

# 輻輳海域シミュレーションシステムによる海域評価

長谷川 和彦\*・福戸 淳司\*\*・瀧本 忠教\*\*\*・山崎 全紘\*\*\*\*

## Safety Assessment of Marine Traffic by Intelligent Marine Traffic Simulation

Kazuhiko HASEGAWA, Junji FUKUTO, Tadanori TAKIMOTO

and Masahiro YAMAZAKI

### Abstract

“Marine Traffic Simulation System” has been developed by the first author and others for long years. It has three simulation modes. First mode is normal navigation mode. It reproduces realistic traffic flows according to the predefined planned route. Second mode is collision avoidance mode. It has the feature of automatic collision avoidance for all ships besides the normal navigation mode. Third mode is external data mode. It reproduces traffic flow according to the data given by such as AIS. With collision avoidance mode, more realistic traffic flow can be reproduced. However, the validation of the simulation result is not yet done, because it was difficult to get the real traffic flow data before AIS data acquisition system established. This is one of the main purposes of this paper. The system is applied for southward area from Tokyo Bay. Assuming external mode as a real traffic flow, other two modes are evaluated. Normal navigation mode overestimates the navigational risk, while collision avoidance mode reproduces it fairly well in terms of several indices to represent the risk of the area. Three indices; number of occurrence of  $CR \geq 0.9$ , near-miss, and collision respectively, are proposed to assess the navigational risk and discussed. The normalization of these indices, traffic density and gaming area is also proposed and verified including the simulation results of two other areas.

**Keywords:** Marine traffic engineering, marine traffic flow, navigational risk assessment, simulation, AIS

**キーワード:** 海上交通工学, 海上交通流, 航行安全評価, シミュレーション, AIS

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景および研究目的

近年、海上交通量の増加、船舶の大型化、高速船の増加に伴い、海上交通の複雑化や輻輳化が進んでいる。そのため、航海士や水先案内人の負担が増え、結果として、船舶の衝突等による海難事故が増加することが懸念される。ひとたび海難事故が発生すれば、船体、積荷や人命の損失や損害のみならず、積荷や燃料の油流出などにより、地

域の経済や環境に大きな影響を与える。そこで、何らかの方法により、輻輳した海域の航行困難度を衝突の危険の発現等を指標として評価することは、航路の設計などや、海域の安全向上に必要不可欠である。海域の航行困難度については、すでにいくつかの方法が提案されているが、ここでは、海上交通シミュレーション手法を用いた方法について論ずる。

交通流の再現には、過去には待ち行列で表現さ

\* 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\* 正会員 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

\*\*\* 非会員 海上技術安全研究所 (〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1)

\*\*\*\* 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

れるネットワークシミュレーション等マクロシミュレーションが行われてきた<sup>(1)</sup>が、計算機環境の改善に伴い、近年、衝突の状況や件数を定量的に把握するため、構成する船舶の動きを直接制御して評価に必要なレベルで船舶を動かして行う、いわゆる海上交通流のマイクロシミュレーションが多く利用されてきた<sup>(2)</sup>。これらの海上交通流シミュレーションでは、船舶を設定した航路通り航行させるものが一般的である。さらに、評価対象および評価項目に応じて、船速の調整や避航開始距離に着目して簡易的な避航操船を付与する方法<sup>(3)</sup>が広く知られている。本研究で紹介する輻輳海域シミュレーションシステムは、この方法をさらに発展させ、避航操船機能に DCPA と TCPA を用いた Fuzzy 推論を適用したもので、全船舶が状況に応じて自動避航することにより実際の航行状況に近い海上交通流シミュレーションが可能となる。

そこで本論では、まず、海域の危険度を評価する複数の指標を提案し、これらを用いて東京湾南海域で観測された交通流とその観測結果に基づいたシミュレーション結果を比較、評価した。

さらに、海域に依存しない評価を行うため、それぞれの指標値や交通密度を正規化する換算法について提案し、複数の海域に適用して、換算法の有効性の検討を行った。

## 1.2 輻輳海域シミュレーションシステム

本システムは、これまで輻輳海域シミュレータ<sup>(7)</sup>と呼んでいたものであり、船舶の属性、計画航路、発生条件等からなる船舶発生データに基づいて船舶を計画航路通りに航行させることができる通常航行モード (Normal Navigation mode、以下 NN mode、従来のマイクロシミュレーション<sup>(2)</sup>に相当する)、通常航行モードに加え、状況に応じ避航することができる避航操船モード (Collision Avoidance mode、以下 CA mode、いわゆる輻輳海域シミュレータ<sup>(7)</sup>のモード)、AIS 等により記録された航跡データ通りに動かす外部データモード (External Data mode、以下 ED mode) がある。また、船舶発生データを編集することにより、海域の形状や交通量といった条件を自由に変えたシミュレーションが実施できる。

