橋脚下航行時における操縦負荷の 増加と操船困難性の軽減の関係について

井上 欣三*・成 兪昶**・高橋 浩子**

Relationship between maneuvering stress and environmental difficulty when passing under a bridge

Kinzo INOUE, Yuchang SEONG and Hiroko TAKAHASHI

Abstract

A ship operator takes some actions of slowdown engine and altering course, when traffic becomes complicated and ship maneuvers under hard condition such as passing under a bridge. In such a navigation process, operational actions such as slowdown engine and altering course might be reduce difficulties on navigation or collision avoidance maneuver against other ship and obstacle.

In this research, paying attention to operational load(maneuvering stress) given by these maneuvering actions of slowdown engine and altering course, it was examined whether the quantity of load was expressed by time delay as an index. And by conducting experiment of ship handling simulator, it was verified that how much difficulty of navigation has changed depending the time of delay, as compensation of action of slowdown engine and altering course.

Keywords : *marine traffic engineering, maneuvering stress, environmental difficulty, multi regression, environmental stress model*

キーワード: 海上交通工学, 操縦負荷, 操船困難性, 重回帰分析, 環境ストレスモデル

1. はじめに

操船者は、橋脚付近を通過するときや、橋脚付近で交通が錯綜する際に、減速や迂回などの操縦行動をとる。橋脚を目前にして橋脚に至るまでの操船過程において、操船者がとる減速もしくは迂回といった操縦行動は、たいていの場合橋脚間通過に対する航行上の困難性を和らげたり、橋脚付近で生じる他船との航行上の交錯を未然に回避するための行動と見ることができる。つまり、これは、これから遭遇する地形制約や他船輻輳などに起因する負荷をあらかじめ回避するための行動であり、「主機や舵などを使用することにより課される操縦行動に伴う負荷を受け入れ、地形制約や他船輻輳などにより課される操船困難性を事前に減少させる行動」と理解すると

分かりやすい。

本研究では、主機および舵を使用して減速や迂回などの操縦行動をとることに伴う操作上の負荷に着目し、このような操縦行動がどれほどの航行時間に影響を与えるかを定量表現することを試みた。そして、この迂回・減速の代償としての航行時間の遅延・延長の大きさが、操船の困難性をどの程度軽減するかについて、操船シミュレータ実験を行って検証した。

2. 操船シミュレータ実験

2. 1 操船シミュレータ

実験には、Fig.1 に示す神戸大学大学院海事科学研究科井上研究室所有の操船シミュレータを使用し

* 正会員 神戸大学大学院 海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科 海事科学専攻 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

Fig. 1 Ship handling simulator

た。このシミュレータは、高規格の描画ソフトのもとで臨場感ある映像が半径5メートルの連続円筒スクリーンに投影され、また、シミュレーションを中断することなく即座にブリッジセンターシミュレーション (Fig.1 の左) とウイングサイドシミュレーション (Fig.1 の右) の切り替えが可能な機能を備えている。

2. 2 航行海域

実験に際しシナリオに設定した海域は紀淡海峡とした。紀淡海峡は、Fig.2 に示すように、大阪湾の南入口に位置し、この海域に海上架橋が建設されると想定し、水道の最狭部に交通流に対し直角に橋脚を配置した。橋脚配置間隔は 1,000m、1,500m、2,000mの3種、橋台直径は80mとした。

2. 3 他船交通流

紀淡海峡には他の国内の長大架橋のように海上交通安全法上の航路は設定されていない。多くの船舶は右側航行の行政指導にしたがって航行するが、なかには海峡部を斜航する船舶もある。この実験では、

Fig.2 Pier arrangement at Kitan straight

Fig.3 Condition of traffic rush (Case of 1000m, span of bridge)

過去の実態観測データ⁽¹⁾における船舶航行経路を参考にして、他船交通流を設定した。Fig.3にその一例を示す。

2. 4 自船条件

操船対象とする自船は、Fig.4 に示すような6000TEU型コンテナ船 (L=318.0m、B=42.80m) とし、架橋予定位置の南方約7マイルから初期速力17.3ノット (ハーバーフルアヘッド) で北航するという設定で実験を開始した。

