避 航 領 域 に つ い て の 一 考 察

藤 井 弥 平*

A Consideration on the Effective Domain

Y. Fujii

Abstract

Since the size of the effective domain is an important quantity for the estimation of traffic capacity, it has been studied by measuring two-dimensional separation between ships.

A theoretical estimation for the effective domain is tried by defining it as the totality of $(\vec{R}_1 - \vec{V}_2 t)$ expanded with a radius equal to that of the geometrical collision radius over a time range from $t=t_0$ to $t=t_0+T$, where $\vec{R}_1$ is the position of a keeping-way vessel, $\vec{V}_2$ is the velocity of a giving-way vessel, and T is the sum of time length necessary for the detection of the change in the velocity of the keeping-way vessel and that for the evasive motion of the giving-way vessel.

When $\vec{R}_1$ is equal to $\vec{R}_{1(t=t_0)} + \vec{V}_{1(t=t_0)}t$, the effective domain is equal to the manoeuvrable limit. However, the velocity of the keeping-way vessel is not guaranteed to be constant, and consequently, it is given as a representation of a group of equi-probability curves. These equi-probability curves may be obtained by the statistical investigation of behaviors of vessels.

The time length, T , is obtained from the distribution of motional characteristics of vessels and the minimum value should be about $5\tau_1 + 3\tau_2$, where τ is the characteristic time and is equal to (ship length)/(speed) and suffixes, 1 and 2, correspond to the keeping-way vessel and giving-way vessel respectively.

Above consideration allows derivation of formulae for the effective domains for different encounter condition, e. g., crossing, taking over, by adopting equi-probability curve corresponding to a probability of 99.99%, which is obtained from the study of collision probability.

1. ま え が き

海上交通に関し、実態の観測・調査・研究がすすめられるとともに理論的な解析もはじめられ、交通容量をもとめるのに必要な避航領域および交通量と衝突発生率などについてもかなりの資料が集積されてきた。

しかし、横切のときの避航領域や航路交差部の容量などについては研究がはじめられた段階である。同航の場合の避航領域については理論の面からもかなりのことがわかっているが、これを横切の場合にも通用するようなものにしたいとつねづね考えていたところ、一応考えをまとめることができた。

* 電子航法研究所 (三鷹市新川6—38—1)

ただし、レーダによつて航行する場合の考えかたは目視によるものとかかなりちがうように思われるので、ここでは対象を視界のよい場合にかぎることとする。

避航領域とは、船のまわりにあつて他船がその中にはいるのをさける領域であつて、ふつうは他船の中心を点として考えるが、各々の船がまわりにバンパーをもつような考え方もある。ここでは前者をとることにする。また閉塞領域は速度差（ベクトル量）の大きさが0またはそれに近い場合……当然同航にかぎられる……の避航領域と解釈する。

閉塞領域については観測例も多く[1], [2], [3], これは進行方向に長い楕円形で近似でき、船の速力がほぼ航海速力 V_n のとき、その長半径 r は $7L$ 前後、短半径は $3L$ 前後 (L は垂線間長または登録長) であることが観測によつてえられている。その後、先行船の右・左折または停止の信号をしたとき後続船が逆転制動をかけて衝突を回避するという場合の後方閉塞領域の大きさを、船の運動性能の平均値とその標準偏差の調査結果をもちいてもとめた。このときは船の性能のちらばりを標準偏差の2倍までの範囲にかぎつたため、観測値 r のほぼ $\frac{1}{2}$ ほどの値をみちびいた[4]。

渡辺氏[5] は先行船の運動に対し、後続船は衝突をさけるための運動の過程および心理的反応を時々刻々あとづけることの困難さを指摘し、後続船操船者の心理的むだ時間や船の運動の時間おくれなど一切を実効時間おくれ $T_{実}$ にくりこみ、この $T_{実}$ をもちいて回頭の場合と逆転制動の場合について解析した。ついでこの $T_{実}$ が L に比例するものと仮定し、この $T_{実}$ を閉塞領域の観測値から逆算し後方閉塞領域の速力依存性をもとめた。

