

輻輳海域船舶航行シミュレータの開発とその応用例

長谷川和彦*・横山伸介*・塩地 誠**・丹羽 量久***

谷口 悟***・森 茂***・中島 敏和****・矢内崇雅****

Development and Application of Intelligent Traffic Simulator for Congested Sea Area

Kazuhiko HASEGAWA, Shinsuke YOKOYAMA, Makoto SHIOJI,

Kazuhisa NIWA, Satoru TANIGUCHI, Shigeru MORI,

Toshikazu NAKAJIMA, and Takamasa YAUCHI

1. まえがき

近年、インターネットに代表される高度情報通信技術（IT）は、その短期間の飛躍的な発展により、国民生活や産業活動など社会全体に大きな変革をもたらした。いわゆる「IT 革命」とよばれている大変化である。

交通分野でも IT を活用して「安全、便利で人や地球に優しい交通」の実現を目指したさまざまな研究開発⁽¹⁾が進められている。そのうち、道路交通分野では、ITS（Intelligent Transport System：高度道路交通システム）の開発において、VICS（Vehicle Information Communication System：道路交通情報通信システム）やETC（Electronic Toll Collection：ノンストップ自動料金収受システム）などが実用段階に入った。一方、海上交通分野でも、その特殊性⁽²⁾を考慮しつつ、海上における安全性の向上や物流の効率化を目指した「海のITS」（高度情報通信技術を活用した海上交通のインテリジェント化）の基盤構築のためにさまざまな研究開発が進められている。国土交通省の主導のもとでは、「海のITS」に関する3つの研究テーマ、「フェールセーフとしての衝突座礁回避システムに関する研究」、「高度船舶交通管制システムに関する研究」、「港内操船・離着枝支援システムに関する研究」が2000年度から5カ年計画で実施されている。これらの港湾域開発、航路計画、陸上AIS局配備計画などを合理的に進めるためには、海上交通の実態あるいは将来を見越した輻輳海域でのそれらの開発や計画に関する影響調査手法の確立が望まれる。

著者らはこれまでに輻輳海域の交通流シミュレータ⁽³⁾⁻⁽¹¹⁾を開発し、交通流制御技術の高度化を目的とした数々の海上交通シミュレーションに利用してきた。ここでは、このシミュレータの機能およびその特徴である人工知能を適用した自動航行システムの概要と機能について紹介する。また、このシミュレータにより大阪湾・伊勢湾・東京湾の船舶交通流を予測したシミュレーション結果を図示する。さらに、このシミュレータのAIS 交信機能を応用して、陸上局配備に関するシミュレーション方法を示す。

* 大阪大学大学院工学研究科船舶海洋工学専攻 hase@naoe.eng.osaka-u.ac.jp

** 独立行政法人電子航法研究所管制システム部 shioji@enri.go.jp

*** JIP テクノサイエンス株式会社システム技術研究所 kazuhisa_niwa@cm.jip-ts.co.jp

**** 沖電気工業株式会社 yauchi427@oki.com

2.1 シミュレータの概要と構成

本シミュレータは、解析対象となる個々の船舶に対して船長の行動を決定するエキスパートシステムを備えていることが特徴であり、船長の知識や法規など航行に必要な知識ベース、湾岸線データなど海域に関するデータベース、航路の設定や推進などに関する航路データベース、その海域を航行する船舶の交通容量に関する統計データベース、そして、船種ごとに参照する船舶の運動性能に関するデータベース、などのデータベース群を総合的に用いて船舶の航行シミュレーションを行う。シミュレーション結果は出力データベースに蓄積され、アニメーション表示などを用いて多様な分析・評価に活用される。

