不安全操船状態評価の 海上交通流シミュレーションへの適用

安田 克*・井上欣三**

Applicability of Unsafe Ship-handling Situation Index to Marine Traffic Simulation

Masaru YASUDA, Kinzo INOUE

Abstract

The Unsafe Ship-handling situation(US) is known as a index that is able to estimate a potential risk of marine accident by calculating frequency of unsafe situation on maneuvering process. In our past study⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾, we were able to find out the correspondence between a marine accident and an US. Actually, it get to use this index in a planning of harbor, traffic route and so on.

However, due to neglect of maneuver's difference, it needs a lot of simulator experiments. In addition, in a real time simulator experiment, it has some limitations such as estimation area, target ship and so on.

In this study, we tried to apply traffic simulation to US. Since an US is calculate by a ship's motion (velocity, turn rate, lateral speed etc.) and maneuvering condition (rudder angle, engine motion, thruster etc.), we introduced MMG model to the traffic simulation. We tried to estimate a US by this traffic simulation and we were able to find out the correspondence between a marine accident and US just like the past study.

Keywords : Marine traffic engineering, Unsafe Ship handling situation, Marine accident,

キーワード: 海上交通工学、不安全操船状態、海難事故

1. はじめに

不 安 全 操 船 状 態 (US : Unsafe Ship-handling situation) は、操船に対する衝突・乗揚の危険性を表す指標である。国の航路整備計画や地方港湾の港湾計画などにおいては、計画または整備に伴う船舶交通の安全性を検討する一方で、その整備に係る費用便益を計ることが求められていることもあり、現在では、国の航路整備計画や港湾計画改訂に係わる検討において安全性及び期待事故費用を計る目的で広く利用されるようになった。

不 安 全 操 船 状 態 を 評 価 す る に は、操 船 シ ミ ュ レ ー タ 装 置 など に よ り 操 船 者 が 実 操 船 を 行 い、そ の 操 船 過 程 に お け る 舵、機 関、タ グ、ス ラ ス タ ー など 操 作

状 態 及 び 操 船 の 結 果 と し て 現 れ る 速 度、回 頭 角 速 度、横 流 れ 速 度 な の 運 動 状 態 を 抽 出 し、こ れ を 入 力 条 件 と し て 一 定 時 間 断 面 の 予 測 航 跡 を 推 定 し て、そ の 予 測 航 跡 の 他 船、護 岸、浅 瀬 な ど に 対 す る 衝 突 判 定 の 有 無 か ら 不 安 全 操 船 状 態 を 検 出 す る。

こ の 場 合、人 間 が 操 船 す る こ と に 伴 う 操 船 の ば ら つ き を な く す た め 相 当 数 の 実 験 を 行 う 必 要 が あ る 一 方 で、リ アル タイ ム シ ミ ュ レ ー シ ョ ン は 実 時 間 を 要 す る た め、そ の 実 施 ケ ー ス は 極 め て 限 ら れ た 条 件、範 囲 で 行 わ ざ る を 得 な か っ た。著 者 ら も こ れ ま で 来 島 海 峡 航 路 を モ デ ル と し て 操 船 シ ミ ュ レ ー タ 実 験 に よ り 不 安 全 操 船 状 態 を 評 価 し、海 難 発 生 位 置 や 頻 度 と の 対 応⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を 試 み た が、そ の 対 象 範 囲 は 最 狭 部 に

* 正会員 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)

** 正会員 神戸大学海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

限り、船型も限定して行った。ある特定の条件に対する操船の危険性を評価するうえでは、このような手法は有効かつ適当なものと考えられるが、不特定多数の船舶に対する評価としては限界がある。

そこで、本研究ではこのような問題を解決するため、海上交通流シミュレーションにより交通流を再現させ、これに不安全操船状態評価の適用を試みた。

2. 不安全操船状態の概念

Fig.1 に不安全操船状態の概念を示す。

不安全操船状態は、潜在的操船水域⁽¹⁾ (Potential Area of Water, PAW) の概念を導入し、時々刻々の操作状態、運動状態から、現在の状態が継続した場合の予測航跡を計算する。対象船舶のその時の状態に応じた最短停止時間 (Short Stopping Time, SST) が、他船や陸地、浅瀬に衝突するまでの余裕時間 (Time To Collision, TTC) を超える場合に不安全操船状態と判断される。