このうち、田中氏たち[6] により反航船に対する占有幅が $5L$ 前後であることが観測によつてもとめられ、最近、榊氏たち[7] は小型船に対するアンケートにより避航状態を調査し、山口氏たち[8] は瀬戸内海狭水道の交差点附近において特に交差の場合の航跡の分布に注目して観測を続けている。

これまでに避航と衝突の関係およびそれらと交通量の関係について解析し[9], また田中氏らとともに交通容量について協力して研究をすすめてきた。航路交差部の容量およびそこでの衝突防止が海上交通工学にとつて解明しなければならない大きな問題であるので、さきの交差部の容量に対する考察[10] につづいて横切の場合の避航領域について解析をこころみ、渡辺氏の方法を反航・横切の場合をふくめた一般的なものに拡大し、船の特性時間を解析に導入しかつ衝突確率と関連づけて確率を定量的にあらわし、かつこれらをもちいた値と観測によるものを比較し、一応まとめることができたのでここに報告したい。

2. 避航領域をあらわす式

「相手船が直進すると信じてはならない。そして相手船にできるだけ近よらないことが安全につながる」、「相手船の意図がわからないのが一番の問題である」と操船者から聞くし、また海上交通解測の際右折・左折・後進の短音信号を必要とされる場合にも信号を発しない場合もしばしば見うける。また船が高速・大型化すると音響信号では到達距離が充分でない場合も多い。(明瞭可聴範囲は向風で $0.3 \sim 0.7\text{km}$, 横風で $0.5 \sim 1.2\text{km}$, 追風で $1 \sim 3\text{km}$ 程度といわれる)

もしいわゆる針路保持船 (bounded vessel) の速度が変化せずかつ正確によみとられることを仮定すれば、避航領域は鞠谷氏のみちびかれた衝突回避限界[11] からもとめることができる。しかし保持船の速度は予告なしに変化するかもしれない。したがつて避航領域にはいわゆる保持船の将来位置についてすべての可能性について検討する必要がある。

このため、衝突回避限界の考え方も、さきにもとめた逆転停止距離の分散からみちびいた後方

閉塞領域の針路方向の大きさをもとめた方法も総合し、基本的には渡辺氏の方法を発展させて、これに衝突の確率をもつてきて、避航領域の一般式をみちびこうと模索をつづけ一応次のような式をみちびいた。

原点を水面上の1点にとり、時間を t とし $t=t_0$ までいわゆる保持船(添字1)もいわゆる避航義務船(添字2)もある速度(ベクトル量, $\vec{V}_{原}$)で直進してきたとする。また船1と船2の中心の位置ベクトルをそれぞれ $\vec{R}_{1(t)}$ および $\vec{R}_{2(t)}$ とする。衝突がおこるということは両船の中心間距離が幾何学的衝突直径* d の $\frac{1}{2}$ 以下になること、すなわち、

$$|\vec{R}_1 - \vec{R}_2| \leq \frac{1}{2}d \dots\dots\dots(1)$$

が時間 $t=t_0$ から t_0+T までの間に一度でも成立することである。この式を次のようにかきかえることができる。

$$|[\vec{R}_1 - \vec{V}_{原1}(t-t_0)] - [\vec{R}_2 - \vec{V}_{原2}(t-t_0)]| \leq \frac{1}{2}d \dots\dots\dots(2)$$

左辺の第一の項は船1の中心が時間 t において船2の行手を閉塞しているとみなせる地点をあらわし、実際にはある確率分布でしめされる。第二の項は船2が避航しないで進むときの $t=t_0$ の位置、すなわち現在位置である。したがって時間 $t=t_0$ すなわち現在の船2の位置が他船の閉塞している範囲から $\frac{1}{2}d$ はなれていなければならない。

ここで、船2の操船者が、船1の速度の変更をみとめるのに要する時間を $T_{認}$ 、船2が船1に対し避航動作をおこないその効果があらわれるまでの時間を $T_{避}$ とし、添字 min は最小をあらわすこととすると避航領域は $[(\vec{R}_1 - \vec{V}_{原1}(t-t_0))]$ をまわりに $\frac{1}{2}d$ だけひろげたものの $t=t_0$ から $t=t_0+T_{認min}+T_{避min}$ の集合としてあらわすことができる。

