船舶の衝突回避システム

大阪大学　長谷川　和彦*

船舶と他の交通機関との違いはいろいろある．構造的には飛行機によく似ている．しかし，海面という非常に大きな外力が加わる境界面を移動する点が大きく違う．かといって，自動車のようにハンドルを回すとすぐに回るような即応性はない．また，船にはブレーキがない．船が航行中何かの障害物を発見しても主機を逆転させて止まるのを待つしかない．

しかし，大形船が常用速力で航行中，急速逆転を発令してもまず主機が逆転するまでに時間がかかる．そして逆転がかかっても実際に船が止まるまでに 3～5 km は惰走する．そのうえ逆転惰走中は舵が効かず左右どちらかに旋回しながら止まる．さらに困ったことに船舶は原則的に特注品であり，一隻として同じ動特性を持った船舶はない．しかも，何日間も止まることなく動き続かなければならない．

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，また最近は，海象条件などの変化に応じて，最適なゲインを自動的に調整する適応制御型のオートパイロットが燃費節減のためいち早く実用化されている．しかし，最後まで遅れたのが「見張り」と「衝突回避」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勘と経験による，精度は要求されないが絶対に失敗の許されない作業である．

ここでは，この作業を自動化する試みの 1 つとして，最近注目を集めているファジィ制御を用いた衝突回避システムを紹介する．

衝突回避動作

まず，実際の衝突回避（避航と呼ばれる）動作について説明する．海上衝突予防法によると，海上において他の船舶（以後，相手船と呼ぶ）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み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）．

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（図 1 参照）．そして，海上では右側航行が原則でありかつ，相手船の後ろを通過する必要があるので右側

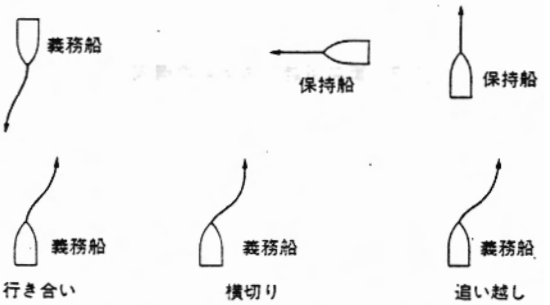


図 1　出合い状況による義務船と保持船

* はせがわ　かずひこ：工学部造船学科講師
〒 565　大阪府吹田市山田丘 2-1，TEL 06 (877) 5111

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．さらに状況によっては減速を行な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し低速，特に減速中は舵効きが悪いので，あまり多用はされない．

ここで，衝突の恐れとはどういうことか．少々堅苦しい話になるが，以後の説明に必要なのでアンダーラインに注意して読んでいただきたい．海上衝突予防法第2章航法によると

第7条（衝突のおそれ）

4　船舶は，接近してくる他の船舶のコンパス方位に明確な変化が認められない場合は，これと衝突するおそれがあると判断しなければならず…（略）

とある．すなわち，自船を原点として接近してくる相手船を見てその相対角があまり変化しない時（図2），衝突の恐れがあると判断するのである．

では，いつ，どのように衝突を避ければよいのか．海上衝突予防法では続いて次のように述べている．

条8条（衝突を避けるための動作）

船舶は，他の船舶との衝突を避けるための動作をとる場合は，できる限り，十分に余裕のある時期に，船舶の慣行に従ってためらわずにその動作をとらねばならない．

2　船舶は，他の船舶との衝突を避けるための針路又は速力の変更を行なう場合は，できる限り，

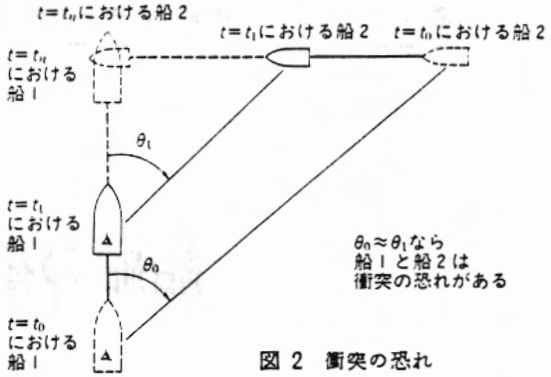


図2　衝突の恐れ

その変更を他の船舶が容易に認めることができるように大幅に行なわなければならない．

（省略）

4　船舶は，他の船舶との衝突を避けるための動作をとる場合は，他の船舶との間に安全な距離を保って通過することができるように，その動作をとらなければならない．この場合において，船舶は，その動作の効果を当該他の船舶が通過して十分に遠ざかるまで慎重に確かめなければならない．

