

## 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\*

正会員 長谷川 和 彦\*\*, 正会員 藤 田 陽 一\*\*\*

### An Extension of Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System for Safety Assessment of Narrow Waterway Navigation

By Kazuhiko HASEGAWA (Member) and Yoichi FUJITA (Member)

The extended system of Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES) is proposed, which is applicable even for narrow and congested waterways. SAFES is an expert system using fuzzy reasoning and control as well as regulations, captain's experiences and knowledge as knowledge bases. It also includes the visual information understanding for waterway boundary detection. The system is applied for safety assessment of a waterway design, combining with marine traffic simulation system. In this method, the assessment can be done qualitatively, quantitatively and statistically. The alternatives of the waterway design can be evaluated, considering the effect of traffic.

**Keywords** : Automatic Navigation System, Expert System, Fuzzy System,  
Safety Assessment, Waterway Design

#### 1. 緒 言

近年、運航機器の自動化や性能向上には著しいものがある。しかし、機器が自動化しただけでは安全は保証されない。その機器を使用してまた監視するのが人間であるからである。多くの場合、自動化システムはかえって人間の負担を大きくする「自動化の皮肉」<sup>1)</sup>を伴うことになる。

1967年に英仏海峡で起きたTorry Canyon号の座礁事故を契機に開発され、その搭載が義務づけられた衝突予防援助装置(ARPA)がよい例である。確かに今までレーダ上で手作業で行っていたレーダプロットングと呼ばれる作業を自動で行い、しかもある距離以内に近接してきたら警報で知らせてくれるのであるから、乗組員の負担は軽減し航行の安全性は向上したはずである。

しかし、この装置は東京湾や大阪湾、瀬戸内海といった世界有数の超過密海域を念頭においていなかったのか常に警報が鳴りっぱなしのため、実際には警報が鳴らないようにして使用しているなどの問題点も多い<sup>2)</sup>。

自動化システムを計画するにあたってはそれが使用される状況、そして人間がそのシステムにどのレベルで関わるか<sup>3)</sup>を充分検討した上で設計し、導入すべきである。

著者らは、ファジィ推論・制御とエキスパートシステムを用いた船舶の自動航行システムに関する研究を行っている<sup>4,5)</sup>が、最近ではむしろ航行環境の模擬<sup>6)</sup>や航行アセスメントへの応用<sup>7)</sup>を主眼とした研究に興味に移りつつあるのもこのためである。本報では、さらに狭水路航行に適したシステムへの拡張を行うとともに、狭水路航行アセスメントへの適用を行ったので報告する。

#### 2. 自動航行システム SAFES の拡張

本システム(SAFES: Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System)の基本部分はすでに文献<sup>4,5)</sup>に記載したとおりである。すなわち、次の各部により構成されている。

1. 避航指令部
  - (a) 他船避航
  - (b) 航路避航

2. 航路指令部
3. 操舵指令部

今回、拡張したのは次の各項目である。

1. 衝突危険度の無次元化(相対的評価)

\* 平成5年5月28日 関西造船協会春季講演会において講演、原稿受付平成5年6月16日

\*\* 大阪大学工学部

\*\*\* 三菱電機(株)、研究当時大阪大学工学部

2. 避航開始時の第3船行動の監視
3. 2重追越しの禁止(減速ルール)
4. 変針点付近での航路境界の検出(曲がり角ルール)

以下、拡張部分のみについて説明するが再整理した知識ベースについては、文献<sup>10)</sup>を参照されたい。

### 2.1 衝突危険度の無次元化

避航の判定基準には様々な方法が提案されている。本研究では前報<sup>4,5)</sup>同様、最接近時間 $TCPA$ 及び最接近距離 $DCPA$ を用いているが、さらにそれらを無次元化して避航判断要素としファジィ推論により衝突危険度を求めた。

すなわち、この $TCPA$ 及び $DCPA$ は、自船と相手船との相対的なものであり、実際には自船と相手船では大きさや速度が異なるため、それぞれの船に対する $TCPA$

$$TCPA' = T CPA \frac{V_r}{L} \quad \dots\dots(1)$$

$$DCPA' = \frac{DCPA}{L} \quad \dots\dots(2)$$

及び $DCPA$ が存在するはずである。そこで、平野ら<sup>8)</sup>と同様に次式により $TCPA$ 及び $DCPA$ を無次元化する。ただし、

$TCPA$  : 最接近時間(sec)

$DCPA$  : 最接近距離(m)