最初、船にはその運動性能によつてきまる固有閉塞領域というものを考え(航海速力のときには前方に $4L$ 、側方に $3L$ 程度、大角度転舵による避航を考える)つぎにこれを(相対速度) $\times T_{避min}$ だけ船1の方にずらすとほぼ衝突回避限界に相当するものがえられること、さらにこれに $T_{認}$ に相当するだけの $[\vec{R}_1 - \vec{V}_{原1}t + \vec{V}_{相}]$ の集合を加えることなどによつてかなり実際的な避航領域までもつてくることができた。ここに $\vec{V}_{相}$ は相対速度 $\vec{V}_1 - \vec{V}_2$ をあらわす。しかし相手船1は $T_{認}$ のあとなお速度をかえてゆく可能性があり、これを考えに入れると終局的に式(2)におちつくことになる。

この避航領域のもとめ方は、(1)同航の場合だけでなく横切や反航などの場合にも適用できる、(2)船の大きさがことなる場合にももちいられる一般的なものであり、少々手なおしすればレーダによつて航行する場合や障害物に対する避航領域にも応用することができよう。

ただし、この導出のしかたは理論的なもので、実際の大多数の操船者の認識・思考のパターンと一致しているかどうか、それが一致しているとしても $\vec{R}_1$ の確率分布や $T_{認}$ や $T_{避}$ あるいは衝突の確率など今後の調査にまち、または調査の精度がおとるものなどがあつて不確定な要素が多く、しかも横切の避航領域など理論による結果と対比すべき観測量がまだ研究着手の段階にあるなどの問題がのこされている。

しかし、海上交通実態調査や交通容量、衝突の確率など蓄積された情報量は小さくはないのでこれらをもちいて避航領域の大きさをできるだけ定量的に推定することを試みたい。

* : 船1および船2のむきをそのままにして、船1のまわりに船2を接触させながらうごかすとき、船2の中心は閉曲線をえがく。この閉曲線の形に両船のなす角によつてことなる。船1の中心をとる直径を幾何学的衝突直径となづけたい。この最大値は両船の全長の和の $\frac{1}{2}$ で最小値は最大幅の和の $\frac{1}{2}$ である。ここでは他の量の精度を考えると $\frac{1}{2}(L_1+L_2)$ でおきかえても充分よい近似とみなせる。

3. 船の将来位置とその確率分布

時刻 $t=t_0$ で速度が $\vec{V}_{原1}$ のとき、時刻 t における船1の位置 $\vec{R}_1$ の分布は、船の運動性能、操船者の習慣やうけた教育および海上衝突予防法などによつて限定されて、ある確率分布……その船が現在の速度ですすむとして予測される点附近がもつとも高い存在確率をもつような分布でしめされよう。ただし航路の屈曲部や交差部、陸岸、浅瀬、障害物などの近くでは確率分布は影響をうけるであろうが、ここではこのような場合は考えないことにする。

3.1 船の運動性能と特性時間

さきに船の総トン数 G や型幅 B などの大きさをあらわす量と垂線間長 L との関係、および旋回縦距（アドバンス） $D_{縦}$ や旋回径（タクティカルダイヤ） $D_{径}$ 、逆転制動 停止距離 $D_{停}$ 、航海速力 $V_{航}$ などの運動性能をあらわす量と L の関係を調査して、対数一次式であらわしその標準偏差もあわせてもとめた[4]。たとえば $V_{航}$ をノットであらわし L を m であらわして $\log L$

を λ とかくと、

$$\log V_{航} = 0.29\lambda + 0.52 \pm 0.06 \dots\dots(1)$$

というようにあらわせる。ここに標準偏差 σ が 0.06 であることは、もし速力が対数正規分布にしたがうときは標準の値の 87~115% の間に 68.3% が、76~132% の間に 94.5% が、66%~151% の間に 99.74% が、58% から 174% の間に 99.997% の船があることを意味する。