5　（省略）

杓子定規な法律文でありながら，結局，肝心なところはよくわからない書き方がしてある．つまり，衝突の恐れがどのようになったら，何度針路を変えて何分または何マイル進み，相手船の状況がどのようになったら，何度針路を変えてどこに戻ればよいのかわからない．すべてがあいまいな

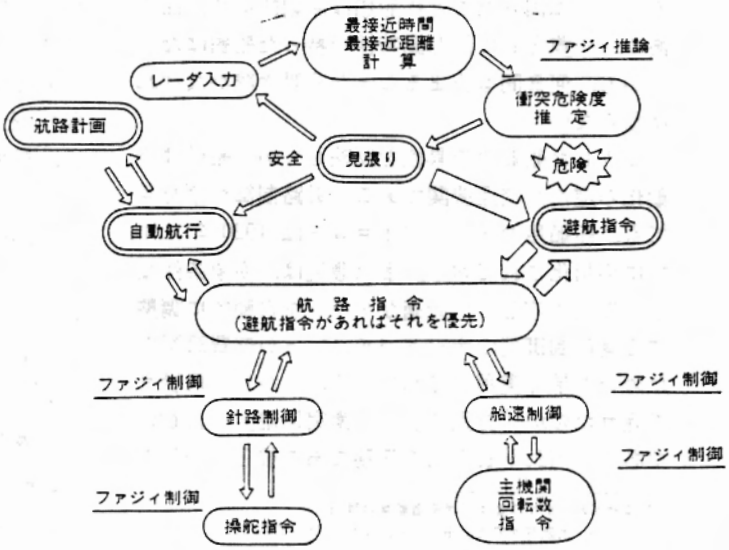


図3　衝突回避システムの構成

のである．

衝突回避システムの設計

ここで紹介する衝突回避システム[1]の全体の構成を図3に示す．本システムは前節で述べた衝突回避の動作を自動的に行なうことを目的として開発したものであるが，その中に針路制御部や航路制御部を含むため全体としては，大洋航行中の自動航行システムとなっている．

図中の「航路計画」とは，例えば，横浜からシアトルに行くのにチャート（海図）上でどう通るかという問題である．ここでは与えられたものとして扱っているが実際は，夏場と冬場，あるいはもっと細かくいうとその時その時の気象・海象条件によって決まるいわゆる「最適航路」("Weather Routine") と呼ばれる数理計画の問題である[2]．この問題についてもファジィ理論的アプローチがある[3]．

このシステムは大きくわけると3つの部分からなる．自動航行サブシステム，見張りサブシステム，そして，避航指令サブシステムである．

1. 見張りサブシステム

見張りサブシステムは，レーダの画像データから海面反射などのノイズを除去した後，物標を抽出する部分と，抽出した物標の座標をもとに物標の相対速力，相対針路などを計算する部分，そして，それらをもとにして衝突の危険度を推論する部分からなる．

このうち，物標を抽出する部分と相対速力・針路を計算する機能はすでに衝突予防援助装置として実用化されている．しかし，現在の衝突予防援助装置は，その名前が示すように近接物標を追尾してレーダ上に相対速度をベクトル表示するとともに，「衝突の恐れ」がある場合に警報を出して操船者の判断を促すだけであり，その物標が危険であるかどうか，そしてもし危険ならどのように操船するかは操船者に任されている．しかも狭水路や港湾域では行き合う船舶が多過ぎて警報が鳴り続け，操船者は警報を切らざるを得ないなどの問題点も多い[4]．

