

大阪大学工学部造船学科 長谷川和彦
 三菱重工業(株)神戸造船所 ※上月 明彦
 (研究当時、大阪大学大学院工学研究科)

1. はじめに

船舶の事故(海難)は日本で1年間に約1万件(昭和57年以降の平均)発生している。そのうち、衝突(船舶との衝突や施設との衝突)が約40%を占めている。また、近年、原油や天然ガス(LNG)、液化石油ガス(LPG)を運ぶタンカーやケミカルタンカーが増加している。そして、衝突や座礁のように、狭水路や港湾域で起こる海難事故は、1967年に英仏海峡で起きた Torry Canyon 号の座礁事故等に見られるように、単に人的及び物的損失に留まらず、環境汚染や爆発の二次災害により社会問題にまで発展する危険性を常にはらんでいる。一方、こうした衝突事故において、衝突の何分前(初認時間)や何マイル手前(初認距離)で相手船を初認したかを示したのが Fig. 1¹⁾である。相手に気付いていながら(しかも、10分以上、距離にして5Km以上前から気付いているケースも相当ある)、甘い判断や誤った判断により衝突に至ったケースが以外と多いのである。

こうしたヒューマン・エラーを防ぐために開発されたのが衝突予防援助装置(Automated Radar plotting Aids; ARPA と略す)と呼ばれるもので、レーダー画像上で近接物標を相対ベクトル表示すると共に、自船と衝突する危険性のあるものについて警報と表示で操船者に知らせ、適切な避航措置を取るよう促す装置である。現在では1万トン以上の全新造船に搭載されている。しかし、最終的な判断を下すのは操船者で、しかも、この装置を実際に必要とする狭水路や港湾域では警報が鳴り続け、操船者は警報を切らざるを得なくなる等の問題点も多い²⁾。そこで、避航動作を自動化し、ARPAと共にシステム化すれば、より高度な船の自動航行システムが完成するものと思われる。その手始めとして、一隻避航問題を取り上げ、避航開始時期の判断から実際の操舵及びもし必要ならば機関の操作までの一連の作業を行えるシステムを設計し、そのシミュレーションを行ったので紹介させていただく。

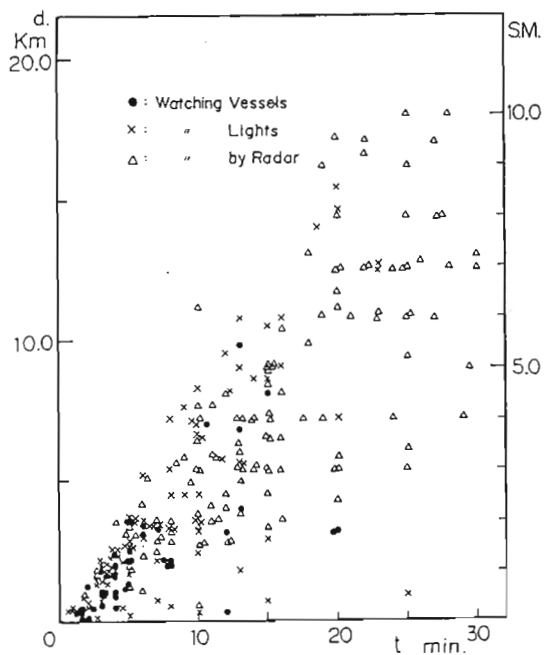


Fig. 1 First perception time and distance before collision¹⁾

第13回 システムシンポジウム(昭和62年11月21日・22日・沖繩)

2. 避航動作と衝突危険度

海上衝突予防法によると、海上において他船と遭遇した場合、相手船を右手に見る側が避航する義務がある（義務船という）。そして、この時、相手船は自船の現在の航路を保持する必要がある（権利船という）。この規則は、相手船との見合い関係により若干の変化はあるが航法上の大

原則である（Fig. 2参照）。そして、海上では右側通行が原則であるので右側に避けるのが基本である。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、

減速を行いながら避航することもあるが、機関回転数の整定に時間がかかるため、あまり、多用はしない。

今、相手船の軌跡を自船を原点に取った相対座標で表すと Fig. 3 の実線のようになる。ここで、 V ：自船の船速、 ψ ：自船の針路、 V_r ：相手船の船速、 ψ_r ：相手船の針路とする。両船ともこのまま船速、針路を変えなければ、両船は TCPA（Time of CPA；最接近時間）後に、CPA（Closest Point of Approach；最接近点）において、DCPA（Distance of