つぎに船の運動を記述するのに時間的な面も重要で、このためには船に固有の時間をものさしとするのが自然であり、この一つとして特性時間 $\tau (=L/V_{航})$ をもちいることとし[12]、大角度転舵の場合の旋回に要する時間や逆転制動停止に要する時間の調査結果を図1にしめす。このように船が非常に大きくならないかぎり、一定とみなしてよく、そのちらばりも小さい。いいかえると超大型船では航行に特別の配慮を必要とすることを意味する。

図1 逆転制動をかけて停止するのに要する時間 $T_{停}$ (●印) ならびに大角度転舵により旋回するとき原針路から 90 度および 180 度回頭するのに要する時間 $T_{90度}$ (○印) および $T_{180度}$ (×印)。船の長さ (垂線間長) は対数スケール、縦の棒は標準偏差をあらわす。

3.2 将来位置の分布

相手船の将来位置の分布を推定するために、(1)現在の相対位置の推定、(2)速度の推定、(3)運動状態をかえる確率等についてわかつていなければならない。

(1)については見張りの人の眼高 (水面からの)、経験など多くの要素の影響をうける量で目視の場合はほぼ距離の自乗に比例して誤差が大きくなるものと考えられるが、ここではつぎの速度の推定誤差によるものほど重要ではないと考えている。

(2)については針路と速力にわかたれる。目視のときは、1 目みて針路と船の大きさがかなりの程度まで推定でき、それから速力も推定できる。船の総トン数の推定の精度は対数誤差 $(=\log 4G/G)$ で 0.3 程度、長さ推定の対数誤差は 0.1 程度 ($\pm 25\%$ 程度)、すなわち船の大きさを ~ 1

～5～20～100～500～3,000～2万～10万総トン～でわけた程度の推定ができるにすぎない[13]。これと式(1)および誤差の伝播の式をもちいると相手船を1目みて速力を推定するときの対数誤差は、

$$\log \{(V_{推}-V)/V\} = [\{0.29 \log(\Delta L/L)\}^2 + \{\log(\Delta V/V_{航})\}^2]^{1/2} \div 0.07$$

程度となる。一方各地での交通実態調査でえられた速力の観測値から船の大きさの級別の対数標準偏差を計算すると、

2万総トン以上の船で 0.05 (12%), 3千～2万で 0.08 (20%), 500～3,000 で 0.07 (18%), 100～500 で 0.08 (19%), 20～100 トンで 0.10 (25%)

となる。したがって航海中の船をみて速力を推定するときの対数誤差 $[\log(V_{推}-V)/V]$ は 0.08 程度と考えられ、さらに熟視(双眼鏡使用もいれて)により船型その他の情報をいれるとさらに誤差が減少し、あるいはその後の位置の観測により針路・速力ともに推定の精度が向上する。

図2に、相手船の特性時間を τ 、針路推定の標準偏差を5度、速力推定の対数標準偏差を0.05とし、相手船が直進する場合の将来位置の確率分布をしめす。

図2 時間の経過ともなう前後方向の位置の不確定性(下の図)および2次元のひろがり

つぎに、のこされていた(3)運動状態をかえる確率であるが、これをわけると、

- (i) 原速度をたもつ確率, $1-\alpha_{変針}-\alpha_{変速}$
- (ii) 針路をかえる確率, $\alpha_{変針}$, これはまた右転と左転にわけられ、それぞれ変針の角度に対応する確率密度関数をもつ。
- (iii) 変速の確率, $\alpha_{変速}$, 主として減速でありこのもつとも急激なものは逆転制動をかける場合である。

以上の3要素についてこれを定量的に表現できるほど十分な資料は少ないが現在得られている

ものから推定してみる。

山口氏らの調査によると、[8] 宇高航路と瀬戸内海東西航路の交差部において 104 件の横切の場合では 33 件の保持船側の避航、7 件の両船の避航、64 件の避航義務船側の避航がみられ、その置のほとんどは「変針」であつた。また、鍋島附近では南北航路がフェリーという特殊事情もあり、通常フェリー側が避航している。したがって保持義務船が避航もる確率は小さくなく、 $\alpha_{\text{変針}}$ は安全側にとつて $\frac{1}{2}$ としておく。 $\alpha_{\text{変速}}$ は小さく、1 けた下の 0.1~0.05, あるいはそれ以下とみなしてよいであろう。