結局，問題は「衝突の恐れ」をどのようにして判断するかということになる．ここで「衝突の恐れ」と関係する2つの変数を導入する．前節で述

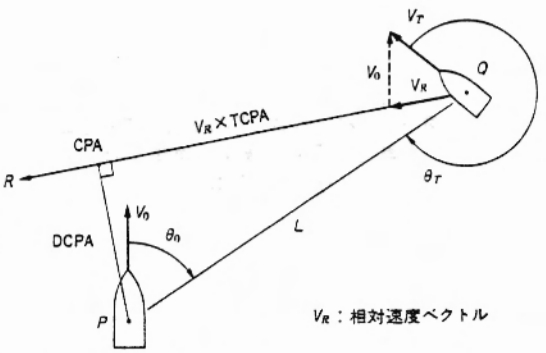


図4　自船をP点に固定した時の相手船の動き（QR 方向に移動するのでP点から QR に下ろした点が最接近点 CPA となる）

べた海上衝突予防法によると「衝突の恐れ」があるとは，相手船との相対距離が減少していて，かつ，その見合い角があまり変わらないことであった．これを簡単に示す量がある．最接近距離（DCPA：Distance of CPA）である．

これは，現在の速力と針路を双方の船が保つと仮定したとき求められる二船の最接近点（CPA：Closest Point of Approach）における二船間の距離であり，図4で示すように変数をおくと次式で求められる．

$$\mathrm{DCPA}=\frac{L|V_0\sin\theta_0+V_T\sin\theta_T|}{\sqrt{V_0^2+V_T^2+2V_0V_T\cos(\theta_0-\theta_T)}}$$

ただし，

L：二船間の距離
V_0：自船の船速
V_T：相手船の船速
θ_0：自船からみた相手船の見合い角
θ_T：相手船からみた自船の見合い角

この DCPA が小さければ小さいほど「衝突の恐れ」が大きいといえる．しかし，いくらDCPAが小さくても今すぐ心配する必要があるかないかはわからない．横浜を出航したての船が現在の速力と針路を保ったとき，ちょうどシアトルを出航した別の船とぶつかることがわかっても心配はない．すなわち，「衝突の恐れ」を決めるもう1つの量がある．二船が CAP に至るまでの時間である最接近時間（TCPA：Time of CPA）であり，次式で求められる．

$$\mathrm{TCPA}=\frac{L(V_0\cos\theta_0+V_T\cos\theta_T)}{V_0^2+V_T^2+2V_0V_T\cos(\theta_0-\theta_T)}$$