2.2 シミュレータの機能

本シミュレータは以下に示す機能を有している。

- ・ 海域設定として海上保安庁水路部発行の海岸線データとデータ互換性をもつので基本的にはどの海域も容易に設定できる。さらに、設定した海域データをデータベースに記憶・保存し、シミュレーションに再利用でき、それらを参照・追加・変更・削除できる。
- ・ 船舶としてはいくつかの母型船データをデータベースに保持していて、その船速特性、旋回特性、操舵特性等に関わる各種船舶性能諸元を、必要に応じて、任意に参照・追加・変更・削除できる。さらに、船舶毎に、AIS 交信可否を設定できる。
- ・ 交通流／航行環境としては、解析対象海域内の任意の場所にゲートを設置し、船舶発生頻度を船種別に設定できる。Table 1 はこうした OD (Origin-Destination) 表の一例である。さらに、発生させる船舶毎の変針点の位置と数を任意に設定できる。
- ・ 船長機能として、自船の設定変針点にしたがって目標点に自動航行しつつ、周辺海域を航行する他船の動きや海域状況に応じて、航行規則に従って必要に応じた衝突回避や座礁回避を行することができる。

Table 1 OD 表

OD		Ratio of Ships (%)							
Origin	Destination	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F	Type G	Total
Kisarazu	Katsuyama	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Kokubo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Miyazu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Kimitsu	0.00	75.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Kisarazu	0.00	28.57	14.29	14.29	42.86	0.00	0.00	0.00
	Ichikawa	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Chiba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Funabashi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Hanedakita	0.00	75.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Tamagawa	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Kawasaki	0.00	85.71	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Tsurumi	14.29	71.43	14.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Yokohama	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

3. 自動航行システム

3.1 自動航行システムの概要

前述した幅狭海域船舶航行シミュレータのもとになるのは、1 隻の船に対する自動航行システム (SAFES : Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System) で、次の 4 つの要素から構成される。

- ・ 船舶の発生
- ・ 操船判断
- ・ 操船方法
- ・ 船舶の運動 (航行)

3.2 船舶の発生

それぞれのゲートから、与えられた平均到着時間間隔をもとにポアソン分布にしたがい船舶が発生させる。

3.3 操船判断

自船と他船の関係を認識し、その状況により「通常」、「避航」、「追い越し」の操船判断を行う。優先度の高い順に並べると「避航」、「追い越し」、「通常」となる。

(1) 避航判定

避航判定には、二船間の $DCPA$ (Distance of Closest Point Approach: 最接近距離) と $TCPA$ (Time of Closest Point Approach: 最接近時間) を用いる。Fig. 1 は二船間の衝突危険度判定のもととなる最接近距離 $DCPA$ と最接近時間 $TCPA$ を説明したものである。ここに、 D : 二船間の距離、 V : 自船の速力、 V_t : 相手船の速力、 α : 自船から見た相手船の相対角、 β : 相手船から見た自船の相対角、 ϕ : 出合い角である。

衝突危険度 CR は $DCPA$ と $TCPA$ から Fuzzy 推論される。任意の大きさの船舶を扱うように、 $DCPA$ は自船の船長 L で無次元化されている。ただし、自船が避航義務船である場合は、自船と相手船で大きい方の L を用いて無次元化を行う。

周辺海域には多数の船舶が存在するので、それぞれの船舶に対して衝突の危険がある船舶は複数存在すると考えられる。したがって、エキスパートシステムはすべての組み合わせについてそれぞれの衝突危険度 CR を判定し、避航対象となる船舶を選択する。