変針する場合に右転舵と左転舵の比は相手船との関係でことなるでのの榊氏らの調査から[7], 右:左が 3:1 程度とみて大きなあやまちはないと考えられる。つぎに変針角度の分布であるが、原氏の調査によると[14], 超大型船 (DWT 12万トン, L_{pp} 256m) のコースレコーダの記録の解析から, (A) 大洋航行中 (避航 191 件) およびペルシヤ湾 (72 件) での右転:左転の比は 10:8 位, マラツカ海峡 (75 件) では 2:1 程度であること, (B) 避航角の増大にともない使用頻度が指数関数的に急減すること (図 7 [14] の析線から近似曲線 $A\theta^{-10\theta}$, θ :ラジアン単位, がえられた), (C) 10 回に 1 回位のわりあい避航角をもう一段増加させる, 等について報告している。これらを総合して, 最初速度推定にあやまりがなく, なお船の運動性能も知られているときの船の将来位置の確率分布を図 3 にしめす。

図 3 転舵または制動を考えはときの推定位置の確率分布

以上資料は到底充分とはいえないが図 2, 図 3 を総合して針路保持義務船 ($1 - \alpha_{\text{変速}} - \alpha_{\text{変針}}$ をみつもつているので相手船が避航義務船であつても大してちがいはない) の将来位置の確率分布を大まかに推定して図 4 A にしめす。

図4 船の中心の将来位置分布

(A. 点線は船の大きさを考えてひろげたもの) および避航領域 (B. C. D. 鎖線でしめたもの)

3.3 避航領域の大きさをきめる確率の値

図4に将来位置の確率分布をしめたが、この存在確率を 68.5% (正規分布で $\pm\sigma$ ……標準偏差), あるいは 95.4% ($\pm 2\sigma$, ふつう確率分布の範囲を 95% でかぎつてしめす場合が多い), 99.74% (3σ) とするのがよいのであろうか? さきに衝突に衝突発生率についてしらべ、船が相手船を全く考慮しないで航行するときの衝突発生率を1とすると、操船者の意志により航行する場合、発生率がほぼ1万分の1のけたになっていることをしめた。これは10万回の避航で1回失敗することに相当する。したがって現状ではこの確率分布の範囲を $P=99.99\%$ できめて避航領域をもとめるのがよいと考える。もし分布が正規分布ならば 99.9% は $\pm 2.6\sigma$ に, 99.99% は 3.3σ に, 99.999% は $\pm 3.9\sigma$ に, また 99.9999% は $\pm 4.5\sigma$ に対応するので、衝突危険率を1けたさげてもそのために必要な避航領域はそれほど大きくはならないことに留意されたい。

なお、1万分の1という衝突危険率……これはほぼ現状の100トン以上の鋼船の年1回衝突に対応する……はいかにも大きいようにみえるが、これには約3割の浮遊物や地球附属物との衝突をのぞきほとんどが軽微な接触などであつて、重大損傷や全損などはその1/100 (3,000GT以上), 2/100 (500~3,000GT), もしくは5/100程度であり、航行距離について考えると、衝突により重損以上となる率は $2\sim 5 \times 10^{-7} \text{km}^{-1}$ 程度であつて、これを自動車の衝突による重大事故発生率の $2 \times 10^{-6} \text{km}^{-1}$ 程度 (年間合計走行距離約 $2 \times 10^{11} \text{km}$, 40万台) にくらべて小さいものでありかなり人間の注意力の限界に近いものと考えている。なお、参考のために航空機の全事故は $5 \times 10^{-6}/\text{時間}$, $1 \times 10^{-8} \text{km}^{-1}$, 乗客死亡率は1kmあたり旅客船は 7×10^{-9} , 国鉄は 10^{-10} , 旅客機は 10^{-8} , バスは 5×10^{-9} , 乗用車は 2×10^{-8} であることをあげておこう。

