特集
ファジィ・
コントローラ

船舶衝突回避システムへのファジィの応用

大阪大学
長谷川　和彦*

人間は元来，横着にできている。そして多くの場合，そのことが予想以上に役立っている。

ファジィ制御とは，少々乱暴ないい方かも知れないが，複雑なシステムをがむしゃらに抑えつけて制御するのではなく，そういった人間のもつ横着さを見習ってずぼらに，しかし，無駄なく制御しようという，逆の発想から生まれたものである。

ここでは，船舶の運航の中でももっとも人間的な判断・行動が要求される衝突回避動作を例に取り上げ，それがファジィ推論，ファジィ制御を用いることによって，いかに自動化できるかの試み[1]を紹介してみる。そして，その過程を通じてマン・マシンシステムの制御問題，人間の判断をどうシステムに取込むか，などについて考えてみたい。

*：同大学　工学部　造船学科　講師
工学博士
〒565　吹田市山田丘2−1
☎(06)877-5111

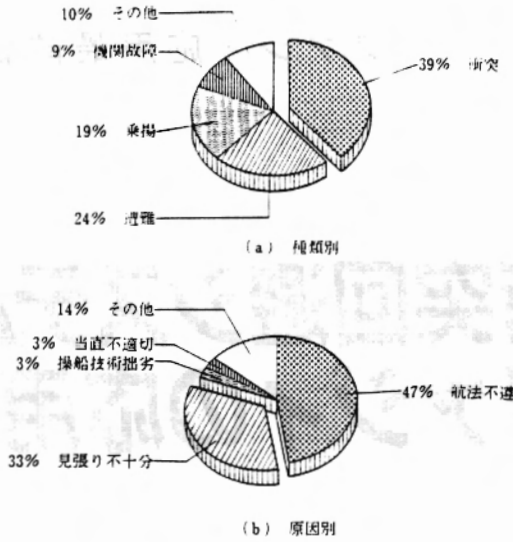
1. 衝突事故はフィールダースチョイス？

船は小型の漁船などを除けば，その慣性力の大きさゆえ一般に運動の時定数が大きい。しかも，大型タンカーなどにおいては針路不安定の場合が多々ある。したがって，舵を取ってから実際に船が回頭しだすまでに数十秒かかるのが普通て，船が回頭し始めてからその回頭を抑えるために反対方向に舵を取っていたのでは，遅すぎて自励発振と呼ばれる“自分の起こした舵航”の原因となる。反対に，いちいち外乱に対して舵を取っても針路制御に役立たないばかりか，操舵による抵抗増加の原因となる。大型船においては，「賢い怠け者の舵取り」が要求される。

一方，人間のもつ横着さが災いすることも多い。去る7月23日に浦賀水道で起こった大型釣り船「第一富士丸」の衝突・沈没事故は，30名の死者を出したこと，衝突したのが海上自衛隊の最新鋭潜水艦「なだしお」であったことや，世界でもっとも過密な航路の1つで起こったことなどから社会的関心を呼び，新聞・テレビなどの報道でご存じの方も多いと思う。この事故の原因究明については（執筆時現在）海上保安庁を中心に行なわれているので断定はできないが。「なだしお」側の見張り不十分，見込み操船という見方が有力である。

元来，水面下で行動する潜水艦が浮上して（方向舵が半分水面上に出るので舵効きが半減し），しかも過密航路を横断する場面というのは，航空機でいうなら片肺着陸，卑近なたとえでいうなら「9回裏1アウト満塁1点リード」でのピッチャーの心境であろう。このときに塁上の走者（第一富士丸）の動きを見落とし，しかもボテボテのピッチャーゴロ（クルーズヨット）に惑わされてダブルプレーを狙い，本塁送球，暴投，サヨナラ負けでは，ピッチャーのエラー，フィールダースチョイスとなるのは当り前である。

話が横道にそれたが，この事故が起こった7月23日を含む1週間に海難事故が49件（海上保安庁調べ）あった。他の事故はほとんど報道もされていないが，このうち実に47%に当たる23件



