシミュレーションでは、ある水域に潜在する避航操船上の危険や負担を抽出することができるという利点がある反面、シミュレーションの結果から得られる船舶の航跡が、現実には避航を行っている実際の船舶の航跡と異なる場合があります。

そこで、シミュレーションで船舶の挙動を現実に近い航跡として詳細に再現することが必要とされるような場合には、避航操船を組み込んだシミュレーションを行うことにより船舶の挙動を求めながら、一方では、その場に潜在する操船困難度を評価するためには、他船との出会いが生じた段階から避航を模擬しないシミュレーションを別途並行して行うことも可能であると考えられます。