ここで確率について多く言及した理由は、ある人は衝突確率を0にするべきであると声を大にされるであろうが、海上交通工学の立場からは、現状をよく把握して、この確率を1けた、でき

れば2けた下げるにはどれ位避航領域が大きくなる必要があり、したがって航路の容量がへりどれだけの拡幅を要するのであろうか、あるいは抜本的に船の変針等の意図をさらに大きくして速度（針路+速力）の情報が表示されれば今の程度の避航領域で衝突件数がどれくらい減少すると推定されるのか？ もしくは衝突の多い水域である種の交通規制をおこなうとどれ位衝突発生率を減少させ得るのか？ などの評価をおこなうために0ではなくて10 マイナス何乗という確率が重要なのである。

4. 認識時間 $T_{\text{認}}$ および避航時間 $T_{\text{避}}$

さきにのべたように相手船の速度の変更をみとめるのに要する時間 $T_{\text{認}}$ および自船が避航動作をおこなってその効果があらわれるまでの時間 $T_{\text{避}}$ の合計の最小必要限界をもとめねばならない。 $T_{\text{認}}$ をきめるには相手船の位置・針路などの推定精度が問題になるが、ここでは相手船および自船が平均的な性能をもつとして、「原速度ですすむ場合の想定位置から L だけはなれるのに要する時間」をもつて仮に定義したい。というのはその後の位置は原速度を延長した想定位置からかなりすみやかに離れてゆくからである。たとえば $T_{\text{認}}$ や $T_{\text{避}}$ の最小値はふつう大角度転舵による旋回もしくは逆転制動をかける場合のいずれかを検討してえられるが、逆転制動の場合原速度ですすむときの想定位置から $L/2$, L もしくは $2L$ だけはなれるまでの時間は表1のように制動がききはじめてからあとかなりすみやかに想定位置からずれてゆく。なお表2には大角度転舵の場合に60度、90度、および120度……それぞれ想定位置から L , $2L$ 弱および $3L$ ほど離れる……方向がかわるのに要する時間をしめす。ただし以上の数値は原速力が航海速力である場合で、このときは、旋回による避航の方が逆転制動による避航よりも必要な時間 $T_{\text{避}}$ が短か

表1 逆転制動停止の場合の諸元（原速力が航海速力の場合で一定減速と仮定、括弧内は推定）

垂線間長	特性時間	停止距離	停止時間	$T_{\text{認} \frac{1}{2}L}$	$T_{\text{認} L}$	$T_{\text{認} 2L}$
(400m)	(44秒)	(16L)	(32 τ)	(5.7 τ)	(8.0 τ)	(11.0 τ)
200m	25秒	8.5L	16 τ	4.0 τ	5.5 τ	8.0 τ
100m	15秒	7.5L	14 τ	3.7 τ	5.3 τ	7.5 τ
50m	9秒	6.2L	12 τ	3.4 τ	4.9 τ	6.9 τ
25m	6秒	4.4L	9 τ	3.0 τ	4.2 τ	6.9 τ

表2 大角度転舵による旋回の諸元（原速力は航海速力）

垂線間長	アドバンス	旋回径	$T_{60\text{度}}$	$T_{90\text{度}}$	$T_{120\text{度}}$	$T_{180\text{度}}$
(400m)	(2.9L)	(3.0L)	(2.8 τ)	(4.5 τ)	(6.3 τ)	(9.9 τ)
200m	(3.0L)	(3.1L)	(2.7 τ)	(4.4 τ)	(6.2 τ)	(9.0 τ)
100m	(3.2L)	(3.3L)	(2.7 τ)	(4.1 τ)	(5.4 τ)	(8.2 τ)
50m	(3.2L)	(3.3L)	(2.9 τ)	(4.3 τ)	(5.3 τ)	(8.2 τ)
25m	(3.3L)	(3.4L)	(3.0 τ)	(4.1 τ)	(5.1 τ)	(7.3 τ)

注：船舶検査官のご好意により、その資料をもちいて計算。 L は L_{PP} をあらわす。 $T_{60\text{度}}$ と $T_{123\text{度}}$ は $T_{30\text{度}}$ $T_{90\text{度}}$ $T_{180\text{度}}$ から推定。