2. 5 被験者

紀淡海峡の通峡経験豊富な水先人及び船長、航海士の経験者により、のべ27ケースの実験を実施した。

Fig. 4 Own ship (6000 TEU type container ship)

3. 航行時間と主機・舵使用率に着目した重回帰分析

Fig. 5 は、航行時間の延長(delay)と短縮(ahead)を被説明変数、主機使用率および舵使用率の大きさを説明変数とする重回帰分析の概念図を示している。主機を減速に使用して速度を落とすことにより航行時間は増加し遅れ(delay)が生じる。また、主機を増速に使用すると航行時間は短くなり早まり(ahead)が生じる。そして、同じ主機使用量のもとでも舵を使って迂回ルートをとると航行所要時間は増加する、という関係を表現している。

ここに、主機使用率とは、主機を全操船区間にわたって Full Ahead で使用した場合を 1.00 として、評価対象操船中に主機の出力をどれほどに減じたかを使用推力の時間的割合をもって主機使用率と定義する。

$$E = \{ \int r(t) dt / R \cdot \tau \} \quad \cdots \cdots (1)$$

E : 主機使用率, $r(t)$: 推力, t : 時間, R : 最大推力,
 τ : 操船時間

舵使用率とは、全操船区間中、舵角を 35 度 (Hard over) に取り続けた場合を 1.00 として、評価対象操船中にどれほどの舵角を取ったかを使用舵角の時間的割合をもって舵使用率と定義する。

$$D = \{ \int |\delta(t)| dt / \Delta \cdot \tau \} \quad \cdots \cdots (2)$$

D : 舵使用率, $\delta(t)$: 舵角, t : 時間, Δ : 最大舵角,
 τ : 操船時間

また、航行時間の延長(delay)と短縮(ahead)については、途中で速力の増減、舵による変針がない場合の橋までの到達時間 S を基準として、基準時間に対する実際の所要時間 τ の差をもって航行時間の延長(delay)と短縮(ahead)を定義する。

Fig.5 Concept of multi-regression (Engine,Rudder,Time)

$$\tau - S > 0 : \text{航行時間の延長(delay)} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\tau - S < 0 : \text{航行時間の短縮(ahead)} \quad \cdots \cdots (4)$$

操船シミュレータ実験から得られたデータをもとに、減速(speed down)や増速(speed up)など主機使用および舵による針路変更の結果としてもたらされる航行時間の延長(delay)や短縮(ahead)の関係を定量的に説明するため、航行時間の延長(delay)と短縮(ahead)を被説明変数、主機使用率および舵使用率の大きさを説明変数とする重回帰分析⁽²⁾をおこなった。

27 ケースの実験結果に対し重回帰分析を行って得られた重回帰式を以下に示す。なお、重相関係数は 0.943 となり、極めて良好な相関を示している。

$$[\tau - S] = 4.12 - 1524.75 [E/0.74 - 1.00] + 898.06 [D] \quad \cdots \cdots (5)$$

Fig. 6 は、横軸に初期速力 17.3 ノット (ハーバーフルアヘッド) の推力を基準としたときの主機使用の基準化値を、縦軸に航行時間の遅延、短縮をとって、舵使用率をパラメータに重回帰分析の結果とともにすべてのデータの散布図を示したものである。

上記結果が示すように、橋脚間隔や交通輻輳状態などの環境条件が異なる条件下で、本実験に使用した供試船に関して、橋脚に向けて航行する間に操船者が使用した主機や舵の操作量の多さと航行時間の延長(delay)または短縮(ahead)の量に関係づける推定式を得ることができた。

4. 航行時間と環境ストレス値の関係

4. 1 潜在環境ストレス値

操船者は、橋脚に向かって航行する際に周辺他船の集中の様子や動向から、橋脚付近での交通混雑を予測する。そして、操船者は、何もしないでそのま

Fig.6 Multi relation of engine, rudder and time

ま直進したときにもたらされる負荷、いわゆる潜在環境ストレス⁽³⁾を回避しようとして迂回や減速の措置をとる。その代償として生じるのが航行時間の延長(delay)であり、結果として得るものが負荷の軽減である。

本研究では、1,000m、1,500m、2,000mの3種の橋脚間隔のシナリオを作成し、操船シミュレータ実験を実施した。ここではまず、各シナリオが、操船者が何もしないでそのまま直進したときに操船者にどれほどの操船困難性をもたらすかを、潜在環境ストレス値⁽³⁾を求めて定量的に明らかにする。