$V_r$  : 自船と相手船との相対速度(m/sec)

$L$  : 自船の船長(m)

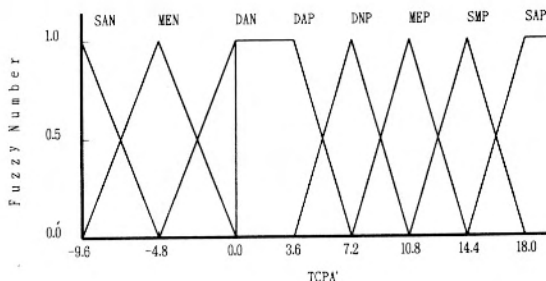


Fig. 1 Membership function of  $TCPA'$

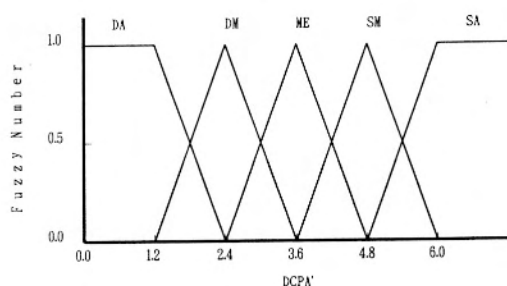


Fig. 2 Membership function of  $DCPA'$

この $TCPA'$ 及び $DCPA'$ を要素として、ファジィ推論により衝突危険度( $CR$ )を求める<sup>4)</sup>。その際用いた $TCPA'$ 、 $DCPA'$ のメンバーシップ関数をFig. 1とFig. 2に示す。 $CR$ については前報<sup>4)</sup>と同じ、制御規則については $TCPA$ と $DCPA$ をそれぞれ無次元値に置き換えて読めばよい。

### 2.2 航路との避航

#### 2.2.1 航路境界からの近さ

狭い海域での航行を考えると、航路逸脱は航法の不遵守のみならず、座礁を伴う危険性があるので回避しなければならない。航路境界からの近さも前報<sup>5)</sup>と同様に扱った。すなわち、自船が航行中、その針路の方向に直線をのぼし、航路境界線との交点を求める。この交点を自船とともに並進する相手船とみなし、その相手船に対する衝突危険度として「航路境界からの近さ」を求める。避航対象としては航路も船も同等とみなしている。ただし、この場合 $DCPA$ は常に0となり、航路からの物理的な近さを表せない。航路と自船の垂直距離を併用することにより、航路と並行に進んでいる場合( $TCPA = \infty$ )に航路から100m離れている場合と20mの時の近さの差が有意に判定できる。

この航路境界からの近さを航路衝突危険度( $BCR$ : Bank Collision Risk)と呼ぶことにする。

#### 2.2.2 変針点付近での航路境界の検出

自船が変針点付近にいるとき、上に述べた航路衝突危険度では充分でない。すなわち、衝突危険度のもととなる $TCPA$ と $DCPA$ には前提として自船及び相手船が現在の針路と速度を維持するものとみなしているからである。

ここでは次のような判断を行った。本報より $RD$ (reference degree, 参照度)と称する次の変針点との「近さ」(以前の $CDH$ <sup>4)</sup>)がある値以上になるとその変針点に自船があり、その次の変針点に向かっているものと仮定して、仮想航路衝突危険度( $VBCR$ : Virtual Bank Collision Risk)を求める。この $VBCR$ を求めることによって、船にある程度の航路の形の「予測」をさせることができる。人間なら自然に行っている視覚情報の理解が意外と難しいことを感じさせる一面である。

航路に対する判定は結局次のようになる。

1.  $BCR$ がある設定値以上なら、航路に対する避航をnominateする。  
(実際に避航するかどうかは他の航行船舶や他の航路との衝突危険度によるのでこの段階ではわからない。)
2.  $RD$ により、次の目標針路を指示する。
3.  $RD$ がある設定値以上なら、 $VBCR$ を求め、それもある設定値以上なら減速を指示する。