## 2. 東京湾南海域のシミュレーション

### 2.1 シミュレーションの概要

東京湾南海域における AIS の観測データを元に

作成した船舶発生データを入力データとして海上交通流シミュレーションを実施した。シミュレーションは、通常航行モード、避航操船モード、外部データモードの3種類のモードで計算を行うこととし、1回24時間のシミュレーションを外部データモードでは1回、それ以外では船舶発生データを変えて各5回実施した。

### 2.2 船舶発生データ

東京湾南海域は、Fig. 1 において太線と海岸線で囲まれた内部の海域とした。船舶発生データはこの海域における交通流を陸上に設置した AIS 受信機で記録し、その AIS 記録データ (2010年5月10日、24時間、258隻) を分析して作成した。具体的には、まず、Fig. 1 のようにゲート (太線) で分析エリアを区切り、各ゲートを通過する各船舶に対して入退場するゲート ID と、その時刻、船種、船型を AIS 記録データから抽出して OD 表を作成した。次に、同じ OD を辿った船舶の航跡群から代表変針点と許容幅からなる航路帯を作成した。さらに、この OD 表と航路帯情報に基づき、

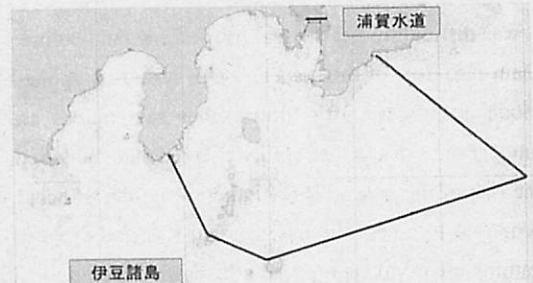


Fig. 1 Southward area of Tokyo Bay



Fig. 2 Ship trajectories recorded by AIS (May 10, 2010)

各 OD について単位時間当たりの船舶の発生隻数から船舶の発生時刻とその船舶の属性データを生成して船舶発生データとした。その分析に使用した AIS 記録データに基づく全船舶の航跡を Fig. 2 に、船種・船型毎の船舶のパラメータを Table 1 に示す。

Table 1 Ship type, length, velocity, block coefficient and maneuverability indices

Ship Type	L(m)	V(m/s)	Cb	K'	T	T V'
Container(small)	130	10.4	0.58	1.1	1.8	8.0
Container(large)	260	11.9	0.66	1.5	3.2	12.8
Passenger (small)	100	10.4	0.52	1.8	2.1	5.2
Passenger (large)	250	13.1	0.62	2.2	2.6	12.0
Cargo (small)	130	8.9	0.64	1.2	1.8	6.9
Cargo (large)	270	8.6	0.76	1.7	3.3	8.9
Tanker (small)	90	7.0	0.66	1.8	2.6	3.9
Tanker (large)	260	7.0	0.80	3.0	6.2	7.6
Other (small)	100	8.7	0.60	2.1	2.1	4.4
Other (large)	220	8.7	0.73	2.2	2.7	7.9

Table 1 の船種の区分けは AIS 記録データにおける船種項目により行った。各船種の小型、大型の区別については、海上交通安全法で巨大船として定義されている船長 200m を境として区分けを行った。船長については、分析した日の通航船舶を船種毎に分け、各々の平均値 (10m 未満は四捨五入) を採用した。その他、操縦性指数については、過去の実船実験の結果などから船種毎に基準船を決め、その Z 試験の結果を参考に決定した。

2.3 評価指標

本研究では、海域の危険度を評価するため、三つの指標を提案し、検討を行った。三つの指標の定義を以下に示す。

(1)  $CR^{(8)(9)} \geq 0.9$

CR は、様々な提案されている衝突危険度のひとつで長谷川・上月が定義したものであり、DCPA と TCPA から Fuzzy 推論で求められる。また、避航操船モードにおいては、避航船はもちろん、保持船も、避航船が何らかの理由により避航しない場合や避航が遅れた場合に、避航するよう設定しており、その避航開始条件を  $CR \geq 0.9$  としている。本論では、この事象が発現する件数を衝突危険の指標のひとつとして選定した。

