

避航コースの選択と同航時船舶避航領域の算定

Giveway Course Choice Model and the Effective Domain of Ships in Overtaking

喜多 秀行*, 桧垣 亨**, 長谷川 雅一***

By Hideyuki KITA, Tohru HIGAKI
and Masakazu HASEGAWA

Calculation of the traffic capacity of channels is based on analysis of congested traffic flow, especially the behaviours of the giveaway action. This study improves the previous model describing the ship behaviours in giveaway motion as the results of navigators' choice of giveaway action. The generalized cost function consisting delayed time and loss of ship damage by collision are newly introduced. The influence of traffic congestion to the choice between overtaking and following can be clearly explained. Moreover, the giveaway motions become to be described not only by the distances between overtaking and overtaken ships in lateral direction, but also by the giveaway course. This result expands the model calculating effective ship domains from one-dimensional to two-dimensional.

1. はじめに

沿岸海域における利用の高度化と主要航路における交通混雑の進展に伴い、航路の新設や改良、あるいは交通管制などに関する検討が要請されている。「航路の交通容量」はこの種の議論を合理的に進めるための一つの有用な概念であり、これを算定するための手法を今後確立していくことが期待されているが、そのためには、混雑状態にある海上交通流の特性の把握、なかでも追従や追い越しといった避航挙動をまず記述しておくことが必要である。

海上交通流は極めて広範囲にわたる船型の船舶か

ら構成される混合交通流であり、航海速力も船型によって異なるため、同航船に対してもしばしば避航の必要性が生じる。その際、自動車の運転に比べて操船—船体運動の反応が遅いために、操船者は今後起こりうる状況をあらかじめ推測し、十分事前に行動を決定する必要に迫られる。このことから、海上交通流が、操船者の行動決定分析の面からその挙動を解析するという行動理論的アプローチをとるにふさわしい性質を備えた交通であることが理解される。

しかしながら、避航行動に関する操船者の意思決定の分析やこれに基づいて交通挙動の記述を行った研究は、わずかに航行シミュレーション・モデルの運航判断部を構築するための試みが見られる程度である。

このような観点から、筆者らは避航挙動を操船者の避航行動選択問題として説明するモデルの開発を試みてきた。これまでに、同航船を避航する際の側方船間距離、すなわち同航時側方避航領域の生成構

* 正会員 工博 京都大学助手 工学部交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工修 (株)三菱総合研究所 社会公共システム部 (〒100 東京都中央区大手町2-1-3)

*** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

造を記述するモデルを提案し、所定の交通量のもとで良好な現象説明力を有することを検証している^{4),5)}。しかし、このモデルは、交通量が増加するにつれて若干ではあるが避航領域が大きくなるという、常識とは逆のふるまいを見せる点で説明が十分でない。これは、後に述べるように、一定の安全性を保持しようとする限り混雑してくるにつれて追越しの機会が減少しその結果遅延損失が増大するという、操船者にとってのいわば不効用の増大を考慮に入れていなかったためと考えられる。

そこで、本研究では、保持すべき安全性のレベルを下げてまでも上述した遅延損失を回避するか否かという観点から、「追越し避航」と「追従避航」の選択を説明しうるモデルへと拡張を図る。また、先に提案したモデルが、追い越しの際に到達すべき側方の避航目標点を記述するものであったのに対し、当該目標点に至るための避航コースの選択を記述するモデルへと改良を加え、避航コース上における他船との衝突の危険をも考慮することにより避航開始時機の選択までを説明できるようにする。これらの改良により、側方のみに関する従来の1次元避航領域モデルを、後方への拡がりを持つ本来の2次元モデルへと拡張することが可能となる。

2. 避航行動の構成要素とその段階的選択

船舶はその特性上、主として舵を用いて変針することにより他船を避航している。変針避航に伴って形づくられる船舶の航跡を以下では「避航コース」とよぶ。避航コースの形状を規定する要素として、避航開始地点 (D_Y) や側方変移量 (D_X)、あるいは舵角 (δ) や回頭角 (θ) といったものがあり、避航コースはこれら諸要素の組み合わせとして規定される (図-1)。したがって、避航コースの選択とはこれらの要素それぞれの選択の組み合わせにはかならない。