◀図1 海難事故統計（昭和61年，海上保安庁調べ）

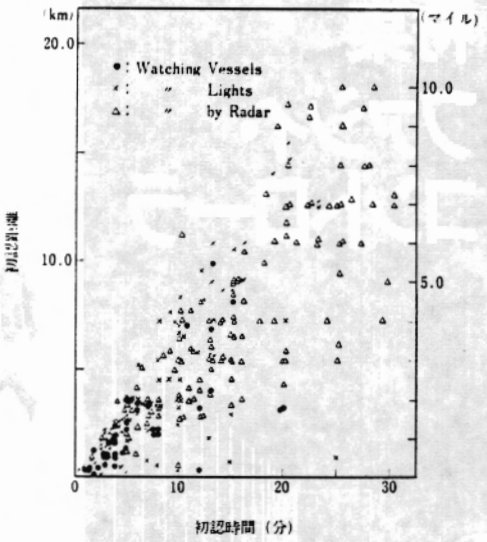


図2 衝突事故における初認時間と初認距離[3] ▶

が衝突事故である。

図1は昭和61年中に日本で起こった海難事故（10,151件）を種類別に，さらに同年海難審判庁において裁決された海難事故のうち衝突事故（753件）だけ取り出して，それを原因別にまとめたものである。やはり全体の約40%が衝突（単独衝突を含む）事故であり，この傾向は毎年ほぼ同じである。そして，海上衝突予防法（後述）の航法不遵守47.4%に続いて，見張り不十分が全体の約33%にも達している。逆にいうと，見張りがいかに大事であるかがよくわかる。そして，衝突事故は船舶などの物的損失のみならず，今回のように乗客がいる場合，その損失は膨大なものとなる。また，大型タンカーやケミカルタンカーなどの危険物を運搬する船舶も多く，もし，これらの船舶が衝突して原油などが流出すれば，海上汚染や爆発などの2次災害により大規模な社会問題に発展する危険性を常にはらんでいる。

2. 衝突予防援助装置は全自動洗濯機？

もちろん，こうした事故1件1件の教訓から事故防止のための方策が取られている。レーダはいまや，一般の漁船にも装備されているし，1967年に英仏海峡で起きたTory Canyon号の座礁・原油流出事故を契機に，IMO（国際海事機構）は衝突予防援助装置の開発とその段階的装備を大型船から進め，現在は1万トン以上の新造船にその装備が義務付けられている。しかし，それにもかかわらず衝突事故の顕著な減少はみられない。衝突予防援助装置というのは，レーダ上に映った他船などの輝点を自動的に追尾してその相対速度，方位を計算し，レーダ上にベクトル表示（従来はレーダプロッティングといって，レーダ上に人間が一定時間ごとに輝点をマーキングしていた）するとともに，ある一定のDCPAまたはTCPA（後述）以下になると警報を鳴らして，衝突回避のための措置を操船者に促すものである。英語の名称Automated Radar Plotting Aids(ARPA)のほうが正確な機能を表わしている。

しかし，最終的な衝突回避動作は人間が判断して行なわなければならないし，狭水路などでは警報が鳴りっぱなしとなるために警報を切る場合も多く[2]，これでは何のためのARPAかわからない。ちょうど，全自動洗濯機で水道の栓を閉めたままスイッチを入れるようなものである。

このように工場内のFA機器と違って，一般の自動化装置は常に最終的な人間の判断を仰ぐようにできている。人間は多少の誤差や不意の変動などにも，柔軟かつ臨機応変に対応できるためである。しかし反面，人間は同じ作業を長時間続けることはできない。疲れや慣れによる誤認，判断ミスを犯しやすくなる。

ここに船舶の運動のテンポと人間の判断ミスを端的に表わしているので，折りに触れ紹介している1枚の統計資料[3]がある（図2参照）。衝突事故において相手の船または物標を衝突の何分前（初認時間），あるいは何km前（初認距離）に初認していたかを示したものである。先の「なだしお」の場合では，ほぼ原点に近いところに当たる。多くの場合，衝突の数分前数km以内に初認しているものの，10分以上，距離にして5km以上手前から初認していながら衝突に至ったケースが相当ある。航空機や新幹線のように，高速のため判断する余裕がなかったわけではない。十分な時間がありながら「先に越せるだろう」，「相手が避けてくれるだろう」といった見込み操船が災いしたためである。

