海上交通安全評価のためのガイドライン策定に 関する研究－Ⅲ．

－困難性評価とヒューマンファクター－

井上 欣三*・川瀬雅勇 己**

安田 克**・原 大地**

Guidelines to Assess the Safety of Marine Traffic－Ⅲ． －Evaluation of Shiphandling Difficulty and the Human Factors－

Kinzo INOUE, Masayuki KAWASE,
Masaru YASUDA and Daichi HARA

Abstract

To compare the shiphandling difficulties of ports and harbours, human factors must be excluded. The reason is that the stress which is imposed on the mariner may be concealed by mixing individual differences based on the mariner's techniques, skills and personality in the shiphandling result.

In the present paper, the concept of "Latent Environmental Stress" is introduced to avoid the influence of the individual differences of mariners and to guarantee the universality of the results in evaluating the shiphandling difficulty. The latent environmental stress is defined as the stress value found by the application of a standardized shiphandling process as follows. The own vessel proceeds along a fixed course at a fixed speed. And it does not take any action to avoid collision with other ships.

1. はじめに

海上における船舶交通の安全確保の施策を検討するためには、【船－操船者－環境】の連環関係で構成される船舶運航システムがどれほど好ましいレベルにあるかを評価することが重要である。この一連の研究においては、自船を取り巻く周辺環境が操船者にどれほどの困難を課し、そして、そこで実行される操船のプロセスにおいて操船者がどれほどの安全を確保し得るかを、総合的に判断できるシステムティックな定量評価手法を確立することを目的としている。

前報では、海上における船舶交通がどれほど好ましいレベルにあるかを検討するためには、操船者を取り巻く周辺環境が課す困難性と当該条件下で操船者が実行する操船過程に潜む危険性を互いに独立な評価項目として扱い、それぞれの両側面から定量評価することの必然性を解いた。この前提にたつて、第 1 報では、周辺環境が操船の困難性の面において操船者に課す負荷の大きさを環境ストレス値 (Environmental Stress, ES 値) を指標として定量表現するためのモデル (Environmental Stress Model, 環境ストレスモデル) を提示し、そして、第 2 報では、潜在的操船水域 (Potential Area of Water, PAW) の考え方を利

* 正会員 神戸商船大学 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町5丁目1-1)

**正会員 ㈱日本海洋科学 (〒140-0004 東京都品川区南品川2-3-6)

用して操船の実行過程に潜む危険性を定量表現するためのモデルを提示した。⁽¹⁾⁽²⁾

与えられた環境下で与えられた性能の船を操船するとき、操船者はその船の性能に起因する操縦上の困難さや周辺環境が課す行動制約上の困難さをできるだけ吸収するように努める。確かにこのことは【船—操船者—環境】の連環関係で構成される船舶運航システムにおいて操船者が果たすべき役割ではあるが、与えられた環境条件が操船者に課す困難性を定量表現する際にはこの点が難点となる。つまり、自らに課せられる負荷を操船者自身が和らげる努力によって、本来その環境が操船者に課すべき負荷の大きさが隠されるからである。さらに、操船者個々の技術レベルによって吸収される負荷の量もまちまちであることも問題を難しくしている。

そこで、この第3報では、自船を取り巻く周辺環境が操船者に課す困難性の問題に再度着目し、操船者による操船の実行という人間技術要素を考慮した時の困難性の評価のあり方についてその考え方の指針を示すとともに、このガイドライン適用のケーススタディーとして国内の2大港湾を対象とした困難性比較を取り上げる。

2. 操船者による困難性の吸収

2.1 潜在環境負荷と残存環境負荷

一般に、与えられた環境は同じであってもそこで実行される操船の内容は一律ではない。同じ環境負荷の下でも操船者ごとの固有の位置取り、コース取り、速力変更、他船避航の方法等によって操船の結果は異なる。このように【船—操船者—環境】の連環関係で構成される船舶運航システムにおいては、操船者という人間技術要素が関わることによって、本来その環境が操船者に課す負荷の大きさは操船者の技術レベルに応じて吸収され、そして、この吸収される負荷の量は個々の操船者によってまちまちである。

このことは、操船者を取り巻く周辺環境が課す困難性については、操船の結果だけに着目したのでは、操船者の技量に応じて吸収された後の負荷の大きさは明らかとなるが、本来その環境が課す負荷の大きさを見失うことにもなりかねないことを意味している。