しかし、操船者に対するヒアリング結果によると、その選択は同時に行われるのでは

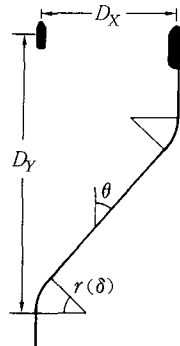


図-1
変針避航コースの
構成要素

なく、ある要素に関して決定した後に次の要素を決定するといったように、どちらかといえば順次行われるようである。また、その順序も必ずしも任意ではなく、まず最初に先行船（前方を航行する低速船）に対して安全と思われる側方間隔を設定し、次いでその位置へどのようにして船を持っていくかを決定することが多いようである。その際、周辺を航行する船舶の状況や操船上の種々の特性を勘案し、無理なく安全に避航を完了するようなコースが選択される。しかし、どのようなコースを選択しても安全に追い越すことができないような場合には追い越しを断念して追従により避航し、さらに緊張を要する局面では舵と機関の両者を併用する。

そこで、モデル化にあたっては、まず側方の避航目標点を選び、しかる後にそこへ至るために最も適切なコースを選ぶという段階的な選択問題として定式化を進める (図-2)。このうち、避航コースの選択については、選択される舵角や回頭角の範囲が他の要素のそれに比べて小さいため、常用される舵角や回頭角で代表されると考えると、結局、避航行動の構成要素のうちモデル化すべきものは、

- ① 「追い越し」と「追従」の選択
- ② 「側方避航目標点」の選択
- ③ 「避航開始地点」の選択

の3つであることがわかる。以下では、3.で上記①と②を、4.で③をそれぞれ定式化する。

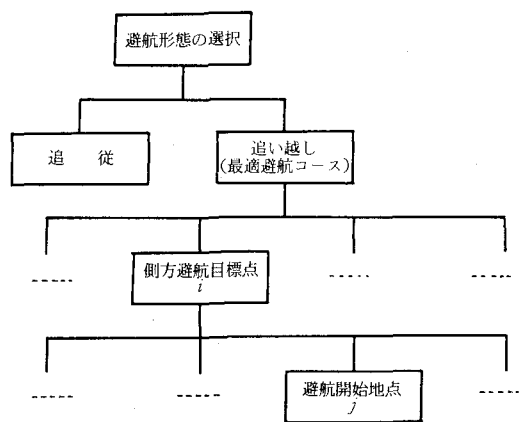


図-2 避航行動の段階的選択構造

3. 追い越しと追従ならびに側方避航目標点の選択

(1) 先に提案したモデル^{2), 3)}の概要

避航、すなわち他船との衝突を回避する局面では安全性の確保が最も卓越する要素となる。そこで、ここでは操船者の効用が安全性の代替指標である衝突危険度の上で定義されるものとする。そして、この尺度上に、操船者がこれ以上大きな危険は受け入れられないため、他の何を犠牲にしても安全性を確保したいと考える上限、“最大許容衝突危険度、 R_{MAX} ”と、安全性を高めることがそれ以上の迅速性や経済性の低下をもたらすためこれ以上安全性を高める必要がないと考える衝突危険度の下限、“最小許容衝突危険度、 R_{MIN} ”を設けている。

幅員水域における避航操船の際に予測される主たる危険は、先行船が突然変針することにより自船に接近し衝突すること、あるいは、それを避けようとして他船と衝突してしまうことと考えられるため、本モデルでは、これらの事象が生起する可能性の確率表現をもって、操船者が抱く衝突危険度としている。