この TCPA が小さければ小さいほど「衝突の

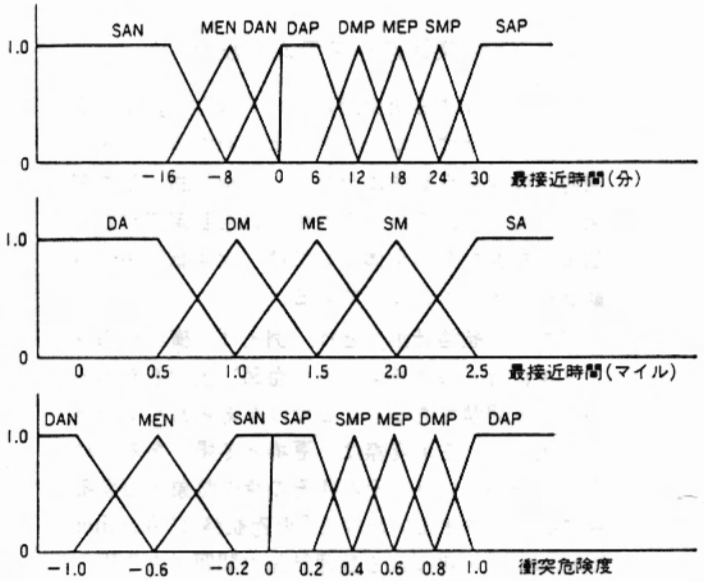


図 5　最接近時間（TCPA），最接近距離（DCPA），衝突危険度（CR）のメンバーシップ関数

表 1　衝突危険度の（CR）ファジィ推論則

衝突危険度 (CR)		最接近時間 (TCPA)							
		SAN	MEN	DAN	DAP	DMP	MEP	SMP	SAP
最接近距離 (DCPA)	DA	SAN	MEN	DAN	DAP	DMP	MEP	SMP	SAP
	DM	SAN	SAN	MEN	DMP	MEP	SMP	SAP	SAP
	ME	SAN	SAN	SAN	MEP	SMP	SAP	SAP	SAP
	SM	SAN	SAN	SAN	SMP	SAP	SAP	SAP	SAP
	SA	SAN	SAN	SAN	SAP	SAP	SAP	SAP	SAP

表 2　言語変数一覧

SAN	Negative Safe
MEN	Negative Mediumly Safe
DAN	Negative Dangerous
DAP	Positive Dangerous
DMP	Positive Mediumly Dangerous
MEP	Positive Medium
SMP	Positive Mediumly Safe
SAP	Positive Safe
DA	Dangerous
DM	Mediumly Dangerous
ME	Medium
SM	Mediumly Safe
SA	Safe
LA	Large
ML	Mediumly Large
MM	Medium
SM	Mediumly Small
SA	Small
LAN	Negative Large
MLN	Negative Mediumly Large
MMN	Negative Medium
SMN	Negative Mediumly Small
ZE	Zero
SMP	Positive Mediumly Small
MNP	Positive Medium
MLP	Positive Mediumly Large
LAP	Positive Large

恐れ」が大きいといえる．ところが逆に，いくらTCPAが小さくたとえ0であってもDCPAが十分大きければ「衝突の恐れ」はない．このように「衝突の恐れ」とは，これら2つの量に関係しながらあくまでファジィな関係でしかない．

ここで，これら2つの量から「衝突の恐れ」を推論するのにファジィ推論を用いた．以後，このようにして求めた「衝突の恐れ」を衝突危険度（CR：Collision Risk）と呼ぶことにする．図5に用いたメンバーシップ関数を，表1にファジィ推論則を示す．なお，本システムで用いた言語変数の一覧を表2に示す．表1は例えばハッチ部では，「DCPAが危険で，TCPAが正でやや危険であれば，衝突危険度は正でやや危険である」と読む．

ここでおもしろいのは衝突危険度を0～1ではなく0～±1の範囲で定義してある点である．これは相手船が通り過ぎた後の危険度を負の危険度として表現したものである．こうすることによって，相手船が通過直後の危険度だけではなく，自船の衝突回避動作により相手船との見合い関係が変わることによって起こる一時的な（見かけ上の）相手船通過という状況にも対応した行動をとることができる．

2. 避航指令サブシステム

避航指令サブシステムは，見張りサブシステムにおいて“危険”と判断されたときに起動され相手船との見合い状況に応じて避航計画（どのよう

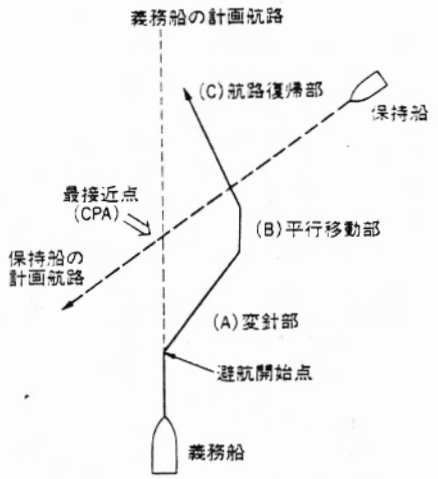


図 6　衝突回避の基本形

にして衝突を回避するか）をたて，必要な針路指令や船速指令を発令する部分である．実際には複数の船舶や航路，島などの複雑にからむ操船者の長年の勘と経験に依存する作業であり，自動化にあたってはエキスパートシステム的なアプローチが必要である[5]．しかしその基本は1隻に対する避航計画であり，ここでは図6に示すように，3つの部分にわけて行なった．