このように操船者という人間技術要素がシステムの好ましきレベルを左右する場合、そのシステムが含む環境要素が操船者に課す負荷の大きさを評価するためには、

- ① 本来その環境が課す負荷の大きさ
- ② 操船者による負荷吸収の大きさ
- ③ 操船の結果なお残る負荷の大きさ

を、それぞれ個別に定量表現できることが望まれる。ここでは、本来その環境が操船の困難さの面において課す負荷の大きさを【潜在環境負荷】、操船の結果なお残る負荷の大きさを【残存環境負荷】、操船者による負荷吸収の大きさを【負荷吸収量】と呼ぶ。

2.2 潜在環境負荷の算定

海上における船舶交通がどれほど困難な環境下におかれているかを知ろうとすると、潜在環境負荷の量を定量表現できてはじめて、評価対象水域の航行環境評価が可能となり、また、各港湾間または各狭水道間の航行環境の比較評価などが可能となる。なぜなら、残存環境負荷には各操船者ごとの技術レベルや個性によるばらつきが含まれ、操船結果のサンプルデータの数が少ない場合には結果の評価に普遍性の面で問題が残るからである。

しかし、実際には操船者の技術レベルや個性に応じて負荷吸収がなされた後の操船結果に評価のものを当てることは容易であるが、操船者による操船の実行なしには本来その環境が課す負荷の大きさを測ることは難しい。そこで、ここでは、操船結果に普遍性を持たせることができるように、操船者ごとの技術や個性などヒューマンファクターをできるだけ排除した操船方法のもとで、評価対象水域が包含する潜在的な環境負荷の大きさを定量化することを試みた。

基本的には、図1に示すように、【船—操船者—環境】の相互干渉が存在するシステムにおいて【船】と【操船者】の相互関連のなかで実行される操船条件を固定化することにより、その航行過程において周辺環境が操船者に課す潜在的な環境負荷を定量評価する考え方である。具体的には、

- ① 評価対象水域の自然外力条件、地形制約条件、交通輻輳条件等を設定する。

- ②評価対象船としての自船船型を設定する。
- ③標準操船法を設定する。つまり、標準航行経路、標準航行速力を設定し、自船は所定のルート上を所定の速力で航行するものとして、操船条件を固定化する。なお、自船は航行中に他船と出会っても避航を行わない。
- ④与えられた条件下で、操船技術や操船者の個性などヒューマファクターをあらかじめ排除した操船条件の下で自船を航行させる。このとき当該環境が自船に課す負荷の大きさを環境ストレスモデルを適用して定量化する。

ここでの考え方は、与えられた操船環境と交通環境のもとで、自船がいかなる避航動作も行わずに所定のルート上を所定の速力で航行したとして求めた環境ストレス値は、その環境が本来的に操船者に課す負荷の大きさを与えるとするものであるが、ここに、操船条件を固定化する際に他船避航を行わないとしたことは、避航後においてその出会いが本来課したであろう負荷の大きさに関する情報が隠されてしまうことを避けることを意図したものである。なお、この評価にはファストタイムの海上交通流シミュレーション手法を用いるのが实际的である。

2.3 残存環境負荷と負荷吸収量の算定

評価対象水域が包含する潜在環境負荷のもとで操船者が操船を実行し、その結果残存環境負荷がどれほど残るかを定量化することによって、その水域が操船の困難性の面において許容できる状態にあるかどうかの判断材料を得ることができる。また、操船者が周辺の視界を見ながらダイナミックに操船する過程で潜在環境負荷がどれだけ吸収されたかを知ることによってその操船者の技量に関する情報を得ることができる。

残存環境負荷は、基本的には、図1に示すように、【船－操船者－環境】の相互関連のなかで操船者が臨機の処置により自船を操縦し、結果としてなお残る負荷を環境ストレスモデルを適用して定量化するものである。具体的には、

- ①評価対象水域の自然外力条件、地形制約条件、交通輻輳条件等を設定する。
- ②評価対象船としての自船船型、要目、性能等を設定する。
- ③操船者の判断による位置取り、コース取り、速力変更、他船の避航等を行い臨機応変の操船を実行する。
- ④与えられた条件下で実行された操船の結果に対し環境ストレスモデルを適用して、残存環境負荷の大きさを定量化する。

なお、負荷吸収量は、潜在環境負荷と残存環境負荷の差に着目して定量化する。これらの評価にはリアルタイムの実験操船が必要となるためビジュアル操船シミュレータの利用が有効であるが、実海域での操船結果にも適用は可能である。

3. 神戸港と大阪港における潜在環境負荷

3.1 計算条件

ケーススタディーとして国内の主要港湾における潜在環境負荷を比較することを試みる。対象港湾として大阪湾に隣接する神戸港と大阪港の2大港湾を選んだ。両港とも交通輻輳がはげしく、神戸港では早朝の入港ラッシュ時には1時間に約65隻の船舶が航行し、大阪港ではその2倍の船舶が集中して航行する。