Fig.1 Concept of Unsafe Ship-handling situation

3. 名古屋港における海上交通の再現

3.1 運動モデルの導入

現状の海上交通流シミュレーションは、各ウェイポイント (変針点) で結ばれた経路を設定された速力で移動する質点の動きであって、その間の船の操作及び運動は考慮されていない。最近のシミュレーションでは、TK モデルなどにより変針時の回頭をより現実に近づけたものもあるが、リアルタイムシミュレーションのように船の操作の結果として運動

を再現する海上交通流シミュレーションは、多大な計算時間を要することと、全船の動きを運動モデルで再現するためには、様々な船の運動モデルデータベースが必要であることなどから汎用的ではなかった。

しかしながら、近年のコンピュータの計算速度は目覚しく向上し、また、シミュレータによる検討が主流となってきたことから、様々な種類の船の運動モデルが蓄積されるようになり、海上交通流シミュレーションへの運動モデルの導入を可能にした。

運動モデルは、一般的な MMG モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ を利用し、入力条件は変針時及び避航時の変針角と速力とした。与えられた変針角に対する舵角は、オートパイロット機能を利用し、原針路と目標針路との差及びそのときの回頭角加速度、並行偏位量から変針に必要な舵角量を求めた。また、機関は目標速力 (ウェイポイント間で設定された航行速力) になるようなエンジン回転数を与え、所定の速力を得るようにした。

3.2 運動モデルによる交通流の再現

海上交通流シミュレーションによる交通流の再現は、Fig.2 に示すように実態の船舶航行データから、シミュレーション上、船舶が航行する通航経路をモデル化し、各経路において発生する船舶の速力、隻数などを実態データから設定する。シミュレーションの実行では、各経路において設定された隻数に基づき指数分布にしたがって乱数発生させたが、その際、航行管制を踏まえ 20,000 トン以上 (現状は 40,000 トン以上) の船舶の発生がある場合には、航路内で 500 トン以上の船舶と行き会わないよう発生時間を遅らせるようにした。

Fig.2 Flowchart of situation design

(1) 名古屋港における船舶交通実態データ

名古屋港の交通流を再現するにあたり、平成 10 年に名古屋港管理組合において実施された船舶交通実態調査⁽⁷⁾による航跡データを利用した。船舶実態調査は、名古屋港港域内を航行する船舶を対象に 2 日間にわたって実施されたものである。

(2) 通航経路帯

船舶航行実態調査による航跡データに基づき、船型及び OD (O: Origin, D: Destination) などによりグループ化された通航経路帯を作成した。通航経路帯はウェイポイント間を带状の経路で結んだもので、その幅はグループ化された航跡群の平均航跡位置から標準偏差の 2 倍 ($\pm 2\sigma$) を考慮した。また、その間の通航速力は航跡群の平均速力とした。

(3) 交通流の再現

海上交通流シミュレーションによる再現は、航行実態調査時の船型区分を踏まえ Table 1 に示すような 13 区分において計算した。

Table 1 Classification of Ship size

~20GT	500~1,000GT	30,000~40,000GT
20~50GT	1,000~5,000GT	40,000~50,000GT
50~100GT	5,000~10,000GT	Over 50,000GT
100~300GT	10,000~20,000GT	
300~500GT	20,000~30,000GT	

シミュレーションでは、1 日の時間変動を考慮し 48 時間を実施した。名古屋港は港の性質上、朝にラッシュ時間帯があり、主要航路とする東航路では 6、7 時頃にピークがあることがわかる。西航路では東航路に見られるようなラッシュ時間帯は見られない。

Fig.3 Number of passage ship on Higashi Route

Fig.4 に実態調査により得られた 6 時から 9 時の輻輳時間帯における 100 トン以上の航跡状況を示す。また、Fig.5 に運動モデルを導入した海上交通流シミュレーションによって再現した航跡状況を示す。

なお、20,000 トン以上（現在は 40,000 トン）の管制船が、航路内において管制対象船である 500 トン未満の船舶と見合い関係となった場合には実情を踏まえ管制船に優先権を与えるものとした。