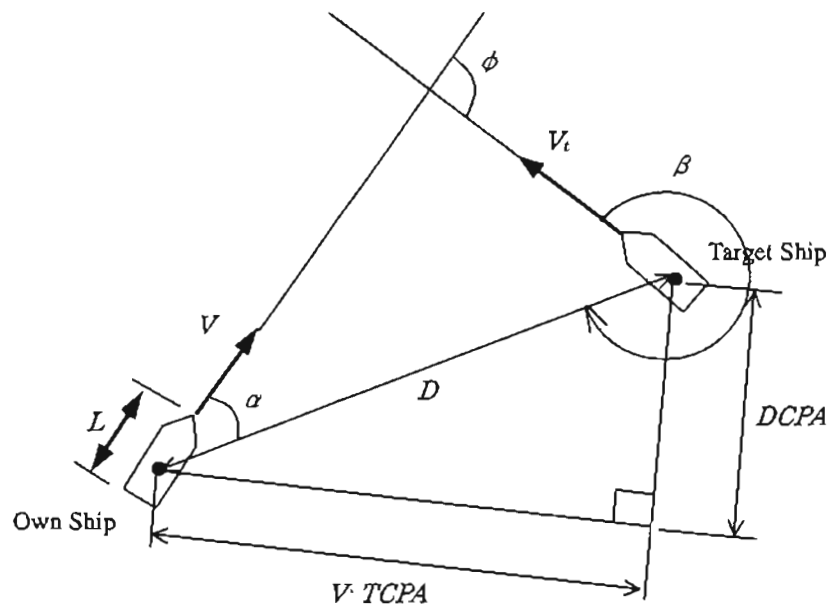


Fig.1 自船と対象船の関係

(2) 追い越し判定

前方を航行中の遅い船舶に対して、自船の周囲に立入禁止領域を定め、この領域内にその船舶が入らないように追い越しを行う。追い越しについては、見合関係(追い越し)と船速を比較して判定する。また、自船周囲の立入禁止領域については十分航過距離をもとに長方形領域を設定した。

(3) 通常航行

以上の「避航判定」と「追い越し判定」に該当しないものを「通常」と判定する。それぞれの状態に対応する操船方法を次節で示す。

3.4 操船方法

すべての船舶に対して指令針路と指令速力を与え、以下の操船を行う。

(1) 通常操船

通常の操船は、与えられた設定経路にしたがって航行する。設定経路とは変針点を直線で結んだものである。したがって、変針点を目指して航行していくが、変針点付近では Fuzzy 推論を用いて滑らかに変針させている。

(2) 追い越し操船

追い越し判定がなされた船舶は自船より左側にいる船舶を追い越す場合は右側を、逆の場合には左側を追い越す。追い越し時の指令針路として、通常操船の現在針路に対して 30° の針路変更命令を与える。

(3) 避航操船

避航操船は、衝突危険度 CR が 0.7 から 0.85 のとき、相手船との見合関係をもとに操船方法が決定される。 CR が 0.85 以上のときは、自船が権利船であっても、相手船との見合関係をもとに操船方法および減速の有無を決定する。

3.5 船舶の運動（航行）

運動方程式は、旋回角速度、船速、操舵をそれぞれ一次遅れとして表現した。それぞれの運動方程式を以下に示す。

$$T_r \dot{r} = K\delta \quad (1)$$

$$T_v \dot{V} = V_{order} \quad (2)$$

$$T_E \dot{\delta} = \delta_{order} \quad (3)$$

ここで、 V ：船速、 V_{order} ：指令船速、 r ：旋回角速度、 δ ：舵角、 δ_{order} ：指令舵角、 K と T ：操縦性指数、 T_E ：操舵機の時定数、 T_v ：船速の時定数である。

操舵については、次式を用いて針路誤差および旋回角速度より PD 制御を行う。

$$\delta_{order} = C_1 \psi_e - C_2 r \quad (4)$$

$$C_1 = K_p \quad (5)$$

$$C_2 = T_d = \left(2\sqrt{KK_p T} \xi - 1 \right) \frac{1}{KK_p} \quad (6)$$

ここで、定数 K_p および ξ は経験的な数値として、それぞれ 1.5 および 0.9 とした。

4. 船舶航行シミュレータの応用

開発したシミュレータを使って、大阪湾、伊勢湾、東京湾を対象とした船舶の交通流シミュレーションを実施した。Fig. 2～Fig. 7 に、ある時点での航行状況を示す。図中、各船舶はその大きさにかかわらず直径 500m の○印でプロットしている。航行状態に応じて緑色、青色、赤色で色分けされており、それぞれ通常、追い越し、避航を表している。また、○印から延びる矢印は、その方向と長さがそれぞれ針路と船速を表している。