図2は、これらの港湾の地形を示し、そこには、自船の標準航行経路が示されている。自船は、この標準航行経路上を標準航行速力で航行し、その間、他船に対し避航は行わない。このように操船者のヒュー

図1 潜在環境負荷、残存環境負荷の求め方

マンファクターをあらかじめ排除した上で、神戸港、大阪港の航行環境が課す潜在環境負荷の大きさを環境ストレスモデルを適用して求めた。このときの自船の航行経路と速力減速パターンは海上交通観測をもとに標準化した。また、両港とも港外からバースまでの距離は約9,000mであるが、この間、外力の影響は存在しないものと仮

定した。計算に際しては、自船の大きさは、300GT, 3,000GT, 10,000GTの3種類を設定した。そして、これらの船が航行するときの港内の船舶交通流条件は、入港船で混雑する早朝ラッシュ時間帯における海上交通観測から得られたデータを基にモデル化した。

以上の計算条件下で海上交通流シミュレーションを実行し、コンピュータ上に再現された交通流の中をおのおのの大きさの自船ごとに50航走させた。各航行においては、先に発生した自船がバースに到着した後、次の自船を航行させたので、各航行ごとに自船が遭遇する交通環境は異なる。

3.2 計算結果

自船の各航行ごとの操船過程に対し環境ストレスモデルを適用し、これから得られたES値の出力結果の平均値を距離ベースに求めて、潜在環境負荷の値を求めた。図3は、神戸港と大阪港における地形環境に起因する潜在環境負荷(ES_L)、交通環境に起因する潜在環境負荷(ES_S)、総合化された潜在環境負荷(ES_A)の値を示している。

両港ともに、自船が防波堤の入り口(神戸港においては5,000mの点、大阪港においては6,000mの点)を通過する直前から地形の制約に起因してES_L値が増加している。ここに、地形制約に起因する負荷を表現するES_L値の出力は、自船の船型にかかわらずほぼ同様の値を示している。これには、船型が大きいほど速力を低速に落として航行することにより地形の制約が課す負荷を許容可能な範囲内にまで軽減しようとする操船者の意識が反映されているものと思われる。

一方、交通輻輳に起因する負荷については、神戸港においては4,000mの点付近でES_S値が増大し、大阪港においては港内水路全域にわたって大きなES_S値が継続して課される様子が見られる。そして、このとき課される負荷の大きさは船型が大きいほど大きい。

3.3 神戸港と大阪港における潜在環境負荷の比較

地理的に制約された狭い水路において多くの他船と出会うとき、操船者には大きな負荷が課される。したがって、それぞれの港の潜在環境負荷の比較においては、ES_Aの値が重要な意味をもつ。図4は、図3に示したES_Aの計算結果をもとに、4つのランクに分類されたそれぞれの負荷ランクの出現頻度を各シナリオについて比較

図2 評価対象港湾

図3 潜在環境負荷の算定結果

したものである。

ここに負荷ランクとは、環境ストレス値の0から500を“negligible”，500から750を“marginal”，750から900を“critical”，900以上を“catastrophic”のように4つに分類したものである。なお、この分類の中で“critical”と“catastrophic”の負荷ランクに落ちるストレス値750以上は、操船者の許容感からみれば“unacceptable”に属する。

図4をみると、一見して、直感的に、大阪港の方が潜在環境負荷は高いとみることができるが、この違いをもっと明示的に比較するために、図4における“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージと“negligible ($ES_A \leq 500$)”のパーセンテージに着目して、これをRating Table上にプロットした結果を図5に示す。

図5に示した操船困難性を比較するために用いるRating Tableは、計算された潜在環境負荷の値に含まれる“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージと“negligible ($ES_A \leq 500$)”のパーセンテージの組み合わせを基に区分されている。潜在環境負荷の計算結果における“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”の発生頻度の高さは、それが高いほどより大きな操船の困難性を示唆し、負荷ランク“negligible”に落ちる ES_A 値500以下の発生頻度の高さは、それが高いほどその環境下での操船の容易さを示唆する。このように潜在環境負荷の値が示す操船困難性の水準は、“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージと“negligible ($ES_A \leq 500$)”のパーセンテージの組み合わせから判断することができる。

すなわち、“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージが高ければ高いほど操船困難性は高く、“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージが低ければ低いほど操船困難性は低い。一方、同じ“unacceptable ($ES_A \geq 750$)”のパーセンテージの条件でも、“negligible ($ES_A \leq 500$)”が多く含まれる方が操船困難