Fig.4 Actual Traffic Wake (6~9hr, above 100GT)

Fig.5 Simulation Traffic Wake (6~9hr, above 100GT)

4. 不安全操船状態評価の適用

4.1 不安全操船状態による操船危険性評価

シミュレーションによって再現された各船に対し、不安全操船状態を評価した。評価対象時間帯は、朝のラッシュ時間帯を含む 6 時から 9 時とした。Fig.3 に示した実態航跡数より、名古屋港の主要航路である東航路では、朝のラッシュ時間帯に輻輳するようすが見られるが、西航路においてはこのようなラッシュはなく海難データとの対応を取るだけの十分な航跡データが得られないことから、ここでは東航路を出入りする 100 トン以上の船舶を評価対象とした。

Fig.6 に 100 トン以上の入港船舶における不安全操船状態を例として示す。また、Fig.7 は他船に対して不安全操船状態となった場合の予測航跡が他船と衝突した位置を示したものである。

名古屋港は、東航路を主航路として西航路及び北航路から構成される。そして、これらは Fig.7 に示すように金城水域で交差する。港則法では、その優先順位は東航路、西航路、そして北航路の順に定められているが、輻輳する時間帯においては船舶が頻繁に合流・交差する危険な水域として知られている。

東航路を航行する船舶の不安全操船状態をみると、各時間断面における操作状態と運動モデルから計算された運動状態から推定される予測航跡は、Fig.7 のように 3 航路が交差・合流する金城交差部で多く発生していることがわかる。

Fig.6 Occurrence Situation of US (100GT-)

Fig.7 Relation with Passages in Nagoya Port

4.2 名古屋港港域内における海難発生状況

不安全操船状態と海難事故の対応をとるため、名古屋港における海難発生状況について調査した。Table 2 に過去 10 年間（1994 年～2005 年）において名古屋港港域内で発生した海難事故を示し、Fig.8 に海難位置を示す。名古屋港では過去 10 年間に 24 件（40 隻）の海難事故が発生している。

本研究では、名古屋港の主航路である東航路を通航して入出港した船舶を評価の対象としたため、海難についても Fig.8 の点線で囲まれた東航路航行に係るものに限定した。すなわち、西航路付近で発生したものや港奥で発生した海難は対象外とした。したがって、対象海難事故は Fig.8 の点線で囲まれた 11 件（19 隻）とした。

Table 2 Number of Accident in Nagoya Port
(1994-2005)

No.	Type of Marine Accident	Date	Type of Vessel	Size of Vessel (GT)	Latitude	Longitude
1	Collision with Vessel	1997/4/29	Tanker	299	35.017	136.850
			Cargo	43,213	35.017	136.850
2		1998/6/29	Cargo	499	35.033	136.867
			Cargo	8,280	35.033	136.867
3		1999/1/26	Cargo	2,498	35.033	136.833
			Cargo	15,455	35.033	136.833
4		1999/4/15	Cargo	8,306	35.017	136.833
			Tanker	1,599	35.017	136.833
5		2001/6/21	Cargo	4,879	35.015	136.802
			Tanker	84	35.015	136.802
6		2001/12/11	Other	147	35.022	136.827
			Cargo	18,337	35.022	136.827
7		2002/3/23	Cargo	2,415	35.062	136.858
			Cargo	1,540	35.062	136.858
8		2002/4/23	Tanker	109	35.020	136.808
			Other	19	35.020	136.808
9		2002/7/7	Cargo	747	35.042	136.875
			Cargo	11,573	35.042	136.875
10		2002/8/23	Tanker	3,743	35.062	136.880
			Tanker	499	35.062	136.880
11		2003/2/18	Cargo	3,012	35.023	136.848
			Cargo	25,431	35.023	136.848
12		2003/3/11	Cargo	9,030	35.025	136.792
			Cargo	9,413	35.025	136.792
13		2003/8/19	Other	19	34.972	136.803
			Cargo	199	34.972	136.803
14		2004/5/17	Tanker	494	35.000	136.800
			Cargo	6,743	35.000	136.800
15		2005/7/15	Cargo	7,660	35.023	136.795
			Cargo	8,813	35.023	136.795
16		2005/10/22	Cargo	8,282	35.023	136.796
			Cargo	6,177	35.023	136.796
17	Collision with Berth or buoy	2000/2/8	Tanker	3,866	35.050	136.867
18		2001/12/10	Cargo	6,588	35.038	136.843
19		2003/6/26	Cargo	38,888	35.002	136.852
20		2004/10/15	Cargo	4,879	34.980	136.770
21	Ground	2005/11/17	Cargo	8,570	34.995	136.787
22		1997/5/6	Cargo	238	35.017	136.800
23		1998/4/23	Cargo	5,654	35.017	136.800
24		1999/12/21	Cargo	4,022	35.017	136.800