（A）　変針部

ここで，一番問題となるのは，その開始時期である．前述の海上衝突予防法第8条第1項の「できる限り，十分に余裕のある時期に」をどう表現するかである．こう書いてあるからといって相手船が水平線から現われたらすぐに避ける操船者はいない．こういったとき筆者はいつもハーバード大学の W. Lawance 教授の言葉を思い出す．「安全とは当事者が許容できる危険性」なのである．

ここでは実際の操船パターンから，ファジィ推論した衝突危険度が 0.7 を越えたときとした．そして，その変針角についてはまず相手船に衝突回避の意志を伝えるため最低 30° とり（同第8条第2項），さらに TCPA 秒後の衝突危険度をファジィ推論してそれが 0.7 以下になる変針角とした（同第8条第4項前半）．

（B）　平行移動部

この部分は海上衝突予防法第8条第4項の後半に相当する部分である．ここでも Lawance 教授の言葉が生きてくる．最低限許容できる衝突危険度をクリアできれば，その「効果を確かめる」ため様子を見るのに十分である．しかし現在の衝突危険度が 0.7 を切ったからといって，原針路と平行に戻ったら危険度はまた 0.7 を越える．

先ほどは変針角を決めるのに TCPA 秒後の衝突危険度を予測してファジィ推論したが，今度は原針路に戻ったと仮定した衝突危険度をファジィ推論する．

そして実際の衝突危険度が負で小さくなったとき「当該他の船舶が十分に遠ざかった」と判断して，次の航路復帰部へ移る．

（C）　航路復帰部

海上衝突予防法では航路復帰の仕方については規定していない．一刻も早く原航路に戻るのか，むしろ急激な針路変更はせずに次の目標点に向かうのかは，航路帯のあるところや港湾域なのか，太平洋のどまん中なのかによっても違う．しかしこの違いは次の目標点（一般には変針点）が近くなのか遠くなのかの違いだけである．ここでは単に次の目標点が与えられているとしてそこに向かうような針路を発令している．

3.　自動航行サブシステム

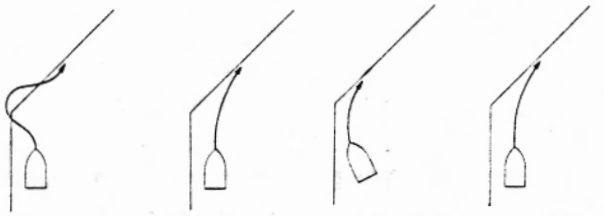
本節の最初でも述べたようにこのサブシステムは衝突回避とは無関係な部分である．反対に，例えば太平洋上に他に1隻も船舶や障害物がないときに「航路計画」を与えれば自動的に横浜を出た船がシアトルに着くための，いわばオートパイロットを発展させたものである．そして，避航サブシステムからの避航指令はすべてこの自動航行サブシステムに与えるべき「航路計画」の一時的な変更とみることができる．

通常，こういった制御には PID 制御が用いられるが，PID 制御器では定常状態（保針時）とステップ状態（変針時）とで制御ゲインを変えないと両方でよい制御ができない，後述するように変針点付近での制御が意外と難しい，などの問題点があり，ここではすべてファジィ制御を用いた．

このサブシステムは航路制御部と針路制御部の2つの部分からなる．

（A）　航路制御部

船舶や飛行機では2つの目標点を通るための航路を制御するが，それは航路上の位置を制御するのではなく，実は針路制御部にわたす指令針路を決めることに相当する．実際の航海においても操