(2)ニアミス

ニアミスは、式(1)、(2)で示す限界航過距離を二辺とする矩形内に他船が存在し、かつその船との衝突危険度が  $CR \geq 0.7$  となる状態と定義す

る。本論では、このニアミスという事象が発現する件数を指標のひとつとした。なお  $CR \geq 0.7$  は、避航操船モードでの避航船の避航開始条件であり、限界航過距離は、港湾域における井上の式<sup>(10)</sup>を用いた。

$$FA = (0.0015 \times L_t + 2.076) \times L_o \dots\dots\dots(1)$$

$$SP = (0.008 \times L_t + 0.667) \times L_o \dots\dots\dots(2)$$

ここで、

$L_o$  : Length of own ship

$L_t$  : Length of target ship

(3)衝突

衝突は、船舶の形状を船長および船幅を二辺とする矩形とし、自船の矩形領域に、他船の矩形領域が重なった状態と定義した。本論では、この衝突という事象が発現する件数を指標のひとつとした。



Fig. 3 Ship trajectories by simulation result (NN mode)



Fig. 4 Ship trajectories by simulation result (CA mode)



### 2.4 シミュレーション結果

外部データモード、通常航行モードおよび避航操船モードでの、1日分の船舶航跡図を Fig. 2 から 4 に示す。

次に、各指標値の1日当たりの発現件数と、その発生地点を Fig. 5 から 14 に示す。ただし、外部データモードは1日分であるのに対して、避航操船・通常航行モードでは、シミュレーションを5日分行った。また外部データモードでは、衝突と

ニアミスの発現件数が0件なので、発生地点表示は省略した。

### 2.5 考察

各指標値について以下で検討する。

#### (1) CR $\geq$ 0.9

外部データモードの発現件数 (Fig. 5) は約40件であり、発生地点 (Fig. 6) のうち浦賀水

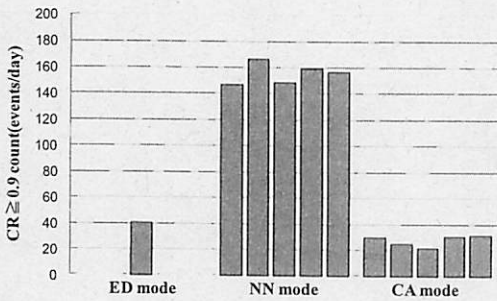


Fig. 5 CR $\geq$ 0.9 count by simulation result

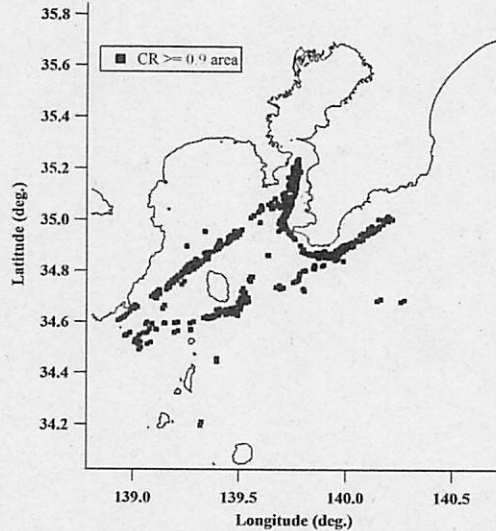


Fig. 7 CR $\geq$ 0.9 area by simulation result (NN mode)

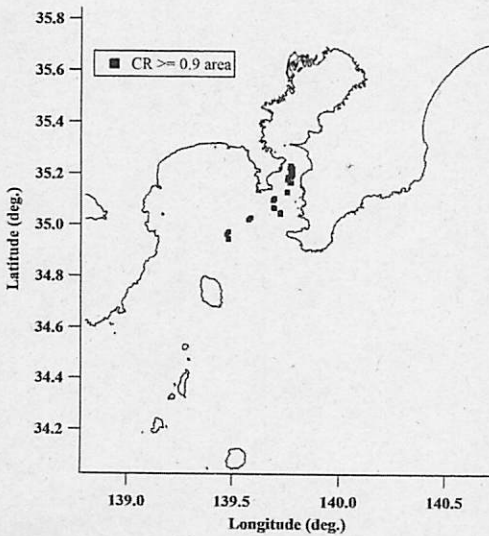


Fig. 6 CR $\geq$ 0.9 area by simulation result (ED mode)