環境ストレスには、地形や障害物の存在が自船の行動を制約することに起因する操船環境ストレスと他船の交通輻輳が自船の行動を制約することに起因する交通環境ストレス、そして、地形的に行動が制約されるなかで交通輻輳に遭遇するなどこれらが同時に影響する状態を総合化した総合環境ストレスがある⁽⁴⁾。ここでは総合環境ストレス値に焦点をあて、実験開始位置から架橋通過までの間、自船が所定の進路をそのまま直進するとしたときに操船者に課されるであろうストレス値を各シナリオについて計算した。その結果を Table 1 にとりまとめている。

4. 2 迂回・減速の代償としての航行時間の遅延・延長と負荷の軽減

合計 27 ケースの操船シミュレータ実験の結果から、各操船者がとった迂回・減速の代償として得た負荷の軽減を定量的に表現するため、各実験結果を対象に実験開始位置から架橋通過までの間に操船者に課された総合環境ストレス値を計算した。

Fig.7 は、迂回や減速などの措置の代償として生じた航行時間の延長(delay)とその結果もたらされる操船困難性の大きさを表現する総合環境ストレス値の関係をプロットしたものである。なお、縦軸の総合環境ストレス値は、許容の限界を示す値としての 750 以上となる状態の出現割合($P[E S_A > 750]$)で表している。

いずれの結果も航行時間の増減と環境ストレス値出力の間には明らかに相関性が見受けられ、このことより、橋脚配置や交通輻輳からもたらされる負荷を軽減する際、支払うべき代償としての航行時間の増加と、得ることの出来る負荷の軽減、との関係を定量的に推定することが可能となった。

Table.1 Experimental data

	Span of brige	Time to bridge τ (Sec.)	$\tau - S$	$E/0.74 - 1.00$	D	$ES_A \geq 500$	$ES_A \geq 750$	$ES_A > 750 / L - ES_A > 750$
1	1000	1648	233	-0.122	0.008	73.9	39.3	0.542
2	1000	1815	400	-0.215	0.057	69.4	29.0	0.400
3	1000	1519	104	-0.057	0.088	86.6	60.0	0.828
4	1000	1464	49	-0.001	0.053	85.6	71.1	0.981
5	1000	1898	483	-0.274	0.029	49.4	26.4	0.364
6	1000	1595	180	-0.084	0.061	95.2	66.8	0.921
7	1000	1557	142	-0.001	0.148	86.4	50.1	0.691
8	1000	1295	-120	0.209	0.091	83.7	74.2	1.023
9	1000	1504	89	-0.026	0.071	90.6	72.5	1.000
10	1500	1661	246	-0.137	0.009	100.0	61.8	0.814
11	1500	2144	729	-0.339	0.112	64.2	34.5	0.455
12	1500	1630	215	-0.062	0.133	100.0	74.2	0.978
13	1500	1490	75	-0.001	0.074	100.0	73.2	0.964
14	1500	1730	315	-0.179	0.040	100.0	50.7	0.668
15	1500	1656	241	-0.155	0.041	100.0	60.4	0.796
16	1500	1572	157	-0.040	0.109	100.0	76.0	1.001
17	1500	1458	43	-0.001	0.059	100.0	75.2	0.991
18	1500	1646	231	-0.152	0.094	100.0	55.2	0.727
19	2000	1740	325	-0.191	0.027	48.9	31.8	0.398
20	2000	1677	262	0.545	0.071	53.8	31.8	0.398
21	2000	1443	28	-0.001	0.030	100.0	78.5	0.981
22	2000	1453	38	-0.001	0.047	59.6	35.5	0.444
23	2000	1762	347	-0.196	0.067	54.4	35.2	0.440
24	2000	1695	280	-0.172	0.064	65.4	40.9	0.511
25	2000	1458	43	-0.001	0.057	59.3	43.1	0.539
26	2000	1478	63	-0.001	0.074	60.2	43.0	0.538
27	2000	1458	43	-0.001	0.045	59.8	43.7	0.546

* S : 1415 second, time to brige without avoiding collision

Fig.7 Relation between time and environmental stress(ESA)