大阪湾と東京湾は世界有数の過密海域であり、特に Fig. 3 に示す明石海峡付近と Fig. 7 に示す浦賀水道付近では多数の船舶が集中する輻輳海域となっていることがわかる。一方、大阪湾や東京湾に比べて絶対船舶数が少ない伊勢湾でも、外洋との往来には狭い伊良湖水道を通らざるをえず、操船の難所の一つと位置づけられる。



Fig.2 大阪湾における船舶航行状況

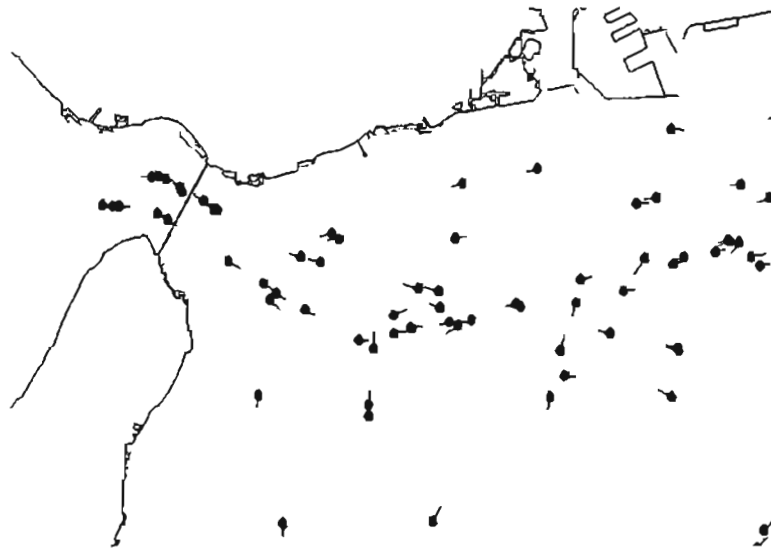


Fig.3 明石海峡付近の船舶航行状況

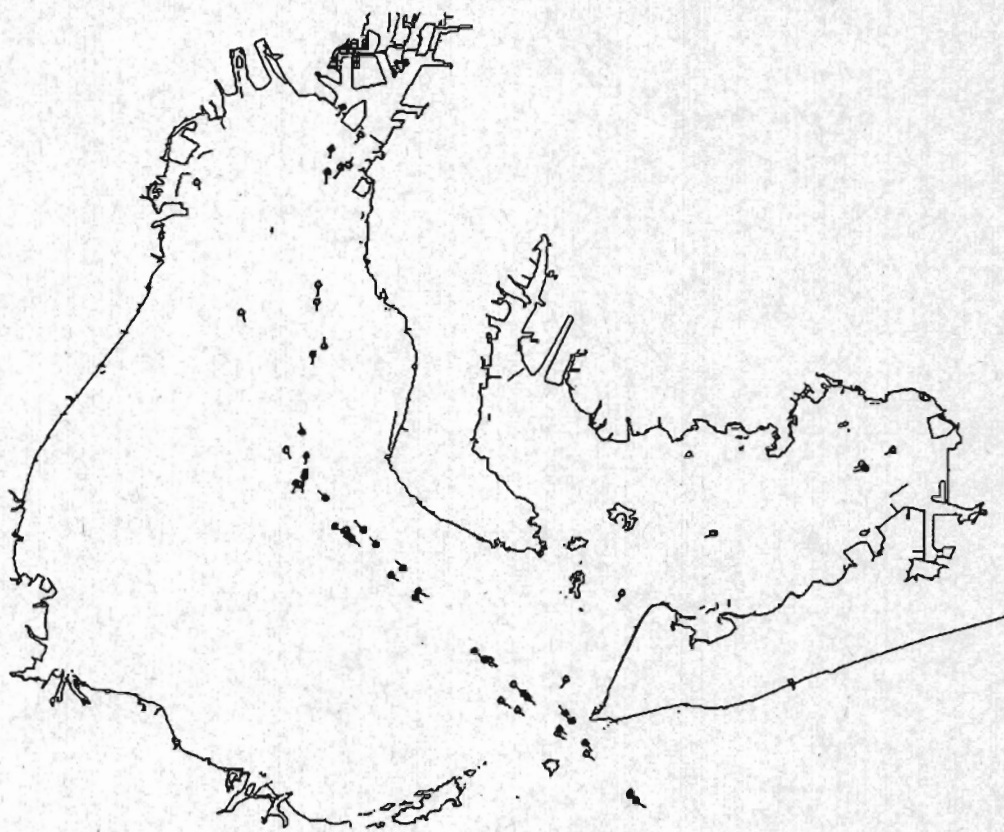


Fig.4 伊勢湾における船舶航行状況