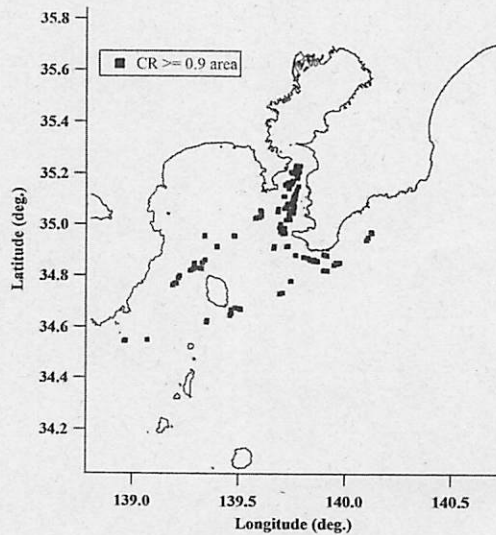


Fig. 8 CR $\geq$ 0.9 area by simulation result (CA mode)

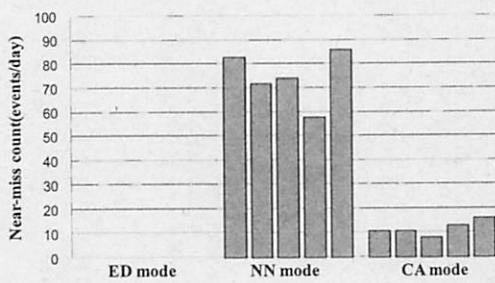


Fig. 9 Near-miss count by simulation result

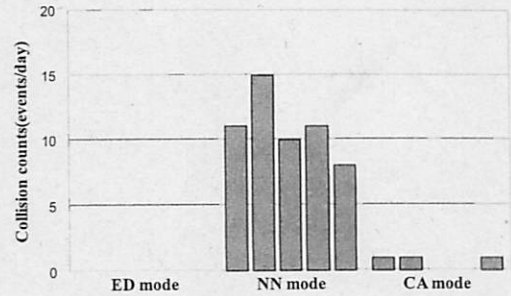


Fig. 12 Collision count by simulation result

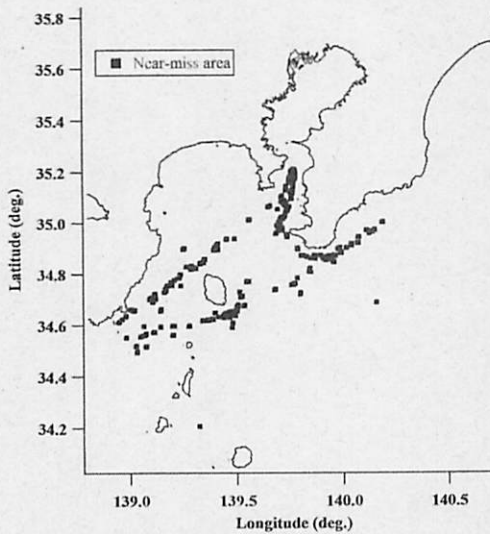


Fig. 10 Near-miss area by simulation result (NN mode)

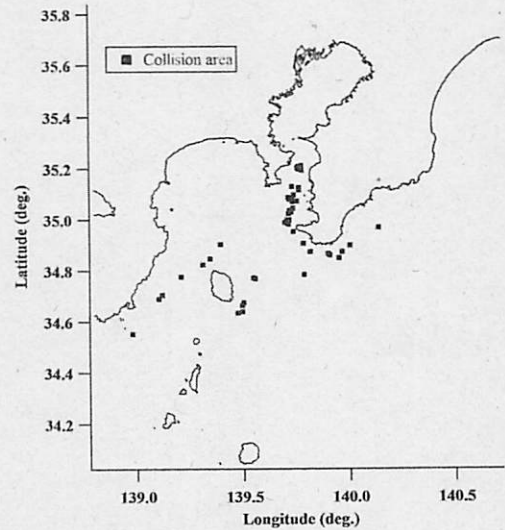


Fig. 13 Collision area by simulation result (NN mode)