CPA；最接近距離）離れて最接近する。この DCPA がある値以下の時がニアミスであり、0 の時が衝突である。しかし、DCPA がいくら小さいからといっても、TCPA が十分大きければ、近い将来に衝突する危険はなく、当分気にしなくてよい。逆に、TCPA がほとんど 0 でも、DCPA がある値以上であれば、無視して良い。すなわち、衝突危険度（Collision Risk；CR）とは、DCPA と TCPA の二つに関する。事実、操船シミュレータを用いた研究によると、操船者の避航開始時機の判断は、この二つの物理量と強い相関がある³⁾。操船者（ここでは、船長もしくは航海士）は、目視でまず要監視船舶を見つけると方向及び目視距離をもとにしてレーダー上で確認し、マーキングする。数分後に再度レーダー上の相手船にマーキングしてその相対ベクトルを求め、DCPA、TCPA を概算で求める。この作業をレーダプロットングといい、避航動作の基本となる。ARPA はこの作業を自動化したものである。また、簡便な方法としては、相手船の見合い角がほとんど変化せず、だんだん近づいてくれば危険と見なすことができる。

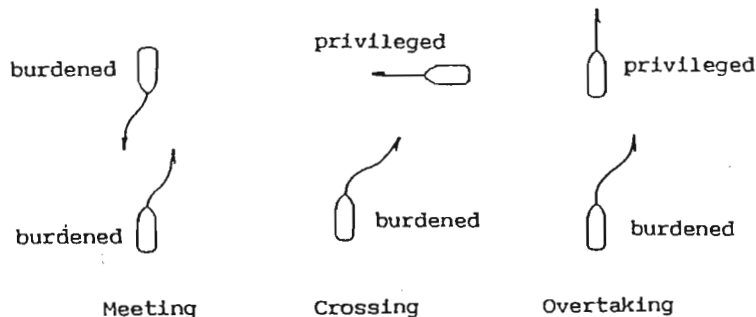


Fig. 2 Encounter situations⁷⁾

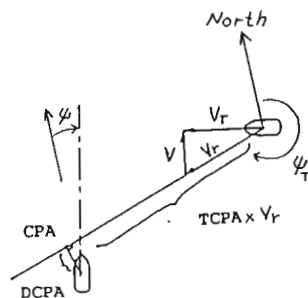


Fig. 3 TCPA and DCPA⁷⁾

3. 船舶の自動化の流れと自動避航システム

船舶は慣性が大きくブレーキがないに等しく、かつ、低速では針路制御が非常に効きにくい。さらに、他の交通機関と違い、全ての船舶は特注品であり、1隻として同じ動特性の船舶はない。しかも、何日間も止まることなく動き続けなければいけない。

こうした船舶の特異性を反映してか、船舶は自動化の進んだ交通機関である。針路制御だけを見ても、船舶用のオートパイロットは1920年にすでに実用化されており、また最近、適応制御の応用分野としても注目を集め、燃費節減のため一早く実用化されている⁴⁾。しかし、最後まで自動化の遅れたのが「見張り」と「避航」の自動化である。何れも航海士の任務であり、彼らの長年の経験と勘による精度は要求されないが失敗の許されない作業である。さらに上位の運航レベルでは、大圏コースと気象、海象条件のかねあいで決まる「最適航路」(“Weather routine”)の決定問題がある。一昔前までは、これぞ船長の腕の見せどころであったが、最近では契約に基づき代行サービス業者に任せるケースが欧米を中心に多い。

本研究では、航海計画が決まった船が、その航路上を「自動航行」しながら「見張り」機能からの要求により「避航」計画を立て、実際に操舵する「オートパイロット」までの一連の作業を人間の意志決定やベテランのオペレータの動作に近いといわれる Fuzzy 推論と Fuzzy 制御を用いて行った⁵⁾⁶⁾。システムの構成を Fig. 4 に示す。詳しい記述は文献⁵⁾⁶⁾を参照いただくことにして、ここでは、基本的な考え方とシミュレーション結果についてのみ報告する。また、操船者の意志決定問題と見なした場合、さらに、Fuzzy 推論を発展させてエキスパート・システム的なアプローチも考えられる⁷⁾。いずれにしても、さらに船舶の自動化はオペレータを含めた “Total Navigation Automation” として、あるいはまた、“Marine Traffic Control System” として発展していくものと思われる。