したがって，現在の衝突予防[illegible]置に，さらに衝突危険判断機能と衝突回避行動決定機能を付加して，オートパイロットやエンジンテレグラフ（主機関回転数遠隔指令装置）と統合すればその意義は大きい。ちょうどCADからライトペンやプログラム鍵盤を取除いて，その代わり既存のデータベースとオペレータ機能をもつエキスパートシステム，さらにNC工作機までを統合してCIMを構築するようなものである。

3. ファジィ理論のために書かれた？海上衝突予防法

さて，衝突回避を自動化するに当た

って，実際の衝突回避動作（避航と呼ばれる）を分析する必要がある。そのもとになっているのが海上衝突予防法である。ここでは，それを抜粋整理して示す。

① 接近してくる他の船舶（以後相手船と呼ぶ）のコンパス方位に明確な変化が認められない場合，これと衝突する恐れがあると判断する。

② 相手船と衝突の恐れがある場合，相手船をほぼ正面もしくは右手に見る側に避航する義務がある（避航船という）。反対に相手船が左に見える場合，現在の針路を保持する義務がある（保持船という）。ただし，帆を動力とする帆船の場合は，帆船が常に保持船となー「なだしお」，「第一富士丸」，クルザヨット「イヴⅠ」の関係を図3に示す。

③ （海上は右側通行が原則であり，相手船の後ろを通過する必要上）右側に避ける。しかし，右側に避けることによりかえって危険な場合は，左側に避けることも許される。さらに状況によっては減速を行なってもよいが，機関回転数の整定の時間がかかるし，低速，特に減速中は舵効きが悪いので多用はしない。

④ 避航は十分余裕のある時期に，かつその意志が相手船によくわかるように大幅に行なう。

⑤ 避航は相手船との距離が十分安全な距離を保つことができるまで行ない，相手船が十分に遠ざかって，その安全が確められてから終了する。

このルールを見ただけではどうしたらよいのかよくわからない。肝心の部分がすべてあいまいなのである。つまり，衝突の恐れがいくらになったとき右側（または左側）に何度変針し，衝突の恐れがいくらになったら，もとの航路へどのようにして帰ればよいのかがすべてわからない。

4. 衝突の恐れとは？

人間はどのように衝突の危険を判断しているのだろうか。遠ざかる船が衝突しないのはわかるが，だんだん近づいてくる船が衝突するとは限らない。図3に示したように，近づいてくる船の見合い角に変化が少なければ非常に危険である。しかし，「近づいてくる」とか，「角度の変化が小さい」というのは定性的な，いい換えるとあいまいな概念であり，人間には理解できてもそのままでは機械化できない。

この概念を定量的に表現するためのパラメータが2つある。双方の船速，針路から幾何学的に決まるDCPA（最接近距離）とTCPA（最接近時間）と呼ばれる量である（文献[4]参照）。双方の船が現在の船速と針路を変えなければ，いまからTCPA時間後にDCPAの距離で最接近することを意味する。

たとえば図4の(a)では，いまはそれほど衝突の恐れはないが，このまま前進すればかなり危険であるし，(b)では，3分後に最接近するが，その距離が3kmあるので，相手船の動きを注意する程度でよい。ここでは，

「TCPAが小さく，かつDCPAが小さければ，衝突の恐れが多い」

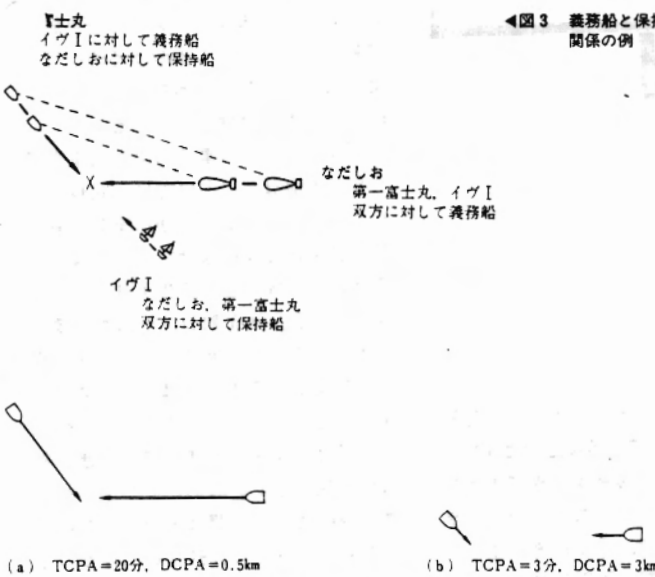
といったファジィ推論則を，TCPA，DCPAの程度に応じて用いた[1],[4],[5]。