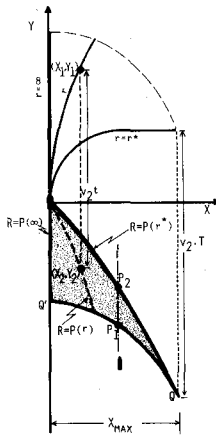


図-3 衝突危険度と衝突危険領域

そして、舵角の分布や航行速度などから、図-3に示すような衝突危険領域とその内部の各位置における衝突危険度を求めている。 (P_1-P_2) で示されるように先行船の進路と平行して追い越す場合は、衝突危険領域の下縁辺との交点 (P_1) 上で衝突危険度が最大となる。この最大衝突危険度は側方避航目標点 i に対する最大衝突危険度 $R(i)$ と呼ばれる。

操船者の避航コース選択基準は、「最大衝突危険度 $R(i)$ の最小化」としている。したがって、先行船ならびに周辺を航行する第三船に対する最大衝突危険度をそれぞれ $R_A(i)$ 、 $R_B(i)$ とすると、

$$i^* = \min \{R_A(i) + R_B(i)\} \quad (1)$$

となる側方避航目標点 i^* が選択される。しかし、このようにして与えられる i^* が最小許容衝突危険度 R_{MIN} を越える場合は、

$$R_A(i^{**}) = R_{MIN} \quad (2)$$

なる i^{**} が選択され、逆に、最大許容衝突危険度 R_{MAX} を越える場合は、もはや変針による避航ではなく追従による避航が選択される。

(2) 追従による遅延損失を考慮した避航目標点選択モデル

航路上における船舶の輻輳が高まるにつれ、追従避航を余儀なくされる頻度が多くなり、1回の追従避航に費やす時間も長くなる。変針により避航できる状況の生起する可能性が小さくなると、それが可能な時に少し無理をしても先行船を追いつけたいとする欲求が生じるであろうことは容易に想像できる。すなわち、やむを得ないとして受け入れる危険度のレベルが高まるものと考えられる。これは、先のモデルで一定値としていた最大衝突危険度が混雑の程度によって変わり、しかも追従避航によってもたらされる損失の大きさと関連していることを示唆している。

そこで、追従する代わりに追いつくことによって節約される損失とそのために増加する安全面での損失を相互に比較しうるように、衝突事故損失 L_c 、衝突危険度 R 、単位時間当たり遅延損失 L_d 、期待遅延時間 t_d によって構成される一般化費用 C 、

$$C = L_c \cdot R + L_d \cdot t_d \quad (3)$$

を導入し、操船者は先のモデルにおける衝突危険度 R ではなく、(3)式で示される一般化費用 C を最小とするような避航行動を選択するものとする。

いま、選択し得る側方避航目標点 i の集合を I とし、先行船を A 、その近辺を航行する第三船を B とする。目標点 i を選択したときの A との最大衝突危険度を R_A 、 B とのそれを R_B とし、目標点 i を選択することによる迂回のための時間遅れを t_d 、単位時間当りの遅延損失を L_d 、 A あるいは B と衝突した場合の損失をそれぞれ L_{CA} 、 L_{CB} とすると、最適避航目標点 i^* は、一般化費用の最小値 Co^* 、

$$Co^* = \min [L_{CA} \cdot R_A + L_{CB} \cdot R_B + L_d \cdot t_d] \quad (4)$$

を満足する i として与えられる。一方、減速して追従行動をとる場合に先行船 A と衝突する危険度を R_F 、追従避航に要する時間を t_F とすると、追従行動をとることによる期待損失は C_F

$$C_F = L_{CA} \cdot R_F + L_d \cdot t_F \quad (5)$$

となる。したがって、操船者は C_0^* と C_F を比較し、以下の行動を選択する。

$$\begin{cases} C_0^* > C_F & \cdots \text{追従} \\ C_0^* < C_F & \cdots \text{追い越し} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 i の違いによる遅延損失の変化は衝突事故損失の変化に比べて極めて小さいため、実際上無視しても差し支えない。