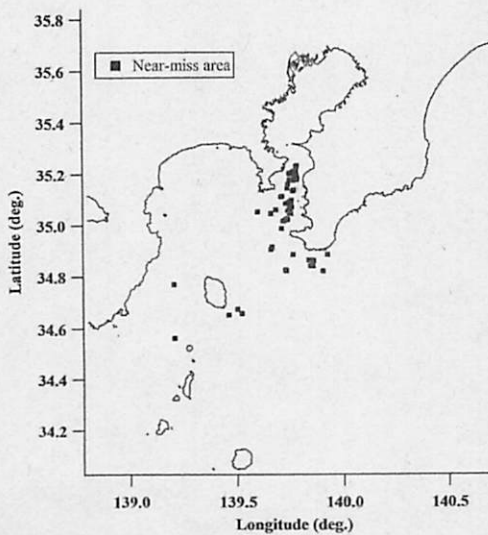


Fig. 11 Near-miss area by simulation result (CA mode)

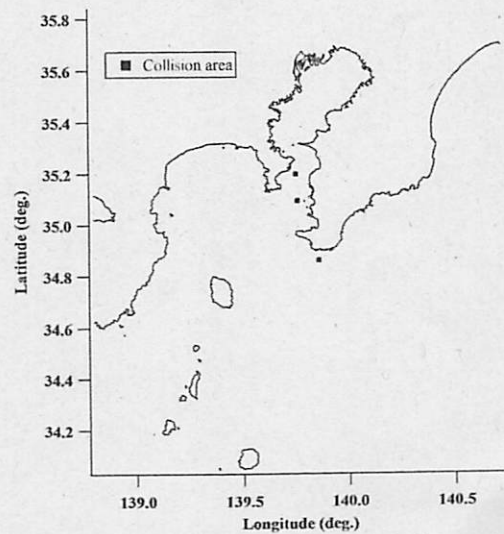


Fig. 14 Collision area by simulation result (CA mode)

道入口付近以外の割合は約10%であった。つまり、本指標値において、浦賀水道入口付近は比較的衝突危険度が高い海域であると推定できる。

次に、通常航行モードでは、発現件数 (Fig. 5) が約150件であり、外部データモードの4倍弱と非常に多い。また、発生地点 (Fig. 7) の56%が、浦賀水道入口付近以外に存在していた。一方、避航操船モードでは、発現件数 (Fig. 5) が約30件であり、発生地点 (Fig. 8) の約29%が浦賀水道入口付近以外に存在していた。これより、避航操船モードでは、通常航行モードに比べ、発現件数、発生地点ともに外部データモードに近い結果となっていることがわかる。

## (2)ニアミス

外部データモードの発現件数 (Fig. 9) は0件である。また、通常航行モードでは、発現件数 (Fig. 9) が約70件であり、発生地点 (Fig. 10) の約57%が浦賀水道入口付近以外に存在している。一方、避航操船モードでは、発現件数 (Fig. 9) が約10件であり、発生地点 (Fig. 11) の約14%が浦賀水道入口付近以外に存在している。これより、避航操船モードでは、通常航行モードに比べ、発現件数、発生地点ともに外部データモードに近い結果となっていることがわかる。また、ニアミスは、衝突危険度が高いと思われる浦賀水道入口付近以外の発現割合が  $CR \geq 0.9$  に比べて低く、外部データモードでの指標値により近いものとなっている。

## (3)衝突

衝突の発現件数 (Fig. 12) は外部データモードおよび避航操船モードでは、0件か非常に少なく、通常航行モードでも  $CR \geq 0.9$  (Fig. 5) やニアミス (Fig. 9) に比べて少ない。特に、避航操船モードでは、その発現件数および発生地点については、統計的な信頼性や再現性には欠けるとされる。

以上より、「衝突」は以降、海域評価指標の検討からは除外する。また、「 $CR \geq 0.9$ 」と「ニアミス」のふたつの指標を比べると、外部データモードと近い発現件数と衝突危険度の高い海域を表現できる「ニアミス」が今回の評価においては妥当と思われる。ただし、比較のため、以降もこのふたつの指標について検討を行う。

## 3. 航行条件を変えたシミュレーションとその整理法

### 3.1 交通量が航行安全性に与える影響

2.3節で定義した指標のさらなる検討のため、東京湾南海域において交通量を100、110、120、130、140、150、200%と増加させた場合のシミュレーションを実施した。ただし、本検討は、避航操船モードのみで実施した。