5. これからのFAに不可欠な障害物の自動回避

今回の「なだしお」のように，ぶつけようと思わないでぶつけるのは至難の技（少々皮肉）だが，一般には軍事的な目的などで，目標に追従したり，目標の運動を予測して命中させる制御技術はかなり発達している。

一方，避ける制御，しかも必要以上に寄り道をしない避け方となると，まだまだ研究は進んでいない。これからは工場内で動く無人搬送車同志や他の障害物，同一工程で共同作業するロボットアーム同志といった場面で，必ず解決しなければならなくなる問題である。

ここでは，実際の操船パターンを参考にして図5のような避航の仕方を基本とした。この図は「なだしお」が船速11ノット針路270°，「第一富士丸」が



◀図3 義務船と保持船の関係の例

◀図4 最接近時間と最接近距離

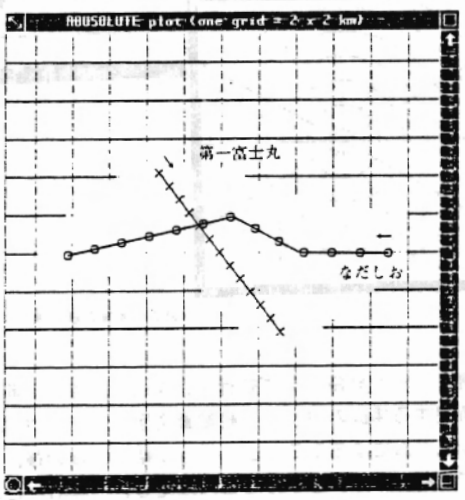
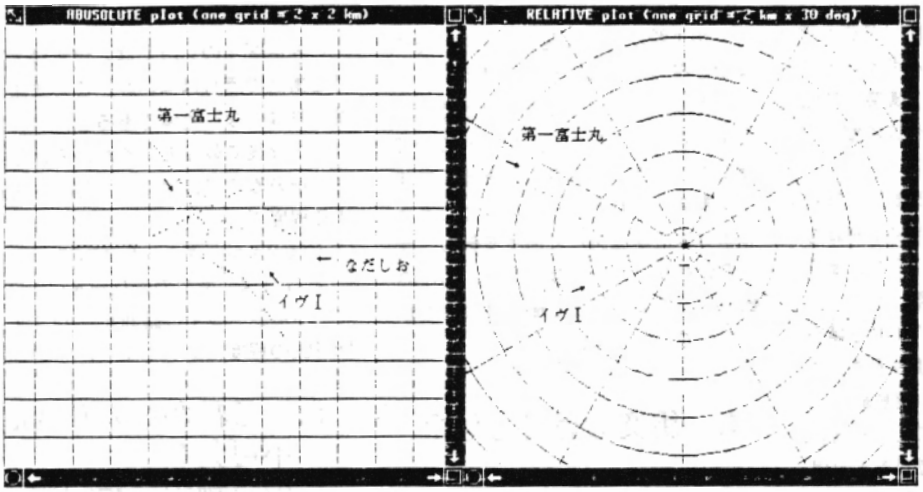