Offer : 4th Regional Coast Guard Headquarters

Fig.8 Marine Accident in Nagoya Port

4.3 不安全操船状態と海難事故の対応

4.3.1 海難発生率

海難発生率の推定にあたり、母数となる 10 年間の通航隻数は、東航路を航行した 500 トン以上の年間通航隻数 (2004.7~2005.6) を基準とし、これを 10 倍して 10 年間の通航隻数と仮定した。

Table 3 に海難発生率を示す。年間の東航路通航隻数データ (提供 : 名古屋港管理組合) の船型区分にしたがい、各船型における海難隻数を整理した。この海難隻数を 10 年間の通航隻数で除して海難発生率を求めた。

Table 3 Occurrence Ratio of Marine Accident

Type of Vessel	Number of Marine Accident (for 10 years)	Number of Vessels (for 10 years)	Occurrence Ratio of Marine Accident
- 500GT	5	102,590	4.874E-05
- 5,000GT	5	101,340	4.934E-05
- 10,000GT	3	32,240	9.305E-05
10,000GT-	6	83,980	7.145E-05
Total	19	320,150	5.935E-05

Offer : Nagoya Port Authority

4.3.2 不安全操船状態発生率との対応

Fig.9 に不安全操船状態発生率と海難発生率を示す。図からわかるように不安全操船状態の発生率は、船が大きくなるにつれ増加する傾向が見られる。また、海難事故率についても、10,000 トンまでの船型においては、不安全操船状態と同様の増加傾向が見られ、両者の間にはおおよそ 10^{-4} の一定の比の関係が見られる。

海難事故は、10,000 以上の船型ではむしろ減少しているが、このことは、名古屋港は強制水先区であり、10,000 トン以上の船舶においては、水先人の乗船が義務付けられていること。また、東航路は名古屋港海上交通センターによる管制水路があり、20,000 トン(現在は 40,000 トン)を超える大型船は、管制船となることから、500 トン以上の船舶との行き会がないことなど、その航行に対し特別な安全措置が取られている実情がある。

Fig.9 Correspondence between Marine Accident and Unsafe Ship-handling situation

4.4 切迫レベルによる評価

切迫レベル⁽²⁾を(1)式に示す。これは 0 から 1 の数値で求めることができ、得られた値が 0 に近いほど(すなわち、 $TTC \approx SST$)、本船が止まることのできる時間 (SST) に極めて近いところで潜在的に衝突・乗揚危険があることを表し、危険を回避する余裕が高いことを意味する。一方、数値が 1 に近いほど SST に対し TTC が小さく危険を回避する余裕が小さく、危険に対する切迫レベルが高いことを意味する。

$$Emergency\ Level = 1 - \frac{TTC}{SST} \dots\dots\dots (1)$$

Fig.10 から Fig.12 に入港時において不安全操船状態となった場合の予測航跡が他船に衝突した位置とそのときの切迫レベルを示す。

Fig.10 に示す 500 トン未満の入港船では、高潮防波堤を過ぎた付近で多く現れているが、その値は 0.2 ~ 0.4 である。つまり、高潮防波堤よりかなり手前において避航操作した結果として、予測航跡が出港船と衝突したものである。これは管制水路において小型船が管制船と出会った場合、実情の運用を踏まえシミュレーションでは小型船に避航義務を課している。小型船の大型船に対する避航操作の結果として不安全な状態が航路内で多く発生したもので、高潮防波堤付近でその頻度が高く現れたのは、防波堤通過に向けて航跡が収束し密になるためと考えられる。