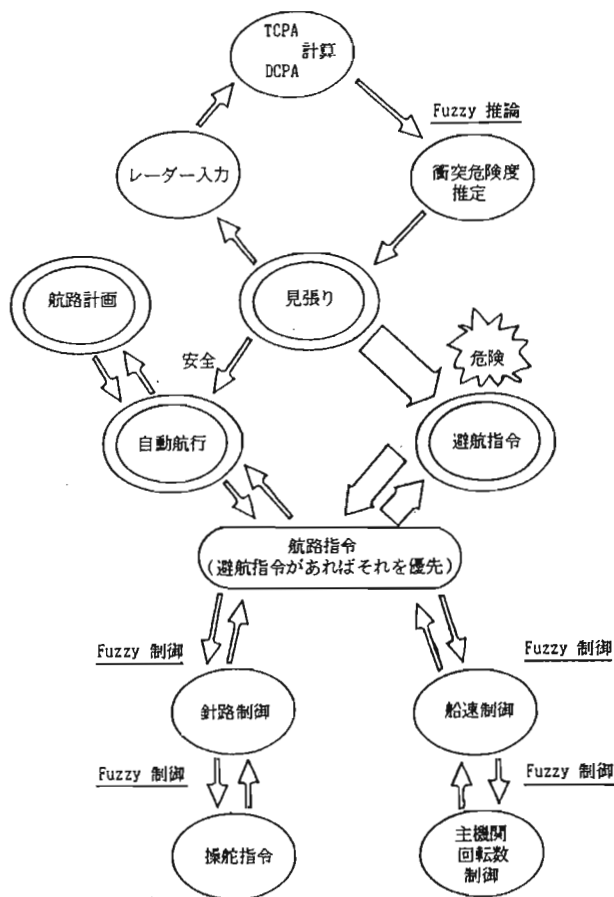


Fig. 4 Scheme design of automatic collision avoidance system

4. 自動避航システムの構成

Fig. 4 に示したごとく、本システムは大きく分けて、航路計画、自動航行、見張り及び避航指令の4つのサブシステムよりなる。以下に、各サブシステムの概要を示す。

航路計画サブシステム：運航計画、海象条件等により決まる本システムの最上位のサブシステムであり、唯一、陸上からの支援または指示のありうる部分である。シミュレーションでは、オペレータからの入力により決定した。

自動航行サブシステム：航路計画サブシステムからの指示により決められた航路を航行するためのサブシステムであり、さらに下位のレベルである針路制御ないし速度制御への指令を行う。→ [航路指令部]

見張りサブシステム：自動航行中、常にレーダー画像をもとに近接物標を監視するサブシステムであり、ARPAの機能をさらに発展させて、衝突危険度を Fuzzy 推論する。

避航サブシステム：見張りサブシステムが危険と判断した時に割り込みスケジュールされる機能であり、本システム中、最も割り込みレベルが高い。そして、このサブシステムがスケジュールされると、自動航行サブシステムからの針路ないし速度指令がどうであれ、衝突を回避するための避航計画（短時間の一時的な航路計画と見なすことができる）を立てて、下位の制御に指示する。基本的な避航計画は Fig. 5 に示すように (A) 変針部、(B) 平行移動部、及び、(C) 航路復帰部より構成される。

[航路指令部]自動車と違い、時定数が大きく、しばしば針路制御系が不安定な船舶では、航路の屈曲部の航行指令は以外と難しい。人間の場合、変針点の手前ある距離のところまで一定の舵角を取り、ある程度旋回したところで、反対舷に舵角を取って、回頭角速度を抑え、0になったところで、舵を中央にしてあと保針する。そして、そのときの航路がちょうど設定航路になるように、「ある程度旋回したところ」を選ぶのである。この時機は、船や変針角や取ろうとする舵角にもよるので、予め決定することはできない。これを自動化するに当たっては、PID 制御が利用できるが、保針時のオートパイロット（方位偏差のPID）と変針点付近のオートパイロット（航路偏差のPID）を切り換える必要があり、保針から変針、変針から保針への切り替えがスムーズとはならない。本システムでは、変針点を近接物標とみなし変針点への近さを Fuzzy 推論し、その近さに応じて変針角を与えるようにした（Fig. 6 参照）。