図5 ファジィ船舶衝突回避システムのシミュレーション例



（a） 絶対航跡　　（b） 相対航跡

図6　ファジィ・エキスパートシステムによる複数船避航の例

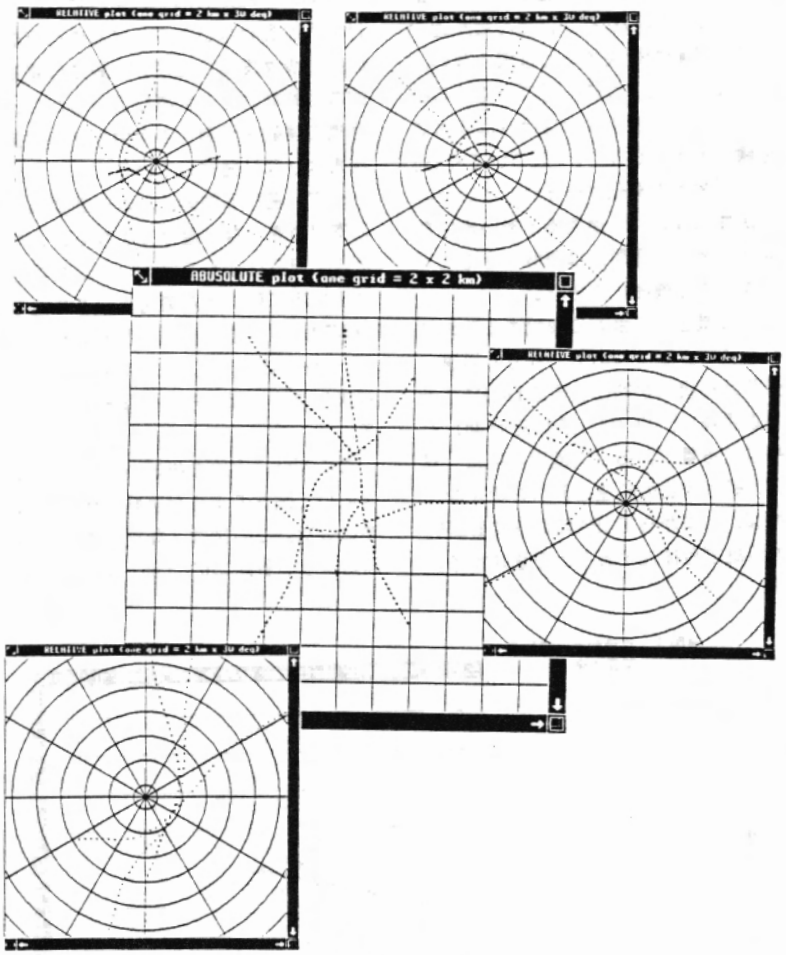


図7　4隻避航の例

船速7ノット針路145°で航行中，原点で衝突する場面のファジィ船舶衝突回避システムによるシミュレーション結果である（マークは5分ごと）。ただし，両船の運動性能などは推定値を用いた。この図によると，「なだしお」は衝突地点の手前約2.5マイル（4.6km）で約30°の右変針をして，最接近距離約2kmの後，原針路に復帰すべきであった。なお，この図のもとになるパラメータ（①避航開始時期，②変針角，③平行航路への移行時期，④原針路への復帰時期，⑤復帰時の針路）のうち⑤のものに，ファジィ推論した3種類の異なった「衝突の恐れ」を用いている。

また，このシステムでは保針したり，変針するために必要な舵角指令をするファジィ・オートパイロット，ある屈曲した航路をはみ出さないように航行するためのファジィ自動航路航行サブシステムも設計したが詳細は文献[1],[4],[5]に譲る。

6. ファジィESが解いた「なだしお」の行動

ファジィ推論・ファジィ制御を用いることによって，衝突回避という高度な作業を自動化できることがわかった。しかし，このままのシステムを実船搭載しても，うまく機能するのは行き交う船舶の少ない限られた（しかし，ほとんどの）海域だけである。

「なだしお」の事故のように東京湾や瀬戸内海などにおいては，同時にたくさんの船を見張りながら衝突回避行動の決定を行なわなければいけないし，そういう海域にこそ衝突回避システムなり，海上交通管制システムが必要となる。ところが，衝突回避の方法を規定した海上衝突予防法は，2船間に限定して述べてあるだけであり，2船以上の見合い関係のときに取るべき行動は何ら規定していない。にもかかわらず，操船者たる人間はそのような状況にも対応できて，行動が起こせるのである。