図4 負荷ランクの出現頻度

図5 潜在環境負荷の比較

性は低いと言える。

図5をみることにより、2つの港湾における潜在環境負荷の違いから、これらの港湾の地形的、交通的環境条件が操船者に課す負荷を操船の困難性の観点から比較することができる。早朝の入港ラッシュ時における交通輻輳条件のもとでは、大阪港での操船の困難性は神戸港に比べるとかなり困難を強いられる状況にあることがわかる。また、操船の困難性の面から操船者に課されるストレスの数値指標の対応からみれば、大阪港で300GTの船を操船するときの困難性は、神戸港において10,000GTの船を操船するときの困難性に匹敵するものであることがわかる。

4. 神戸港と大阪港における残存環境負荷

4.1 ビジュアル操船シミュレータによる操船の実行

与えられた環境条件が課す潜在環境負荷に対し操船者自身が実際の操船実行を通じてその負荷を吸収するとき、その結果に着目して得られる評価値は操船者個々の技術や個性などのヒューマンファクターが加味されたものとなる。このように個人のフィルターを介した評価値は個々の操船者の技量を明示的に評価する貴重なデータであるとともに、これらのデータに着目することが操船者のヒューマンファクターを分析する糸口ともなる。

ここでは、神戸港と大阪港を対象にしたビジュアル操船シミュレータによる操船実験⁽³⁾を通じて、これらの港の環境条件が課す潜在環境負荷に対して個々の操船者が実際どれほどの負荷を吸収し得るか、そして、その結果、残存環境負荷がどれほどの値になるのかを示す。

操船シミュレータ実験に際しては、対象水域、航行ルート、外力条件等は第3章に示した条件をそのまま踏襲した。ただし、交通条件の設定については、第3章において実行した入港船で混雑する早朝ラッシュ時間帯における海上交通流シミュレーションの中で発生した最も困難な出会い状況を切り出し、この状況を操船シミュレータ実験のシナリオ場面として設定した。

被験者が操船する自船の船型は3,000GTの一般貨物船とし、被験者は6名とした。6名の被験者は神戸港と大阪港での操船を1回ずつ行った。操船にあたっては、被験者は与えられた地形状況、交通状況に応じて臨機の操船を行い、航行中は自由に位置取り、コース取り、速力設定を行い、必要な避航操船を実行した。ただし、タグは1隻使用可能としたが、いずれの被験者もバース前面までタグは使用しなかった。

被験者は6名共、この大きさの船を常時操船する内航船の船長であるが、操船シミュレータでの操船は初めてであったので、本実験前に慣熟練習を行った。スラローム操船による本船の運動性能把握、バーシング操船による距離感把握や機器操作練習等がその内容である。なお、実験には神戸商船大学の操船シミュレータを使用した。

4.2 残存環境負荷の算定結果

図6は、6名の被験者のそれぞれの操船過程に環境ストレスモデルを適用し、残存環境負荷を求めた結果を示している。図では、上から、ES_L、ES_S、ES_Aの順に距離系列出力を6名分重ね描きしている。

航行ルート上における位置取り、コース取り、速力設定については6人共あまり大きな差がなかったことから、ES_L値にはほとん

図6 残存環境負荷の算定結果

ど違いがみられない。しかし、他船の避航については操船者ごとに避航の時機、避航の大きさなど対応が異なっていたので、ESs値には操船者ごとに大きな違いが現れている。与えられた環境が本来課す負荷に対して操船者が臨機の操船を通じて負荷を吸収した結果、なお残る環境負荷については、ES_A値の比較からわかるように大阪港の方が残存環境負荷が大きい様子が伺える。

図7は、これら被験者別ES_A値の出力を、各負荷ランクの出現頻度で整理したものである。被験者ごとに個人差はあるが、一見して大阪港の方が、操船者の許容感からみれば“unacceptable”に属する“critical”と“catastrophic”の負荷ランクに落ちるストレス値750以上の割合は高く、逆に、環境ストレス値の500以下、つまり“negligible”の負荷ランクの出現割合は小さいことが分かる。

4.3 操船者による負荷吸収とヒューマンファクター

図8は、第3章でも用いたRating Table上に各被験者ごとの残存環境負荷を神戸港の場合と大阪港の場合について示したものである。○印は神戸港、□印は大阪港についてのものである。なお、△印は操船シミュレータ実験に設定したシナリオの潜在環境負荷の大きさを示している。