(A) 好ましくない　(B) 好ましい

図 7　変針点付近の操船（1）

図 8　変針点付近の操船（2）

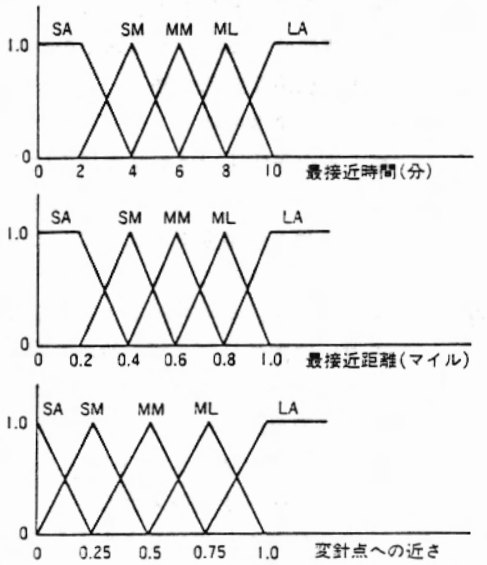


図 9　変針点への最接近時間（TCPA），最接近距離（DCPA），近さ（CDH）のメンバーシップ関数

船者は1日に何度かのベアリング（測距）を行ない，次の目標点に至る直線を引いてその角度を測り指令針路としている．そして潮流や風波の影響でたとえその直線上に船がいなくてもよほどでなければ修正せず，次のベアリングまでその針路を保持する．これは従来海上で位置を同定するのが難しくしかも精度がよくなかったためである．

最近は電波測距や衛星測距システムができてかなりの精度で測定できるようになってきた．それもこれ以上の精度で海の上を通る必要はないのである．

むしろ気を使うのは変針点付近の針路指令である．冒頭で述べたように船は慣性力が大きいので変針点に着いてから針路指令をしていたのでは，はるかにオーバシュートしてしまう．オーバシュート分を見越して手前で変針を指令するのだが，船ごとにその量が違うので判断が難しい．つまり，タイミングのわからないステップ応答ともいえる．

表 3　変針点への近さ（CDH）のファジィ推論則

変針点への近さ（CDH）		最接近時間（TCPA）				
		SA	SM	MM	ML	LA
最接近距離（DCPA）	SA	LA	ML	MM	SM	ZE
	SM	ML	MM	SM	ZE	ZE
	MM	MM	SM	ZE	ZE	ZE
	ML	SM	ZE	ZE	ZE	ZE
	LA	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE

そのタイミングを誤れば後で大幅な修正が必要となり人間の手に委ねざるを得ない．

そこでタイミングとステップ量という2つの確定値をファジィ数で表現すればよいのではないかと考え，これをファジィ制御で実現した．すなわち，

「変針点との近さに応じて次の航路へ向かう路をとれ」

というファジィ則を用いた．

これだと，時々刻々指令針路が制御結果に応じてファジィに変わるので，船の特性や変針角によらずに適用できる．また，図7に示すように何らかの原因によって変針点付近で航路から外れている場合，通常の制御では変針点に向かおうとするむだな動きが起こるが，この方法では次の航路へスムーズに移行する．

さらに，このファジィ則において「変針点との近さ」を表わすのにどうすればよいか．相対距離では表わせない．同じ距離にいても変針点に向かおうとしているのか，ただ通り過ぎようとしているのかによって，とるべき針路は違うはずである（図8参照）．

そこで「衝突危険度」と同様の考え方を用い針点を静止した物標と見なして，その TCPA と DCPA と DCPA から「変針点との近さ」（CDH）をファジィ推論した．用いたメンバーシップ関数を図9に，ファジィ推論則を表3に示す．

（B）　針路制御部

いわゆるオートパイロットの部分である．この機能までもファジィ制御で行なうのはやりすぎかもしれない．しかし，ここにもファジィ制御のよさが生かされている．人間は自然に，しかも連続的に定常時と過渡時で制御ゲインを変えている．PD 制御のステップ応答が人間にかなわないのはこのためである．またノイズに対する応答遅れの

ないフィルタ効果も人間の得意とするところで，ファジィ制御ではメンバーシップ関数の重心計算で自然に実現されている．この2点をねらい図10に示すメンバーシップ関数と，表4に示す制御則でファジィオートパイロットを設計した．

シミュレーションによるシステムの検証

衝突回避システムの検証のためシミュレーションを行なった．シミュレーションの初期条件は自船が船長325 m，船速 10 ノット，時刻0で原点にいて針路は北（X 軸の方向）である．見張りおよ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 秒ごとに呼び出している．