こういった問題に対して，それを自動化するに当たり解決の道を与えるのがエキスパートシステム（ＥＳ）である。ここではファジィ制御による衝突回避システム[1]を発展させて，ファジィ・エキスパートシステムとするための方法[5],[7]を紹介する。

複数船が出会う状況における行動戦略は，小山ら[6]に従ってつぎのように行なった。すなわち，現在レーダ上に存在するすべての船を，「船」エレメントとしてワーキングメモリ（WM）に作成する。すべての船との「衝突の恐れ」を調べ，もし危険と判断するとWM上に「船」とは別に，「衝突危険船」を発生させる。これにより，ただ行き過ぎるだけのほとんどの「船」に，無駄なメモリを費やさないですむ。そして，推論エンジンにより競合解消させ，行動を起こすべき相手船を特定する。

このファジィ・エキスパートシステムにより「なだしお」問題をシミュレートしたのが，図６である。（ａ）が絶対航跡，（ｂ）が「なだしお」のレーダ上で見た「第一富士丸」と「イブＩ」の相対航跡である。現在のシステムには帆船に対する「保持船」規定は入っていないので，「イブＩ」と「第一富士丸」（行合い船）は互いに避航し，「なだしお」はその２隻に対して，さらに十分な距離を保って避航しているのがわかる。

□……□

海には道路もなければ信号も横断歩道もない。そして恐ろしいことに，船にはブレーキがない。はじめに述べたように，日本で起こっている年間約１万件の海難事故のうち約４割が衝突事故であり，そのまた３割が見張り不十分である。今回起こった「なだしお」の事故は，こうした過密航路での航行安全が，いかにもろいかを象徴的に示している。また，今回の事故でも関係しているが，今後，海洋レジャーが盛んになるにつれ法的知識や操船経験の不足，無謀操船などから，プレジャーボートを巻き込んだ海難が急増することが予測される。

本稿は「なだしお」の事故を例にとって，ファジィ制御の応用例としての船舶衝突回避システムの紹介したものであるが，これを契機にこうした技術を実用化したシステムが１日も早く開発され，安全な航海が行なわれることを願ってやまない。

参考文献

(1) 長谷川，上月：Fuzzy 制御による自動避行システムに関する研究，関西造船協会誌，205,1/10,（1987）
(2) 長谷川，山下：衝突予防援助装置の利用実態とその問題点，第17回安全工学シンポジウム，東京，69/72,（1987）
(3) 翁長：避航操船における視認方法の信頼性について，日本航海学会論文集，62,89/96,（1979）
(4) 長谷川：船舶の衝突回避システム，オートメーション，33-6,（1988）
(5) 長谷川：船舶自動航行システム，ファジィコンピュータ／ファジィエキスパートシステム，廣田薫監修，トリケップス刊，135-159,（1988）
(6) T. Koyama, Y. Jin : An Expert System Approach to Collision Avoidance. Proc. of 8th Ship Control Systems Sumposium. Hague, 3, 234/263,（1987）
(7) 村松：複数船避航エキスパートシステムに関する基礎研究，大阪大学工学部卒業論文，（1988）

著者紹介

長谷川　和彦（はせがわ　かずひこ）

兵庫県西宮市出身，昭和26年９月生まれ，37歳。

昭和51年大阪大学大学院工学研究課博士課程前期課程終了，工学博士。昭和51年広島大学工学部船舶工学科（現，第４類建設系）助手，昭和58年大阪大学工学部造船学科助手を経て，現在，同講師，船体運動学，船舶操縦性，船舶制御システムが専門。ＣＡＤからソフトウェア工学に至る情報処理教育にも従事。操船シミュレータ，船舶操縦マン・マシンシステムとオートパイロットの研究，船舶操縦性の推定と改良に関する研究，船舶衝突回避システムをはじめとする新しい海上交通システムの開発研究，造船 CIMSのための機器配置エキスパートシステムの開発研究などを行なっている。

モットーは「機械にできることは機械にさせよ。人間はもっと知的で人間的なことをせよ」。現在唯一の趣味は家族旅行，子供と遊ぶこと。