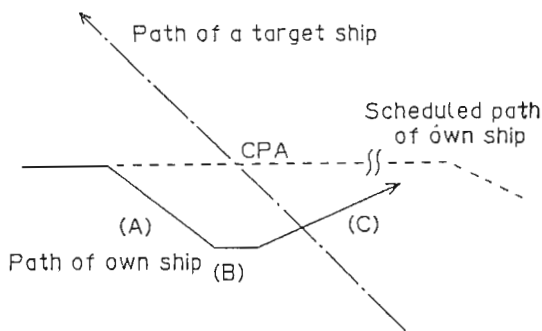


Fig. 5 Path of collision avoidance

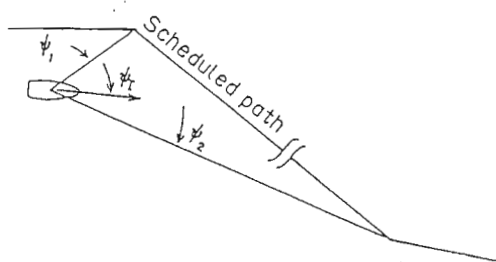


Fig. 6 Track keeping

5. シミュレーションによるシステムの検証

シミュレーションは自船が 325m のタンカーで、船速は両船とも 10 ノット、時刻 0 で自船は原点にいて針路は北 (X 軸の方向; 0°) とする。相手船は、ケースに応じて初期位置と針路が違ふ。見張り及び避航指令サブシステムと自動航行サブシステムは別の時間間隔で起動できるようにしてあるが、今回はすべて 10 秒毎に呼び出している。

Fig. 7 に、右前方から、相手船が接近し、30 分後に 5 マイル前方で衝突するケースのシミュレーション結果を示す。図中、(a) は絶対航跡で自船が \circ 、相手船は \times 印で 5 分毎の船位 (単位はマイル) である。(b) は自船のタイムヒストリーであり、上から順に、方位角 ψ (破線: 指令針路、実線: 実針路)、舵角 δ (実線) 及び回頭角速度 $d\psi/dt$ ($\times 10$ 、破線) と船速 V (破線: 指令船速、実線: 実船速) である。(c) は相手船の相対航跡であり \times 印は同じく 5 分毎の船位である。

(d) は上から順に衝突危険度 CR、最接近時間 TCPA 及び最接近距離 DCPA のタイムヒストリーである。

このケースでは、自船に避航義務があるので、見張りを続けながら、相手船との距離 4.7 マイル、衝突の手前 15 分に、「避航指令」が起動され、 30° の変針指令が出ている。この 30° というのは避航指令が出す最小の変針角であり、相手船にこちらの避航意志をはっきりと伝えるためであり、操船シミュレータや実船での観測結果から決定した。変針時の操舵も人間のそれに近く、約 0.8 マイルの距離で相手船をかわし、その後、原針路へスムーズに復帰していることがわかる。

Fig. 8 は、相手船が左舷側から接近してきて、同じく 30 分後に 5 マイル前方で自船と衝突するケースである。この場合、相手船に避航義務があり、避航判断は実際でも非常に難しい。自船は針路保持船であり、Fig. 7 と同じようなタイミングでは避航してはいけない。相手船との距離 1.2 マイル、衝突の 10 分前まで相