図 11 は自動航行サブシステムの検証を行なった例で，5マイル先で30°変針する航路である．左側が航跡図（5分ごとに○印），右側がタイムヒストリー（上から針路，舵角，船速）である．タイムヒストリーを見ると計画針路はステップ状に変化しているのに対して，実針路がそれより前から徐々に変わっており航路，針路ともオーバシュートなくスムーズに制御できていることがわかる．

表 4　ファジィオートパイロットの制御則

舵角 ＼ 針路偏差	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP
LAN				MLP	LAP	LAP			
MLN				MMP	MLP	LAP			
MMN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP	LAP	LAP
SMN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP	LAP
ZE	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP
SMP	LAN	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP
MMP	LAN	LAN	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP
MLP				LAN	MLN	MMN			
LAP				LAN	LAN	MLN			

（回頭角速度）

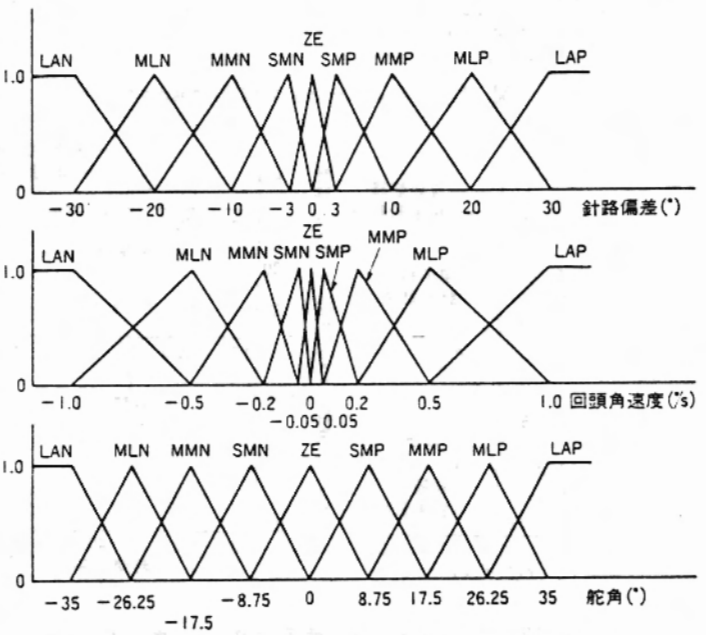


図 10　針路偏差(~~=指令針路−指令針路~~)，回頭角速度，舵角のメンバーシップ関数

図 12 は右前方から相手船（5分ごとに × 印）が接近し，30分後に5マイル前方で衝突するケースである．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 分前に「避航指令」が起動され 30° の変針指令が出ている．そして約 0.8 マイルの距離で相手船をかわし原航路へスムーズに復帰している．

図 13 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自船は針路を保持する義務がある．しかも変針だけではだめで減速する必要があり，実際でも避航判断は非常に難しい．相手船との距離 1.2 マイル，衝突の 10 分前まで相手が避けないのを待って初めて衝突回避措置をとっている．まず 50° 変針と半速を指令，ところがほぼ同時期に相手船がこちらに気づ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），あるいはこちらに気づかずに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．さらに変針を指令，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面舵一杯（舵角 35° 旋回）に近いパニック状態だけにほぼ満足できる結果といえる．