#### 3.1.1 評価指標

2.3節の評価指標では、総船舶数を考慮していないため、交通量が異なるシミュレーション結果の比較ができない。そこで、以下のように船舶数と指標である各発現件数を正規化する。

$$\text{換算船舶数} = \frac{\text{発生船舶数}}{\text{単位船舶数}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{換算指標値} = \frac{\text{指標値の発現件数}}{\text{換算船舶数}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、単位船舶数は100(隻)とする。

#### 3.1.2 シミュレーション結果

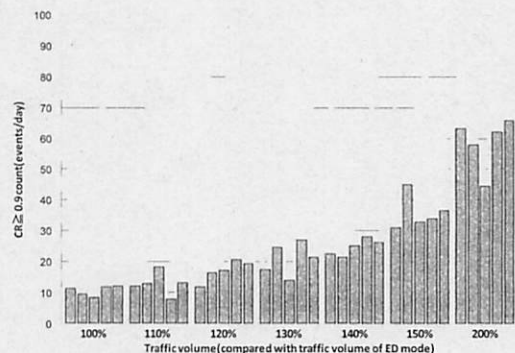


Fig. 15  $CR \geq 0.9$  count by simulation result in various traffic volumes

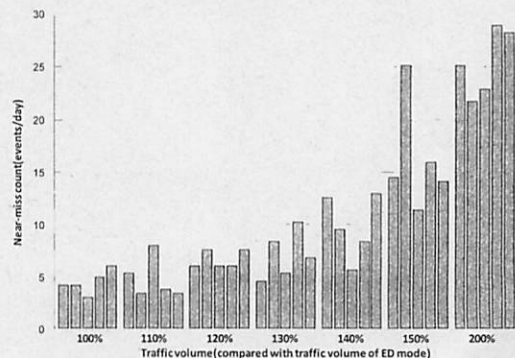


Fig. 16 Near-miss count by simulation result in various traffic volumes



1日当たりの各換算指標値を Fig. 15 と 16 に示す。ただし、横軸は現状の船舶発生データで生成された発生船舶数を 100% とした時の増加させた発生船舶数の割合で、縦軸が各換算指標値である。なお、シミュレーションは各交通量の状態で 24 時間のシミュレーションを 5 回行った。

### 3.1.3 考察

CR $\geq$ 0.9 の換算指標値 (Fig. 15) を見ると、交通量が増加すると、単調に増加していることが確認できる。ニアミスの換算指標値 (Fig. 16) も、交通量の増加に伴って単調に増加していることが確認できる。また、Fig. 17 にニアミスおよび CR $\geq$ 0.9 の計算結果の換算船舶数の平均と換算指標値の平均をそれぞれ両対数グラフの縦軸と横軸に示した図を示す。この図から、各指標が交通流の増加に伴い指数関数的に増加しているのがわかる。

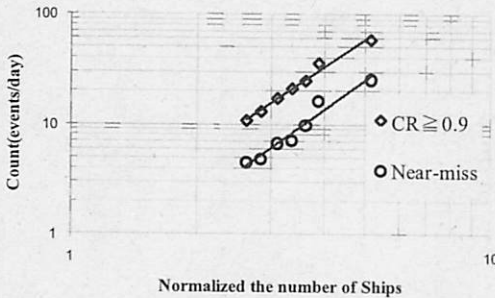


Fig. 17 Near-miss and CR $\geq$ 0.9 count by simulation

## 3.2 海域評価の一般化の検討

3.1 節では、換算船舶数の増加に伴う、換算指標値の指数関数的な増加が確認できた。しかし、東京湾南海域において、この関係が成立することを示したに過ぎず、地形等の条件が異なる海域においても成立するのか、また、成立したとして、同じような関係となるのかは確認できていない。そこで、東京湾南海域とは異なる海域において過去実施したシミュレーション結果を同様に評価した。対象海域は、シンガポール海峡周辺海域<sup>(4)</sup>および上海港周辺海域<sup>(5)</sup>である。評価は 3.1 節と同様に、避航操船モードのみで行った。

### 3.2.1 評価指標

3.1.1 項の換算指標値では、海域の広さを考慮しておらず、異なる海域のシミュレーション結果の比較ができないので、海域が異なっても、比較が可能な指標を再定義する必要がある。そこで、