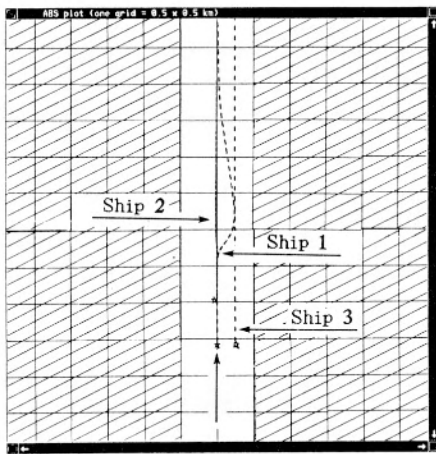


Fig. 3 Prevention of double overtaking in a narrow channel

### 3. 自動航行システムのシミュレーション

#### 3.1 狭水路シミュレーション

本システムの検証のため、2船あるいは3船が狭水路を航行するシミュレーションを行った。実際には、さらにシミュレーション画面をコマ撮りしてアニメーションビデオを作成しておりその画面を見ないと時々刻々のようすがわかりにくい以下に2例を示す。

Fig. 3は3船が狭水路で追い越しを行う場合のシミュレーション結果である。Ship 2が先行の遅い船であり、Ship 1がそれを追い越そうとしている。ところがその右側をShip 3が同じ船速で通過しているのでShip 1は減速してShip 3が行き過ぎるのを待ってから船速を戻して追い越し、原針路に復帰している。

なお、グリッドは500m間隔であり、Ship 1は船長

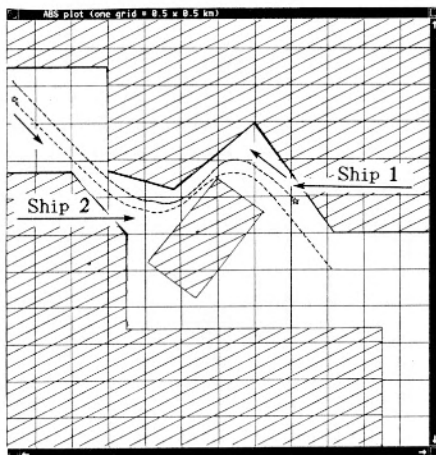


Fig. 4 Meeting in a narrow and curved channel

72m, Ship 2, Ship 3は船長62mで船影は実寸であり、30秒間隔でプロットしてある。

他にも航路幅が広い場合、航路を横切る他船がある場合、航路が「く」の字の場合で追い越しおよび横切りが航路の屈曲点付近の場合などのシミュレーションを行い、二重追い越しの禁止ルールおよび航路境界の判断ルールが正常に機能しているかどうかの検定を行った。

Fig. 4は総合的な検証を行うためのシミュレーション結果であり、2船が屈曲した航路の途中で行き合う場合の例である。Ship 1は西行船で第1の変針点付近で減速し、その後第2の変針点通過後にShip 2との避航を行い、避航後にもとの船速に復帰して狭水路を通過している。一方、Ship 2は東行船であるが、変針、避航ともに原船速のまま行っている。

#### 3.2 交通流シミュレーション

交通流シミュレーションとは、より現実的な航路状況のシミュレーションや航路の評価、航行アセスメントのため行われるシミュレーションであり、種々の方法が提案されているが、ここでは文献<sup>7)</sup>で用いた方法にならって、通航船舶の発生及び消去を行った。

##### 3.2.1 船の発生と消去

各航路 $k$ のスタート位置にGATE $_k$ を置き、そこから与えられた平均到着時間間隔 $T_{EXk}$ のポアソン分布にしたがって、船を発生させる。すなわち、各船の到着時間間隔は、式で与えられる。

$$t_{aki} = -T_{EXk} \times \log(r_i) \quad \dots\dots(3)$$

ここで、

$T_{EXk}$ : 航路 $k$ の平均到着時間間隔(期待値)

$r_i$ :  $0.0 < r_i \leq 1.0$ であるような一様乱数  
( $i$ は試行回数)

$t_{aki}$ : 航路 $k$ の $i$ 番目の船の到着時間

一度発生した船は消去用のGATEを通過するか、または航路境界に乗り上げたとき、消去する。

##### 3.2.2 船の特性と速度分布

各船の速度は、以下の式を利用して求めた。

$$V = V_{STD} \times \left( \sum_{i=1}^{12} r_i - 6.0 \right) + V_{EX} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、

$V_{STD}$ : 速度の標準偏差

$r_i$ :  $0.0 < r_i \leq 1.0$ であるような一様乱数  
( $i=1, \dots, 12$ )

$V_{EX}$ : 度の平均値(期待値)

$V$ : 船の速度

また、船の主要寸法、操縦性指数( $K, T$ : 野本の $KT$ モデルの指数,  $T_V$ : 船速の応答方程式の時定数)については母型船をいくつか選んでおき、そのどれかを任意に選択した後、(4)式と同様にその値に正規的なばらつきを