くてすすむ。一般に旋回径などは原速力が航海速力でなくてもあまり変化しないこと、および逆転制動をかけるとき等減速で近似できることから、速力が低い場合の $T_{\text{認}}$ や $T_{\text{避}}$ の最小値もとめられるが、ここでは原速力が航海速力の場合のみを考えることとする。

したがって相手船（添字1）の変針をみとめるには最小 $2.7 \sim 3\tau_1$ 、減速をみとめるには総トン数2万トン以下の船では最小 $4.2 \sim 5.3\tau_1$ の認識時間を要しこの両方を考えると最小 $4.2 \sim 5.3\tau_1$ 、または約 $5\tau_1$ の $T_{\text{認}}$ を必要とすることになる。なお、 L_{pp} が200m（総トン数2万トン強）あたりより上では表1にみられるように $T_{\text{認}}$ が $5\tau_1$ から $7\tau_1$, $8\tau_1$ と増大する上に、 τ_1 も25秒から30秒、40秒と大きくなることもあるので、超大型船に対しては他船は充分長い $T_{\text{認}}$ (L_{pp} が300mの船……DWT約20万トン……では約2.5分) を考えておかねばならないことを指摘しておきたい。

避航がききはじめる時間は、自船の特性時間を τ_2 として、最小 $2.7 \sim 3\tau_2$ 、すなわち約 $3\tau_2$ の $T_{\text{避}}$ を必要とする（表2）。ただし L_{pp} が160m前後の船は特に高速船が多く、このあたりだけ約 $3.6\tau_2$ 程度の $T_{\text{避}}$ 、したがって高速であるから当然ともいえようが大きな避航領域をもたねばならない。

以上をまとめて $T_{\text{認}} + T_{\text{避}}$ の最小限度は約 $5\tau_1 + 3\tau_2$ の程度と推定することとした。

5. 避航領域の推定

以上の検討の結果をもちいていろいろの場合の避航領域を推定し、これと観測でえられたものがあればそれとを比較したい。ただしここではほぼおなじ位の大きさの両船がほぼおなじ航海速力で航行する場合、したがって $L_1 = L_2 = L$, $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ を対象とし、同航、反航、およびほぼ直角に横切の場合について考えることにする。

5.1 同航の場合

このときは $\vec{V}_{\text{原1}}$ と $\vec{V}_{\text{原2}}$ はほぼひとしく $\vec{V}_{\text{原}}$ とかくと渡辺氏の解析の主要部と一致する。これに確率を99.99%とし、 $(T_{\text{認}} + T_{\text{避}})_{\text{min}}$ をさきの検討にもとづいて 8τ として避航領域が推定できる。

避航領域は、時間 t が t_0 から $t_0 + 8\tau$ までの間、時々刻々の位置の位置確率分布を $\vec{V}_{\text{原}}(t - t_0)$ だけずつひきもどしたものの集合である。これを図4Bにしめすが、観測でえられている長半径約 $7L$ 、短半径 $3L$ にくらべ左右に広く、前後にみじかい。これは推定にあたって左右への回頭の確率を大きくとりすぎているためではないかと考えている。（逆に操船者が $P = 99.99\%$ のかわりに 99.9% をとつたとも考えられる）。

5.2 反航の場合

このときは相手船の位置分布をさらに $-\vec{V}_{\text{原2}}(t - t_0)$ だけすすめたもので、図4Cにしめすようなものとなる。これは観測による反航船に対する避航幅約 $4L$ より大きいが、これは反航の場合相手船の回頭の反対側に転舵すれば安全にかわるため相手船の変針に大きなウェイトをおかないことによるものとも考えられる。

5.3 横切の場合

相手船の時々刻々の位置分布を $-\vec{V}_{\text{原2}}(t - t_0)$ づつ横にずらせたものの集合であつて図5Dにしめす。これと比較するような観測値は山口篤利氏たち、アンケートによるものは榊氏たちによつて研究がすすめられていて、比較検討の時期は遠くない。