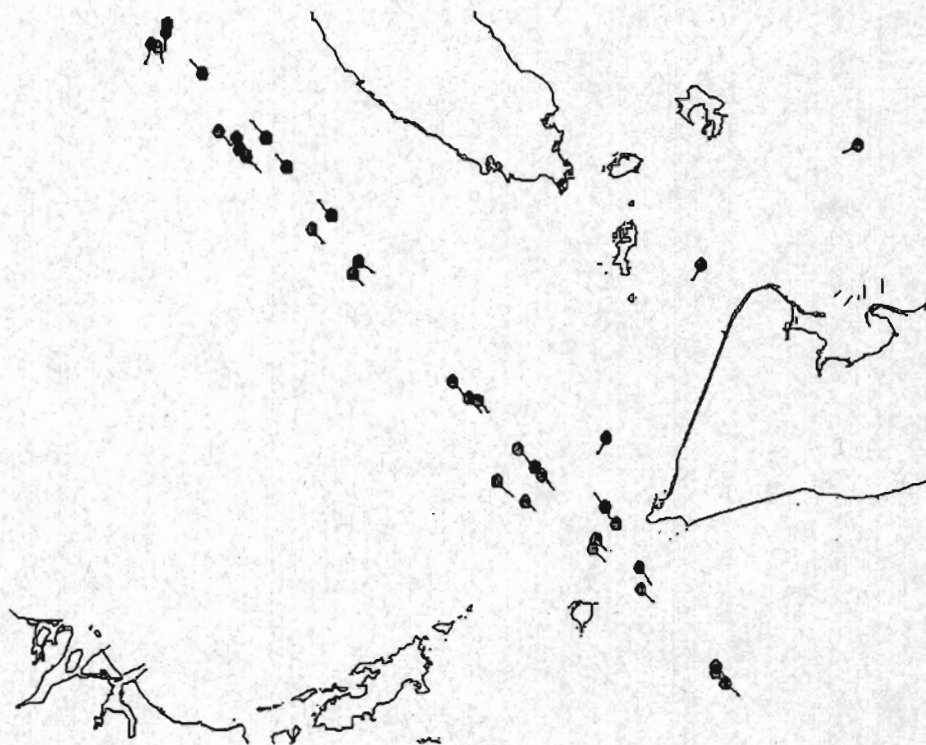


Fig.5 伊良湖水道付近の船舶航行状況



Fig.6 東京湾における船舶航行状況

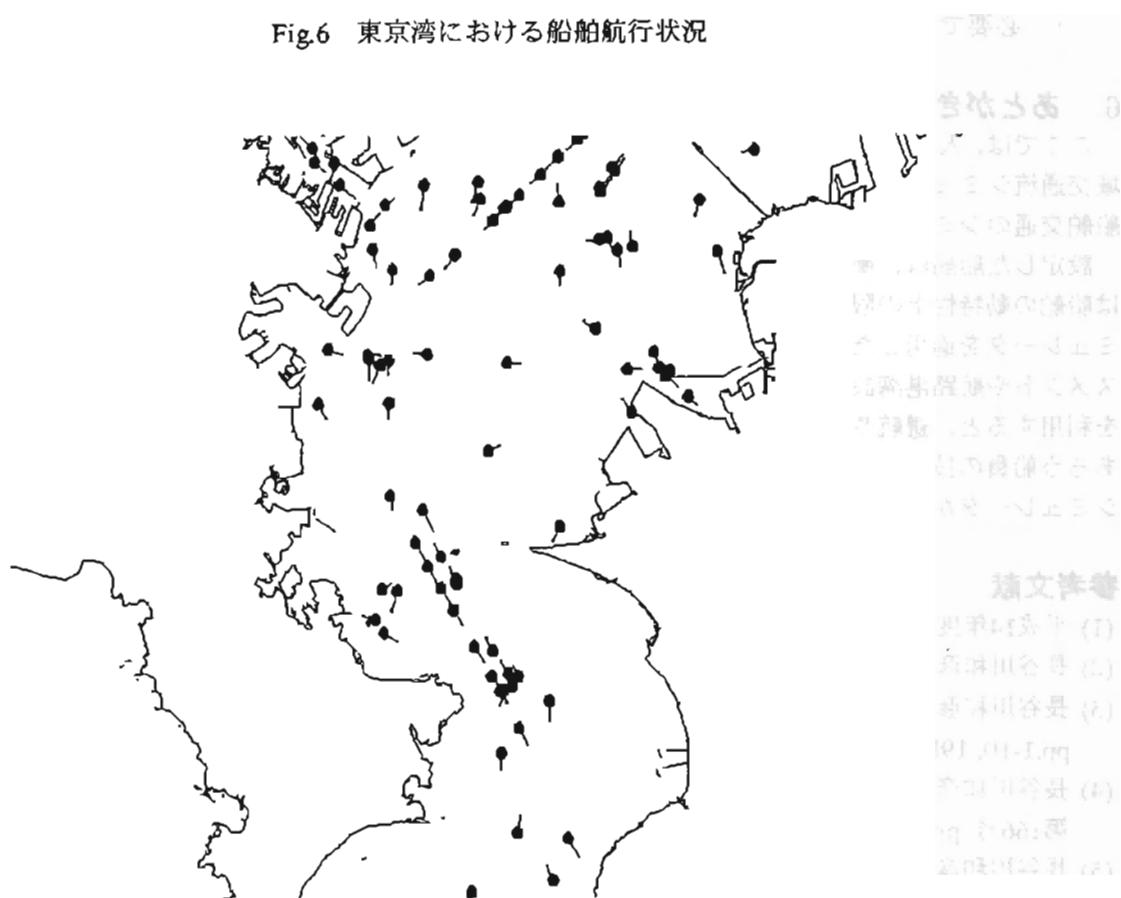


Fig.7 浦賀水道付近の船舶航行状況

5. AIS 陸上局の配備に関するシミュレーション方法

AIS 陸上局を経済的・合理的に配置するためには、サービス海域における総交信数を把握するだけでは不十分で、発信頻度が高い海域を的確に特定してオーバーフローを未然に防がなければならない。本シミュレータを適用すれば、周辺海域の複数船舶の相互干渉を考慮した船舶航行をシミュレーションできるので、AIS 交信数をその交信位置とともに正確に把握することができる。特に、避航措置が多いと考えられる輻輳海域に対する予測には有効な手段である。

5.1 AIS 通報間隔の設定

船舶は、クラス A とクラス B 船舶に分けることができる。クラス A 船舶とは、SOLAS 条約において規定されたすべての旅客船、国際航海に従事する 300Gt 以上の船舶、国際航海に従事しない 500Gt 以上の貨物船である。クラス B 船舶とは、非 SOLAS 船と小型船舶（漁船・プレジャーボートなど）である。

AIS 通報間隔⁽¹²⁾ はクラス別に設定されているので、シミュレーション対象となる船種ごとに設定する。なお、錨泊中の船舶に対しても定期的に通報義務があるため、これを考慮する。