船舶が通過した領域をその海域の面積として代表し、これを用いて無次元化することとした。具体的には、1km<sup>2</sup>を分解能として全船舶が一度でも通過した領域を加算し、その総和を解析海域面積と定義した。次に、無次元解析海域面積を、解析海域面積と単位解析海域面積 (本研究では 25mile<sup>2</sup> とした) で、(5)式として定義した。

$$\text{無次元解析海域面積} = \frac{\text{解析海域面積}}{\text{単位解析海域面積}} \quad \dots (5)$$

また、解析時間も同様に無次元化するため、無次元解析時間を、解析時間と単位時間 (本研究では 1 時間とした) で、(6)式として定義した。

$$\text{無次元解析時間} = \frac{\text{解析時間}}{\text{単位時間}} \quad \dots (6)$$

これら無次元解析時間と無次元解析海域面積で海域に存在する船舶数を割ることにより、単位時間、単位解析海域面積あたりの船舶密度が求まる。これを(7)式のように、換算交通密度と定義する。

$$\text{換算交通密度} = \frac{\text{発生船舶数}}{\text{無次元解析時間} \times \text{無次元解析海域面積}} \quad \dots (7)$$

同じように、指標値の発現件数を無次元解析時間と無次元解析海域面積で割ることにより、単位時間、単位解析海域面積あたりの各指標の発現件数が求まる。これを(8)式のように、換算海域指標値と定義する。

$$\text{換算海域指標値} = \frac{\text{指標値の発現件数}}{\text{無次元解析時間} \times \text{無次元解析海域面積}} \quad (8)$$

この換算交通密度を横軸、換算海域指標値を縦軸にとると、単位時間、単位解析海域面積あたりの船舶数と発現件数の関係になるので、3.1 節と同様な比較が可能となる。

### 3.2.2 シミュレーション結果

各海域のシミュレーション結果として、換算交通密度を横軸、換算海域指標値を縦軸にとった両対数のグラフを Fig. 18 と 19 に示す。グラフ上のプロットは、東京湾南海域、シンガポール海峡周辺海域、上海港周辺海域における CR $\geq$ 0.9、ニアミスの換算海域指標値で、図上の直線はこれらを

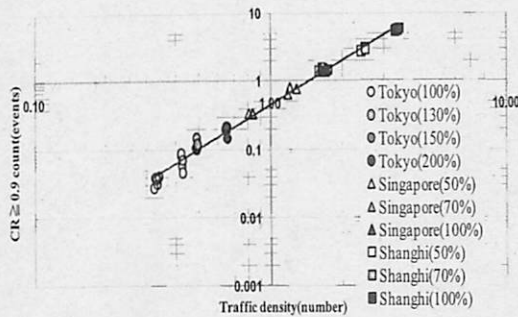


Fig. 18 CR  $\geq 0.9$  count by simulation result in various traffic density

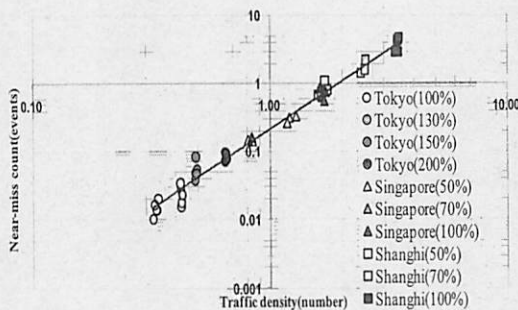


Fig. 19 Near-miss count by simulation result in various traffic density

直線近似したものである。

### 3.2.3 考察

Fig. 18 と 19 を見ると、近似曲線は両対数グラフにおいて、直線となることが確認できる。また、各海域において交通量を変化させた場合のシミュレーション結果もこの直線上に乗っていることが確認できる。これより、船舶数（ここでは換算交通密度）の増加に伴い、指標値の発現件数（ここでは換算海域指標値）が、海域によらず指数的に増加する傾向があることがわかる。

今後、これらの指標値と航行の困難さの関係についてさらに定性的および定量的検討を加える予定である。

## 4. 結論

本論では、輻輳海域シミュレーションシステムにより、衝突危険指標を用いた定量的な海域評価のため、東京湾南海域のシミュレーションを実施した。また、海域の衝突危険指標と交通密度の関係を示すため、シンガポール海峡周辺海域および上海港周辺海域においても同様のシミュレーシ