これを見てわかるように、6人の被験者に関する残存環境負荷の平均値を+印で示してはいるが、同じ潜在環境負荷の下でも操船者ごとに負荷吸収量は異なり広い範囲にばらつく。これが操船者の技量や個性、または、経験や慣れといったものに左右されるヒューマンファクターの現れである。

海上における船舶交通がどれほど困難な環境下におかれているかを知ろうとすると、実際の操船者による操船の実行を通じて評価のものさしを当てると、ここに見たように操船者のヒューマンファクターに基づく結果のばらつきが存在する。評価に際しては評価結果に普遍性を持たせることが必要であるが、操船者という人間要素を評価システムに組み込んで評価を行うときには、評価結果には操船者ごとの技術レベルや個性によるばらつきが必然的に含まれる。これに対応するには、サンプルデータの数できるだけ多くして、結果のばらつきの範囲にも着目して分析する姿勢が重要であろう。

5. むすび

与えられた環境条件が操船者に課す困難性を定量表現する際には、本来その環境が課す負荷の大きさ(潜在環境負荷)、操船者による負荷吸収の大きさ(負荷吸収量)、操船の結果なお残る負荷の大きさ(残存環境負荷)を個別に定量表現することが望ましい。

本研究では、これらの諸量を定量化する方法について述べ、この方法の適用例として神戸港と大阪港を

図7 負荷ランクの出現頻度

図8 操船者による負荷吸収のばらつき

対象とした港内航行の困難性比較をケーススタディーした。その結果、

- (1) 海上における船舶交通がどれほど困難な環境下におかれているかを知ろうとすると、潜在環境負荷の量を定量表現できてはじめて、評価対象水域の航行環境評価が可能となり、また、各港湾間または各狭水道間の航行環境の比較評価などが可能となること。
- (2) 与えられた環境条件が課す潜在環境負荷に対し操船者自身が実際の操船実行を通じてその負荷を吸収するとき、その結果に着目して得られる残存環境負荷には操船者個々の技術や個性などのヒューマンファクターが加味されたものとなること。
- (3) 個人のフィルターを介した評価値は個々の操船者の技量を明示的に評価する貴重なデータであるとともに、これらのデータに着目することが操船者のヒューマンファクターを分析する糸口ともなるが、評価結果に普遍性を持たせるためにはサンプルデータをできるだけ多くして、結果のばらつきの範囲にも着目して分析する姿勢が重要であること、などの諸点を指摘した。

参 考 文 献

- (1) 井上・増田・世良：海上交通安全評価のための技術的ガイドライン策定に関する研究－Ⅰ．－環境負荷の概念に基づく操船の困難性評価－，日本航海学会論文集，第98号，平成10年3月。
- (2) 井上・世良・増田：海上交通安全評価のための技術的ガイドライン策定に関する研究－Ⅱ．－潜在的操船水域の概念に基づく操船の安全性評価－，日本航海学会論文集，第99号，平成10年9月。
- (3) 入出港等航行援助業務に関する調査報告書，平成10年3月，(株)日本海難防止協会。

質 疑 応 答

長岡 栄(電子航法研究所)：図5のグラフの意味をもう少し説明してください。

井上欣三：図5に示しました操船困難性を比較するために用いるRating Tableは、計算された環境ストレスの値に含まれる“unacceptable ($ES \geq 750$)”のパーセンテージと“negligible ($ES \leq 500$)”のパーセンテージの組み合わせを基に区分されています。環境ストレス値の計算結果における“unacceptable ($ES \geq 750$)”の発生頻度の高さは、それが高いほどより大きな操船の困難性を示唆し、負荷ランク“negligible”に落ちるES値500以下の発生頻度の高さは、それが高いほどその環境下での操船の容易さを示唆します。ここでは、与えられた環境下での操船困難性の水準は、一連の時系列または距離系列の出力結果に含まれる“unacceptable ($ES \geq 750$)”のパーセンテージと“negligible ($ES \leq 500$)”のパーセンテージの組み合わせを代表値として判断することができると考えました。すなわち、“unacceptable ($ES \geq 750$)”のパーセンテージが高ければ高いほど操船困難性は高く、“unacceptable ($ES \geq 750$)”のパーセンテージが低ければ低いほど操船困難性は低い、一方、同じ“unacceptable ($ES \geq 750$)”のパーセンテージの条件でも、“negligible ($ES \leq 500$)”が多く含まれる方が操船困難性は低いと言えます。そして、図5をみることにより、複数の場におけるプロット点の違いから、それらの環境の地形的、交通的環境条件が操船者に課す負荷を操船の困難性の観点から比較することができます。