与える。

### 3.2.3 安全性評価の指標

シミュレーション結果はコマ撮りしたビデオテープの再生画面により全体的に判断するとともに、各船の状況等種々の状態を示すモニター画面により、時々刻々交通管制センター的に通航状態全体の監視が行えるようになっている。また、安全性評価のため次の2点を表示している。

- 航路から逸脱した場所とその累積件数
- ニアミスの起きた場所とその累積件数

ここで、ニアミスとは、いずれかの船の衝突危険度が0.9を越えたときをいい、いわゆる衝突事故ではない。しかし、安全性のアセスメントには重要な要素となる。

航路からの逸脱、他船とのニアミスともその事象の発生した場所が画面上に累積して表示されるため確率的に事故が起りやすい場所を定性的にも指摘することができる。

### 3.2.4 シミュレーション結果

Fig. 5は、Fig. 4の航路で平均到着時間間隔15分のポアソン分布、船速が $6.2 \pm 1.0$ (knot)の正規分布で行った結果である。

図中ABS(trace)plotと書いてあるいちばん大きな画面が現在までのすべての通航船舶の航跡をプロットしたものである。ABS(no trace)plotと書いてある左下の画面は現時点で航路内に存在する船舶の位置を示しており、現在、西行船が3船、東行船が2船いることがわか

る。一方、NEARMISS plotと書いてある右下の画面ではニアミスの発生点を○印で、航路境界を逸脱した点を×印でプロットしてある。

これを見るとこのように屈曲部が大きくまた狭い航路ではかなりの頻度で危険な見合い関係が生じることがわかる。しかし、意外と航路の逸脱は少なく(4件)、本報で拡張した2重追い越しの禁止や見通しの悪い航路での航路予測ルールなどがうまく機能しているものと思われる。

いずれにしても、こういった航路では屈曲部の2方向航行は交通量が増えるとかかなり危険であるといえる。

そこで、代替案として航路中央の島の南西部を東行航路として整備し、屈曲部の航路を分離することが考えられる<sup>9)</sup>。この航路の安全性を本報の手法で確認した(Fig. 6)。

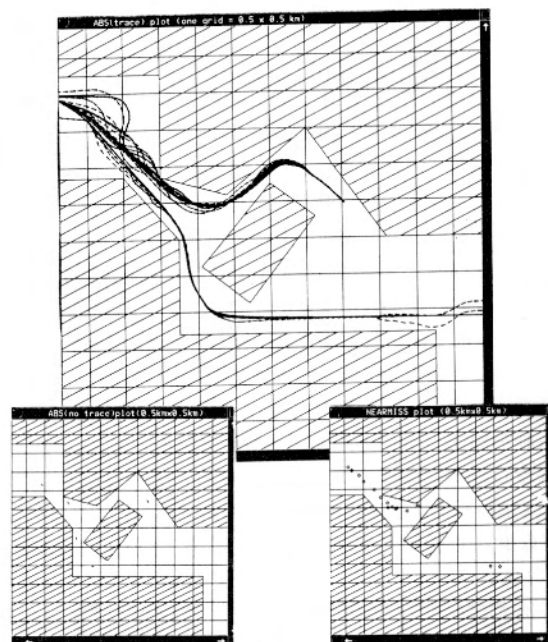


Fig. 6 Marine traffic flow simulation (one-way)

当然のことながら屈曲部でのニアミスはほぼなくなったものの航路西端部において追い越しなどの状況のためのニアミスが発生しており、「安全の余裕が新たな危険を生む」ことを示唆している。しかし、代替案は屈曲部での転換を軽減し(航路逸脱は0件)、より安全な航路であることが定性的にも定量的にも容易に把握できる。