Fig.10 Collision Point of Prediction Wake and Emergency Level (100-500GT)

一方、Fig.11 及び Fig.12 をみると、船型が大型になるほど金城交差点付近において多く発生し、切迫レベルも比較して高い値を示している。500 トン以上の船舶については、管制により大型船と行き会することがなく、管制船は小型船に避航義務を課したため、500 トン未満の小型船で見られたような航路内での行き会による不安全操船状態の発生は少ない。ただし、管制航路を出て北航路方面、金城水路方面への変針操船の過程において金城交差点付近で北航路からの出港船、西航路からの入港船と交差・合流することにより不安全操船状態が多く出現している。

名古屋港の航路のあり方を考える際、このような航路内の行き会における操船の危険性や金城交差

部における交差・合流の危険性が常に指摘されるが、こうした名古屋港の航路問題についても、この海上交通流シミュレーションによる不安全操船状態では反映している。

Fig.11 Collision Point of Prediction Wake and Emergency Level (500-5,000GT)

Fig.12 Collision Point of Prediction Wake and Emergency Level (5,000GT-)

5. おわりに

不安全操船状態の評価は、操船の危険性を表すことができる指標として広く利用されるようになってきた一方で、その評価には、操船シミュレータ実験による実操船を伴い評価海域の規模、評価船の数、検証パターンなどに制約をかけざるを得なかった。もちろん、特定の条件に対する操船の危険性を評価するうえでは十分であり適切な手法であるが、交通流の場を評価するうえでは、操船者の違いによるばらつきを平滑化するため、相当数の実験を行う必要があり限界があった。

本研究では、海上交通流シミュレーションによる操船の危険性評価の適用の可能性を見出すことができた。これにより、操船シミュレータによる特定の操船に対する危険性評価と海上交通流シミュレーションによる交通流の場に対する危険性評価などのように評価対象によって使い分けることが可能になる。

以下に本研究で確認できた事項を示す。

- (1) 海上交通流シミュレーションに運動モデルを導入することにより、場に存在するすべての船舶からの操船危険性の評価が可能になった。
- (2) 海上交通流シミュレーションでは、一定の避航モデルのもとで操船するため、航行環境の変化に伴う船舶交通や護岸、浅瀬等への潜在的乗場衝突危険性の違いをより明確に表すことができるようになった。ただし、海上交通流シミュレーションの避航操船方法には、船の大きさは考慮されているが、操縦性の違いまでは考慮されていない。したがって、今後は操縦性を考慮した変針・避航操船方法のあり方について研究を進める必要がある。
- (3) 海難事故率との関連性についても 10^{-4} の比で対応が取れることが確認でき、より合理的な方法でハインリッヒの法則との対応を取ることができた。

なお、本研究では外力条件は考慮しなかったが、運動モデルを取り入れたことにより、外力条件を加味した再現が可能になる

参考文献

- (1) 井上欣三, 川瀬雅勇己, 安田 克, 臼井英夫, 世良 亘, 瀬田広明, 朴 栄守, 原 大地, 広野康平, 増田憲司: 不安全操船状態を指標とする操船の安全性評価モデル, 関西造船協会論文集, 第 241 号, pp.205-210, 2004.3
- (2) 安田 克, 井上欣三, 臼井英夫, 広野康平: 来島海峡航路における不安全操船状態の発生傾向と海難発生傾向との対応, 日本航海学会論文集, 第 113 号, pp.37-41, 2005.9
- (3) 安田 克, 井上欣三, 臼井英夫, 富久尾義孝: 来島海峡航路における乗揚海難発生率と不安全操船状態発生頻度との対応について, 日本航海学会論文集, 第 114 号, pp.25-30, 2006.3
- (4) 日本造船学会: 第 3 回操縦性シンポジウム, 昭和 56 年 12 月
- (5) 日本造船学会: 操縦性研究の設計への応用—運動性能研究委員会 第 12 回シンポジウム—, 平成 7 年 12 月
- (6) 本田啓之輔: 操船通論 (六訂版), 成山堂, 2001.9
- (7) 名古屋港管理組合, 基本計画調査 (名古屋港航路体系調査 (現況調査)), 平成 11 年 3 月