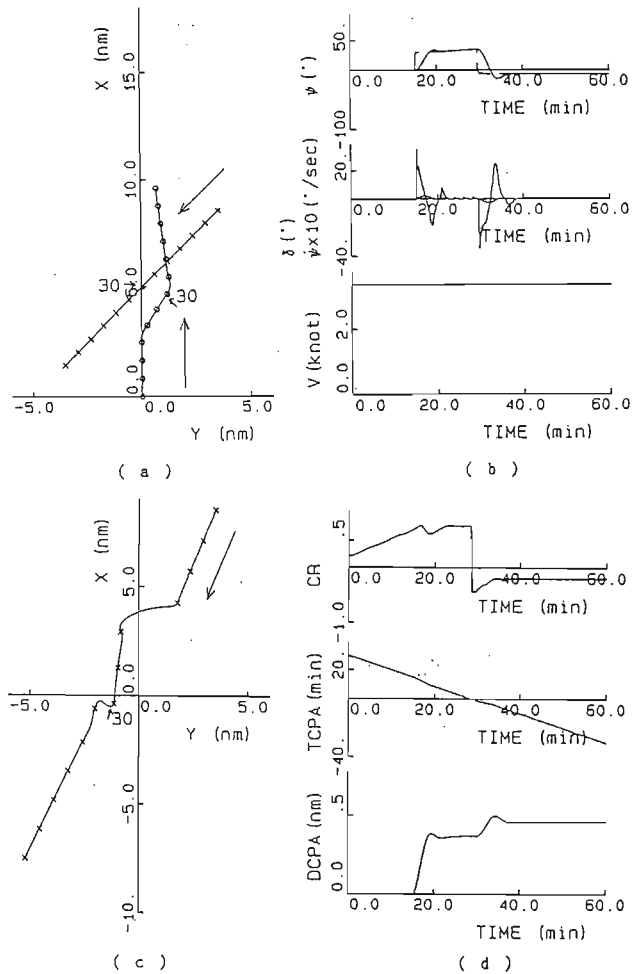


Fig. 7 Simulation of automatic collision avoidance system

手船が避航しないのを待って始めて避航措置をとっている。しかも、この場合、右側に避けただけでは時間調整ができないので、Halfに減速し、 50° 変針を指示している。ところがほぼ同時期に相手船がこちらに気付いて避けてきたのか（この場合は左側に避けるべきである）、こちらに気付かず急に右に針路を変えてきた。自船は悪いことに減速中なので舵効きが悪い。さらに、避航指令が変針を指示、結局、原針路からほぼ直角に逃げ、約 0.3 マイルのニアミスで危うく難を逃れている。現実には緊急停止か 35° 旋回に近いバニック状態だけにほぼ満足できる結果といえる。

参考文献

- 1) 翁長一彦：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、第62号、9/96 (1980)
- 2) 長谷川和彦、山下 庸：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、69/72 (1987)
- 3) 小林弘明、遠藤 真：船舶避航操縦の解析——人間・機械系の観点より——、日本航海学会論文集、第56号、101/109 (1976)
- 4) 大津皓平、長谷川和彦：オートパイロットの評価と展望、試験水槽委員会第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会、243/279 (1981)
- 5) 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、1/10 (1987)
- 6) Hasegawa, K.: Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control, Proc. the Eighth Ship Control System Symp., the Hague, Oct. (1987)
- 7) Koyama, K. and Jin, Y.: An Expert System Approach to Collision Avoidance, *ibid.* (1987)

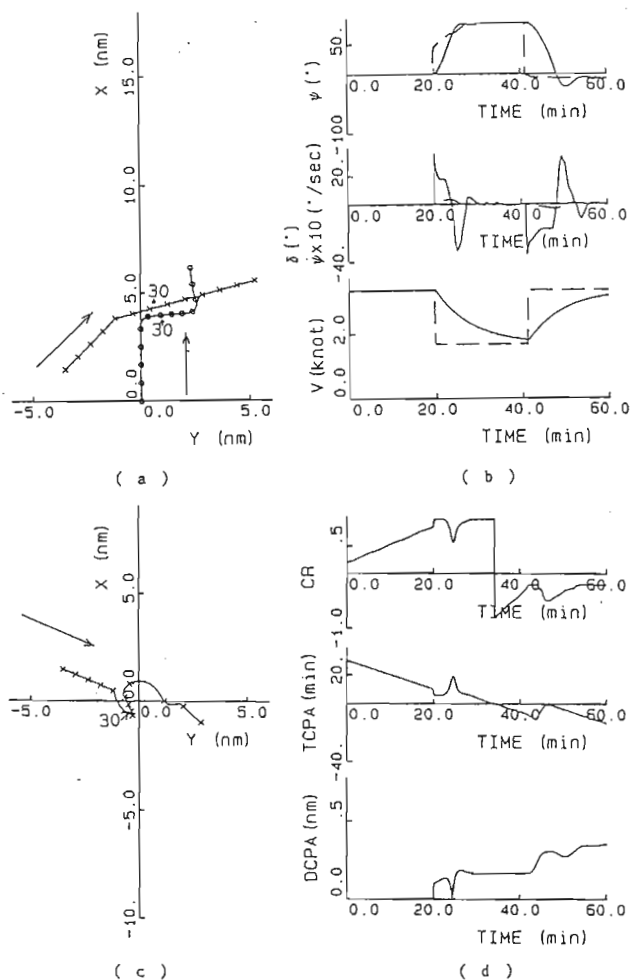


Fig. 8 Simulation of automatic collision avoidance system under conflict behaviour of a target ship