### 3.2.5 安全性評価法としての評価

このように本手法を用いると、まったく同一条件で船が発生させ、かつ、航路の状況に応じて各船が行動を決定するため、航路の形状や航行条件の影響を調査することができる。

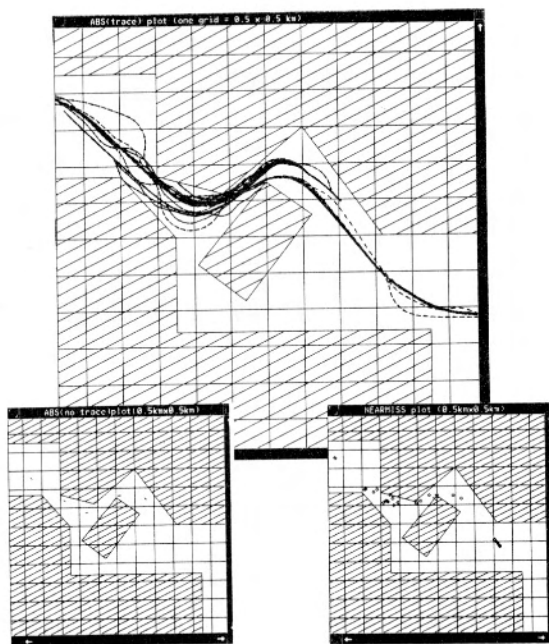


Fig. 5 Marine traffic flow simulation (two-way)

この他にも、次のような項目の安全性への影響を調査することができる。

- 通航量
- 船の種類や特性
- 操船者機能(質)

今後の問題としては次のような配慮が必要となろう。

- 風や潮流の影響を加味できる運動モデルの導入
- 自船および他船、そして、航路境界の位置情報の現実的な抽出手法
- シミュレーション結果の定量的統計解析手法

#### 4. 結 言

本研究では前報<sup>4,5)</sup>で述べた方法を拡張してより狭水路航行に適した自動航行エキスパートシステムを提案するとともに、その応用として狭水路航行の航行安全アセスメントへ適用した例を示した。本研究で得られた主な結論を述べる。

- (1) 狭水路航行に適した自動航行システムを開発し、シミュレーションによってその有効性を確かめた。
- (2) さらに、本システムを海上交通流シミュレーションシステム<sup>7)</sup>に組み込むことにより、狭水路航行の航行安全アセスメントが定性的、定量的かつ統計的に取り扱えることがわかった。
- (3) 本システムを操船シミュレータに組み込むか、ワークステーション上に簡易的な操船シミュレータを構築することによって、よりリアルな輻輳域での狭水路航行シミュレータとしての活用が期待できる<sup>6)</sup>。

さらに、今後に残された課題とシステムの発展性については次のことがいえる。

- (1) 今回は計算時間の問題があり、簡易的な操縦運動モデルを使用したのが、より厳密な操縦運動モデル、そして潮流や風の外乱を含む必要の可否について議論する必要がある。
- (2) 航行アセスメントとして適用する際には、シミュレーション結果の表示及びデータの整理・処理方法についてさらに検討する必要がある。
- (3) 本システムは現在EWS上に構築されており、実時間とほぼ同等の計算時間がかかるが、ワークステーションネットワーク上に分散することにより上で述べた問題点の解決を始め、今後の発展がより期待で

きる。

#### 参 考 文 献

- 1) L. Bainbridge : "Ironies of Automation", in *New Technology and Human Error*, Wiley, pp.271-283, 1987.
- 2) 長谷川和彦, 山下 庸: 船舶の衝突予防援助装置の利用実態と問題点, 第17回安全工学シンポジウム, 東京, pp.~69-72, 1987年7月.
- 3) 稲垣敏之: 誰のための自動化?, 計測と制御, 第32巻, 第3号, pp.181-186, 1993年3月.
- 4) 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年6月.
- 5) 長谷川和彦, 上月明彦, 村松 徹, 小峰 博文, 渡部勇治: 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年12月.
- 6) K. Kose, K. Hasegawa, H. Iwasaki and F. Ohkawa: "On an Intelligent Harbour Maneuvering Simulator and its Applications", Proc. of MARSIM & ICSM 90, pp.151-158, Tokyo, June, 1990.
- 7) K. Hasegawa: "An Intelligent Marine Traffic Evaluation System for Harbour and Waterway Designs", Proc. of ISME KOBE '90, pp.G.1.7-G.1.14, Kobe, Oct., 1990.
- 8) 平野研一, 岡本康裕, 奥田成幸, 新井康夫: 視程の変化による操船者への影響, 日本航海学会論文集, 第88号, pp.19-30, 1993年3月.
- 9) K. Hasegawa: "Automatic Navigator-included Simulation for Narrow and Congested Waterways", Proc. of Ninth Ship Control Systems Symposium(SCSS), Vo.2, pp.2.110-2.134, Bethesda, U.S.A., Sep., 1990.
- 10) K. Hasegawa: "Knowledge-based Automatic Navigation System for Harbour Manoeuvring", Proc. of Tenth SCSS, (to appear), Ottawa, Oct., 1993.