ただ、避航領域の形や、安全性を考えると、避航義務船が保持船の船尾側へ変針して交差する方が、航路を直角に横切るよりも安全で、しかも交差部の容量をますように考えられるので、

IMCO 勧告による「通航路を横断する船舶は、できるだけ直角にこれをしなければならない」という原則としつくりゆかない。

6. む す び

避航領域については観測・理論の両面から研究がすすめられているが、ここではいままですすめてきた船の運動性能の統計的な研究と、渡辺氏の同航の場合の避航領域の研究、およびさきに報告した衝突の解析などの結果をもちい、一般の行合条件に適用できる避航領域をあらわす一般式をみちびき、かつ定量的な推定をこころみた。

観測値と比較するにはまだ資料不足ではあるが、衝突発生率から考えて位置分布確率を 99.99% でみつめると、同航・反航の場合観測値より大きい避航領域がえられ、99.9% ではほぼ観測値に近いものがえられるようである。

今後、船の大きさのことなる場合、速力が航海速力とかなりことなる場合について解析をすすめるとともに、横切の場合の避航領域の観測調査および交差部の容量の研究に参加してゆきたい。

おわりにおたつてご指導ご検討をいただき神戸商船大学山口教授、船舶技術研究所田中研究室長をはじめとする各位にあつく感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- [1] 藤井, 渡辺, 田中, 山田, 宮城: 小型船の閉塞領域の調査, 船研報告, 3 卷, (1966), p. 43~59.
- [2] 藤井, 渡辺, 田中, 山田, 関: 大型船の閉塞領域の調査, 船研報告, 3 卷, (1966), p. 59~68.
- [3] 藤井, 渡辺, 田中, 山田, 沢井, 金丸: 中型船の閉塞領域の調査, 船研報告, 4 卷, (1967), p. 115~128.
- [4] 藤井弥平: 船舶の航行容量の試算, 船研報告, 3 卷, (1966), p. 387~396.
- [5] 渡辺健次: 後方閉塞領域の導出とその例, 船研報告, 3 卷, (1966), p. 397~401.
- [6] 日本海難防止協会: 狭水道における船舶交通の実態調査完了報告書, (1969).
- [7] および [8] 日本海難防止協会: 海上の交通安全に関する調査研究中間報告書, (1970).
- [9] 藤井弥平: 船の衝突直径と衝突発生率, 日本航海学会誌, 42号, (1969), p. 1~28
- [10] 藤井弥平: 航路交差部の容量についての一考察, 航海, 31号, (1970), p. 81~84.
- [11] 鞠谷宏士: 船の衝突回避限界について, 日本航海学会誌, 36号, (1967), p. 86~90.
- [12] 藤井弥平, 田中健一: 海上交通工学序説, 船舶, 24卷, 7~10号, (1969).
- [13] 藤井弥平, 田中健一: 海上交通実態調査に関する二, 三の問題について, 航海, 30号, (1969), p. 78~85.
- [14] 原 潔: 超大型船の避航動作の分析, 日本航海学会誌, 37号 (1967), p. 137~144.

〔質問〕 避航に要する時間の計算をするときに、避航を開始してから避航を終えて元の針路にもどるまでの時間をとるべきではないでしょうか。 原 潔 (神戸商船大学)

〔解答〕 避航に要する時間 $T_{\text{避}}$ は、相手船の変速に対し、自船の避航動作が発効するまでの最小時間と考えています。したがってあとで原針路にもどるのに要する時間ははれないでよいと考えています。

〔質問〕 T は船の相対位置によつてかわると考えてよいでしょうか。

鞠谷宏士 (東京商船大学)

〔解答〕 $T_{\text{認}}$ は相手船までの距離によつて幾分かかります。しかし変針のときはこのかわり方は小さく、また逆転制動のときは表にしめしたように制動がききはじめると加速度的に想定位置からとおざかるので $T_{\text{認}}$ のかわり方もそう大きくはないものと考えられます。また、 $T_{\text{避}}$ は相対距離とは関係がないので、 $T_{\text{認}}$ と $T_{\text{避}}$ の合計である T は相対位置によつて大きくは変らないものとみなされます。