以上の選択行動を図示したものが図-4 である。

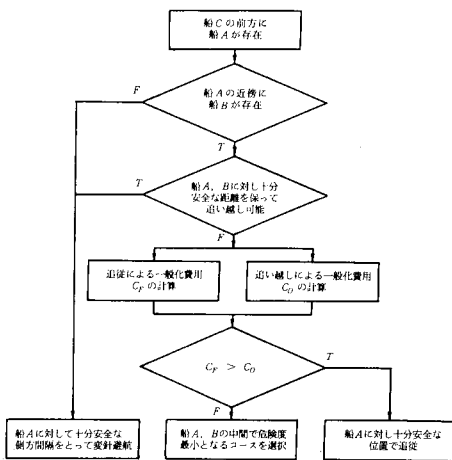


図-4 避航行動決定プロセスのフロー

(3) 追従避航のモデル化と遅延時間の算定

(5) 式からも理解されるように、追従避航に伴う期待損失を計算するためには、追従することによる遅延時間 t_F が算定されていなければならない。そこで、以下では追従避航時の船体運動をモデル化する。

追従避航をモデル化するにあたり、まず、追い越し船の「追従開始位置」と「追従位置」、ならびに「追従終了位置」を設定する必要がある。これらはそれぞれ、追い越し船の操船者が追従避航のための減速を開始する時点における位置、先行船と同じ速

度で追従避航する位置、追越しが可能となって加速を始め当初の速度に戻った時点における位置、を意味しており、先行船を中心に原点を取った相対座標 $(X-Y)$ によって記述される。

追従終了位置

追従終了後、追い越し船は先行船に対して十分安全な位置を通過して変針避航をするため、追従避航終了時の追い越し船の位置は、先行船に対する衝突危険度が R_{MIN} となる側方避航目標点、 (S_{AC}, Y_{AC}) とする。この点を図示したものが図-5 の $t=t_3$ における追い越し船 C の位置である。そして、同時に、第三船に対しても安全な避航ができることが要請されているため、この時点で先行船 A と第三船 B はその側方間隔 X_{AB} に応じた所定の距離 $Y_B^*(X_{AB})$ だけ離れていなければならない。この $Y_B^*(X_{AB})$ は、先のモデル⁴⁾で算定されている“ B と A が追い越し船 C にとって独立となる距離”である。すなわち、 B と A との Y 方向の距離が $Y_B^*(X_{AB})$ となった時点が C の A に対する追従終了時刻 t_3 となる。

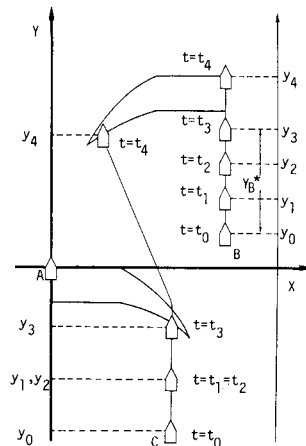


図-5 追従避航モデルの概念図

追従位置

一方、追従位置は、追従から追い越しに移るための加速を終了し本来の速度へと戻った瞬間に追従終了位置にさしかかるような位置として与えられる。

さて、他船の航行状況や速度制限などによって、その場の状況に応じた安全速力にまで減速して航行することが要求される場合には、通常、主機回転数を変えることによって変速がなされる。これは当初

の速度へと戻す場合も同様であり、目標速度に達するまでの時間 t_c とそれに要する航走距離 S_c は、

$$\begin{cases} t_c = 2(m + mx)/k \\ S_c = (V_0 + V_1)(m + mx)/k \end{cases} \quad (7)$$

V_0 : 現在速度

V_1 : 目標速度

$m + mx$: 前進方向の見かけ質量

k : 船の抵抗係数

で与えられる⁴⁾。したがって、

$$t_2 = t_3 - t_c \quad (8)$$

であり、追従位置のY座標 $y(t_2)$ は、追従終了位置のY座標 $y(t_3)$ から次式によって求めることができる。

$$y(t_2) = y(t_3) - \{S_c - (V_0 - V_1)t_c\} \quad (9)$$

ただし、ここでは V_0 がCの速度 V_C に、 V_1 がAの速度 V_A に対応する。

追従開始位置

また、Cは時刻 $t_1 (< t_2)$ に減速を終えて $y(t_1) = y(t_2)$ に到達しているのであるから、追従を開始すべき時刻 t_0 と追従開始位置 $y(t_0)$ は、同様に、