4. 3 航行時間の遅延・延長と負荷軽減の基準化

Fig. 8は、Fig. 7にプロットした 27 ケースの実験結果について、縦軸の総合環境ストレス値が 750 以上となる状態の出現割合 ($P【ESA > 750】$) の値を 4.1 で求めた潜在的総合環境ストレス値が 750 以上の出現割合 ($P【L-ESA > 750】$) で基準化して表したものである。

この図からもわかるように、橋脚の配置間隔や交通輻輳などの条件が異なっても迂回・減速の代償としての航行時間の遅延・延長と負荷の軽減の関係に普遍的な関係が見られることがわかった。式(6)は、両者の関係を線型回帰して得られた式を示しているが、このときの相関係数は 0.703 であり、良好な精度の推定式が得られた。

$$\begin{aligned} & (P【ESA > 750】) / (P【L-ESA > 750】) \\ & = 1.0 - 0.001 [\tau - S] \quad \dots\dots (6) \end{aligned}$$

5. むすび

本研究では、主機および舵を使用して減速や迂回などの操縦行動をとることに伴う操作上の負荷に着目し、このような操縦行動がどれほどの航行時間に影響を与えるかを定量表現することを試み、そして、この迂回・減速の代償としての航行時間の遅延・延

Fig.8 Changing to latent (L-ES) on relation of time and ESA

長の大きさが、操船の困難性をどの程度軽減するかについて、操船シミュレータ実験を行って検証した。

主機および舵を使用した迂回・減速などの操縦行動とそれに伴う航行時間の遅延・延長の関係については、本研究において実験に使用した供試船に関して、式(5)を用いて関係づけられることを示した。そして、迂回・減速の代償としての航行時間の遅延・延長と負荷の軽減の関係については式(6)に示されたように論理的に整合をとれた関係が見られることが検証できた。

架橋下航行を対象に、また、6000TEU 型コンテナ船が対象とはいえ、以上のように操縦行動の取り方によって時間という代償を支払って操船上の負荷を軽減しようとする操船者の行動を定量的に表現できることがわかった。今後は種々の航行環境、種々の自船船型について検証を重ねることにより、これまで著者が提唱してきた環境負荷、交通負荷にならぶ『操縦行動負荷』の定量化モデル確立への基礎が出来たといえる。

参考文献

- (1) (社)日本海難防止協会: 由良瀬戸外船舶航行検討業務報告書, 1999
- (2) 岩崎学: 統計的データ解析, 東京図書, 2006
- (3) 謝洪彬・井上欣三・Cemil Yurtoren: 潜在環境負荷と残存環境負荷の関係について－I. 一直線状航路における数量関係の推定－, 日本航海学会論文集, No.112, pp.95-100, 2005.3
- (4) 井上欣三・増田憲司・世良亘: 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, No.98, pp.225-234, 1998.3
- (5) 藤井弥平・巻島勉・原潔: 海上交通工学, 海文堂, 1981
- (6) 福地信義: ヒューマンエラーに基づく海洋事故－信頼性解釈とリスク評価－, 海文堂, 2007.4

質疑応答

山田 孝三郎 (個人、正会員):

1. 設定した操船運動モデルについて言及してください。
2. 風潮流に関してはどのような設定をされましたか。

成 愈昶：

1. 操船運動モデルとしては MMG モデル(MMG : Mathematical Modeling Group)を用いました。同モデルは、船全体に作用する流体力を、船体の構成要素である主船体、舵、プロペラなどに作用する流体力を個別に表現し、それぞれの単独性能を重ね合わせるとともに、これらの相互干渉による流体力を付加する形で表現しています。

2. 本実験では風潮流の影響を考慮せず、他船の交通流のみを設定して行いました。

瀬田 広明（鳥羽商船高等専門学校）：

操縦負荷と操船困難性の関係を示されていましたが、対象水域を航行する際の潜在的操船困難性と操縦を行った際の操船困難性の差と操縦負荷の関係はどのようなになっていますか。

成 愈昶：

対象水域での潜在的操船困難性(L-ES)は、操縦を行った際の操船困難性より高い数値を表しました。この差は、迂回や変速の操縦行動によって発生した操縦負荷に変換されたと考えられます。