ョンを実施した。以下に結論をまとめる。

- (1) 衝突危険度を測る指標として  $CR \geq 0.9$ 、ニアミス、衝突の三つの事象の発現件数を選定して、一般的な避航操船を再現する避航操船モードの交通流シミュレーションから得られた指標と実海域の AIS 記録データから得られた指標を比較した結果、ニアミスの発現件数が AIS 記録データの衝突危険度をよく表していることがわかった。
- (2) 東京湾南海域でのシミュレーション結果から、通常航行モードのシミュレーションの場合、避航操船が含まれていないため、実運航データから得られた各事象の発現件数および発現地点とも大きく異なっていた。
- (3) 海域条件によらず交通量と海域の衝突危険度の関係を比較するため、換算交通密度、換算海域指標値を提案した。
- (4) 異なる三つの海域において交通量を変えた計 10 ケースのシミュレーションを実施した結果、海域の如何に関わらず、換算交通密度と換算海域指標値の関係は両対数のグラフでほぼ直線となることがわかった。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究 (C) (課題番号: 22510178、研究代表者: 丹羽量久) の支援を受けて実施した。また、著者数制限のため加えることができなかったが、長崎大学の丹羽量久教授、大手前大学の畑耕治郎准教授には、本研究に多大な貢献があった。ここに名前を記し、その貢献に謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 奥山育英: ネットワークシミュレーション, 日本航海学会誌, 第 80 号, pp.20-27, 1984.6
- (2) 杉崎昭生: ミクロ的海上交通流シミュレーション, 日本航海学会誌, 第 80 号, pp.14-19, 1984.6
- (3) 長澤明: 避航を考慮した海上交通流シミュレーション, 日本航海学会誌, 第 80 号, pp.28-34, 1984.6
- (4) 酒井史彦・長谷川和彦・丹羽量久・畑耕治郎: 輻輳海域シミュレータのマラッカ・シンガポール海峡への適用, 日本航海学会論文集, 第 122 号, pp.91-96, 2010.3
- (5) 中野武重・長谷川和彦・丹羽量久・畑耕治郎:



海上交通アセスメントにおける避航アルゴリズムの影響, 日本航海学会第122回講演会予稿集, 第2部, II-8, 2010.5

- (6) Kazuhiko Hasegawa, Kojiro Hata, Kazuhisa Niwa, and Junji Fukuto: Transmission Evaluation of Ship-borne Automatic Identification System(AIS) in Congested Waterways, The 8th International Conference on ITST, pp18-23, 2008.10
- (7) 長谷川和彦・立川功二: 輻輳海域シミュレータと海のITS, 計測自動制御学会関西支部シンポジウム, pp.184-189, 2001
- (8) 長谷川和彦・上月明彦: Fuzzy制御による自動避航システムに関する研究, 関西造船協会誌, 第205号, pp.1-10, 1987.6
- (9) 長谷川和彦・瀧本忠教・早川勇: 船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES)の再構築, 関西造船協会講演論文集, 第8号, pp.191-196, 1997.5
- (10) 井上欣三・宇佐美茂・柴田登紀子: 制限水域における航過距離と隔離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.297-305, 1994.3

### 質疑応答

杉本 洋平 (東京海洋大学):

AISを搭載していない小型船の交通流に与える影響は考慮しないのですか。

山崎 全紘:

本研究ではAISを搭載していない小型船は考慮していません。ただ、浦賀水道入口付近以外では小型船による交通流への大きな影響はないと考えています。また、東京湾内でのAISを搭載していない小型船の取り扱いとその影響に関しましては文献<sup>(6)</sup>において検討しています。

山田 多津人 (海上保安大学):

ニアミスの評価に使われた式を今回シミュレーションの対象とした東京湾南方の海域で利用した理由を教えてください。

山崎 全紘:

文献<sup>(10)</sup>によると、限界航過距離は、「他船と接近する際に、この距離以内に他船が入ることに強い不安を感じるため、絶対に許容できない距離」と定義しています。この定義のもとで港内操船における実態を操船者へのアンケートから

定義したのが(1)、(2)式です。港内より操船水域の制約が少ない海域では、別の許容航過距離になると考えられ、現実の航過距離はそうなっていると思われます。しかし、ここでは、ニアミスはこれ以上、相手船が近づけば危ないと感じる距離であり、その距離は港内においても港外においても変わらないと考え、この式を使用しました。