5.2 AIS 交信数の予測方法

AIS 陸上局の適切配置を求めるためには、AIS 交信数をできるだけ正確に把握する必要がある。以下の方法でシミュレーションを実施する。

- ・ 解析対象海域の実態調査あるいは予測をもとに、時間帯を考慮した OD 表を作成する。
- ・ 上述の AIS 通報間隔を船種ごとに設定する。
- ・ 0 時～24 時までのシミュレーションを繰り返し、AIS 交信数がピークとなる時間帯を探す。
- ・ ピークとなる時間帯に対して、シミュレーションを繰り返し、AIS 交信数の最大を統計的に求める。
- ・ AIS 交信数から適切な AIS スロット数を算出する。
- ・ 必要であれば海域を分割し、それぞれの海域に対して同様の検討を行う。

6. あとがき

ここでは、人工知能により変針・減速等の操船判断を行うことができる自動航行システムを備えた、輻輳海域交通流シミュレータの機能について紹介した。このシミュレータを大阪湾、伊勢湾、東京湾に適用して、船舶交通のシミュレーションを行った。

設定した船舶は、衝突の危険性が高くなると自動的に避航する。こうした危険は交通容量や航路上あるいは船舶の動特性上の限界による不可抗力と考えられる。このような不可抗力を発生させる潜在的因子は本シミュレータを適用した詳細な分析により正確に解明できることから、このシミュレータは航行の安全性アセスメントや航路港湾設計に大いに役立つものと考えられる。さらに、シミュレータに備わっている船長機能を利用すると、避航や追い越しなどの操船判断のレベルを任意に設定できることから、近い将来に起こるであろう船員の技能低下による影響やそれをカバーすべく開発される航行援助システムの評価に対してもこのシミュレータが威力を発揮するものと期待されている。

参考文献

- (1) 平成14年度国土交通白書, 国土交通省, 2002.
- (2) 長谷川和彦: 海のITSと自動化の皮肉, Engineering News, 大阪大学, 15, 2001.
- (3) 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.
- (4) 長谷川和彦, 上月明彦, 他: 船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES), 日本造船学会論文集, 第166号, pp.445-452, 1989/12.
- (5) 長谷川和彦, 藤田陽一: 船舶自動航行エキスパートシステムの狭水路航行アセスメントへの適用, 関西造船協会誌, 第220号, 1993/9.
- (6) 長谷川和彦, 桐谷誠司, 立川功二: 輻輳海域シミュレータによる代替航路評価, 関西造船協会講演論文集, 第16号, pp.71-74, 2001/5.

- (7) 長谷川和彦, 田代 剛, 立川功二: 仮想海上交通センターによる航海支援システム, 関西造船協会講演論文集, 第16号, pp.75-79, 2001/5.
- (8) 長谷川和彦, 佐伯敏朗: 海のITS - 幅狭海域交通流シミュレーター, 日本機械学会関西支部第77期定時総会講演会講演論文集, No.024-1, (JSME Kansai), 4-13-14, 2002/3.
- (9) 長谷川和彦, 立川功二: 幅狭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講演論文集, pp.184-189, 2001/10.
- (10) K. Hasegawa, T. Pimentel, S. Yokoyama and S. Taniguchi : Intelligent Marine Traffic Simulator for Congested Waterways, IA'02 Proc. of International Symposium for Young Researchers on Modeling and their Applications, pp.181-186, 2002/10.
- (11) M. Endo and K. Hasegawa: Passage Planning System for Small Inland Vessels Based on Standard Paradigms and Maneuvers of Experts, Proc. of International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability (MARSIM'03), Vol. II RB-19-1-RB-19-9, Kanazawa, Japan, 2003/8, (in English).
- (12) 矢内崇雅: AISに関する国際的な標準化, AISセミナー資料「AISの現状と展望」, AIS研究会, pp.1-1-1-6, 2004/1.