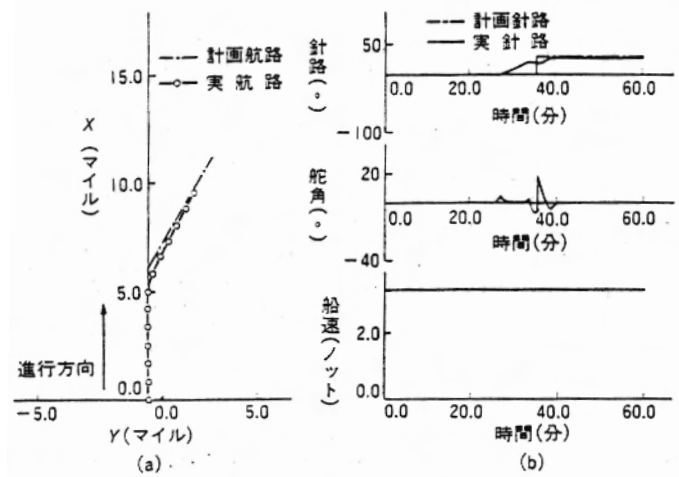


図 11　シミュレーション結果（屈曲航路の航行）

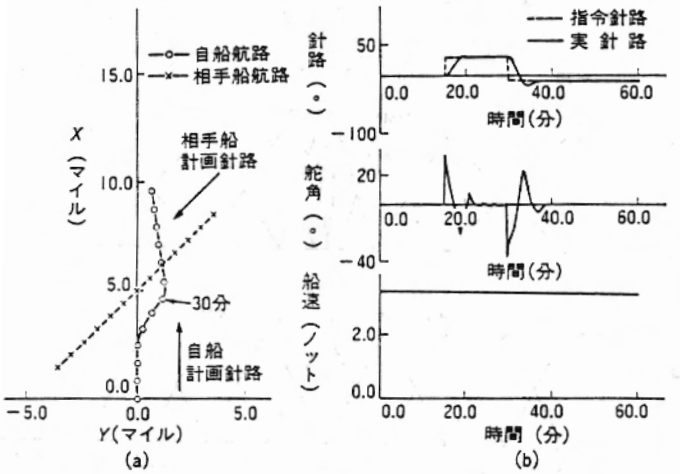


図 12　シミュレーション結果〔右前方からの横切り船（保持船）がきた場合〕

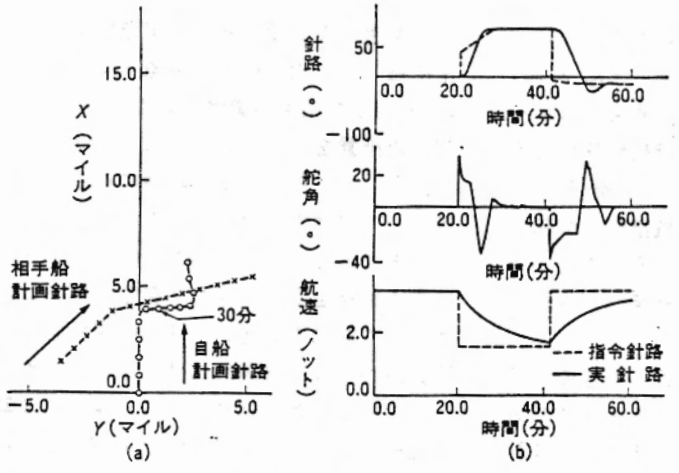


図 13　シミュレーション結果〔左後方からの横切り船（義務船）で，しかも急に変針してきた場合〕

☆　　☆

船舶ほど大自然の力を恐れ，かつそれと調和して共存している交通機関はない．船舶の歴史は人間の歴史ほど古い．ところが船舶は時定数が大きく人間には操船の難しい交通機関である．また何日間にもわたり閉じ込められた世界であり，しかも年々合理化，自動化が進み乗組員の数は減ってきている．心理学者によると 10 人以下の閉鎖社会は牢獄と同じだそうだ．しかし日本が海洋国家であり，諸外国との貿易で発展してきた中で船舶とその乗組員の果たしてきた役割は大きいし，今後も変わらないであろう．こうした中で単にある決まったシーケンスを自動化するだけではなく，人間そのものを機械におき替える試みは船舶にはますます必要である．そして人間の判断や動作に近いファジィ推論やファジィ制御はその突破口の１つである．

「揺れない船」，「40 ノットを越える高速船」，「無人船」……等々われわれの夢は続く．その多くは自然との戦いでありオートメーションの技術である．

参考文献

1) 長谷川，上月：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，(昭 62)
2) 細田，黒井：最適航法，第２回耐航性に関するシンポジウム，日本造船学会（昭 52)
3) 寺野，村山，菊池：Fuzzy DP による帆船航の最適化，計測自動制御学会学術講演会，(昭 60)
4) 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，(昭62)
5) Koyama, Jin : An Expert System Approach to Collision Avoidance, Eighth Ship Control Systems Symposium, the Netherlands, (1987)

□