$$t_0 = t_2 - t_1 \quad (10)$$

$$y(t_0) = y(t_1) - \{S_c - (V_0 - V_1)t_c\} \quad (11)$$

で与えられる。ここに $V_0 = V_C$ 、 $V_1 = V_A$ である。

追従位置は、先に述べたように衝突危険度が R_{MIN} となるような側方避航目標点 (S_{AC} , r_{AC}) であったから、以上に示した関係式を用いて $t_1 \sim t_4$ の各時刻を求めることができる。これより、追従避航に要する時間 t_F は

$$t_F = t_4 - t_1 \quad (12)$$

として算定される。

(4) 交通量と船型別平均速度の関係

先に示したように、追従避航に要する時間は先行船や第三船の速度に依存しているため、(12) 式を用いて t_F を算定するに際し、検討の対象としている混雑流中におけるこれら船舶の速度の期待値を求めておく必要がある。

自由航行している船舶の速度とその船型との間に

は一定の関係式が成立することが知られている⁵⁾。航行水域が幅狭するにつれて平均速度は徐々に低下し、この傾向は船型が大きくなるほど顕著であるものと予想されるが、その関係は未だ明らかにされていない。そこで、筆者の1人が先に構築したシミュレーション・モデル⁶⁾を用いて、交通量と船型別平均速度との関係を調べた。このシミュレーション・モデルは、航路通過に要する航行時間に関して、良好な現象再現性を有することが検証されている⁶⁾。

図-6に得られた結果の1例を示す。交通量が増加すれば平均航行速度が低下すること、さらにその変化の程度は船型が大きくなるにつれて大きいという予想に沿った結果を読み取ることができる。両者の関係は、船型構成や航路幅によって異なるが、本シミュレーション・モデルを用いることにより、対象とする交通流や航路の特性に応じた関係式を求めることが可能となる。

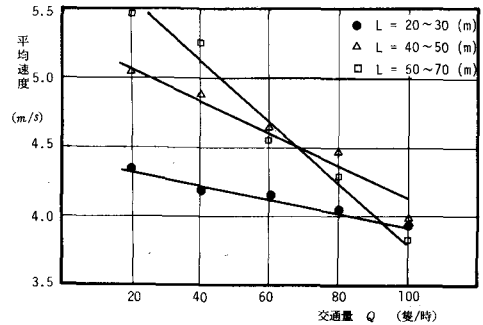


図-6 交通量と平均速度の関係

4. 避航コースの選択

(1) 避航開始地点の選択と修正避航開始距離分布

前章で説明したプロセスにしたがって側方避航目標点が選択されると、操船者はこの目標点を通り先行船の進路と平行なコースに船を載せるべく操船を行う。このとき、先行船の後方にどの程度近づいてから避航を開始するかは大きくばらつくことが報告されている。このばらつきは避航開始距離分布として知られており、同航船に対する分布、 $f(l)$ は次式のように整理されている⁷⁾。

$$f(l) = 87.1 + 6.40L_1 + 1.60L_2 + 2.45(L_1 + L_2) \quad (13)$$

ここに、 l は避航開始距離を、 L_1 と L_2 は追い越し船と先行船の船舶長、 ε は標準正規確率変数で

ある。2.でも述べたように、本研究では簡単のために変針避航の際の舵角と回頭角を一定値と考えているため、船舶は(13)式で示される先行船との相対位置を起点とする同一形状のS字形コースに沿って航行し、先行船との衝突を避ける。

しかし、当初予定していたこの避航コースの上を常に支障なく進めるわけではない。なぜならば、予定避航コース上で、先行船以外の他の船舶と衝突する危険性が存在するからである。側方避航目標点の選択に関与した船舶（先行船および場合によっては3.で述べた第三船）以外で追い越し船の避航操船を妨げる船を第四船と呼ぶこととすると、追い越し船は第四船に対する安全をも十分に考慮して操船を行わなければならないため、当初予定していた避航コースとは異なる避航コース—安全に避航できるまで避航開始を遅らせることにより、より先行船に近づいたコースとなる—を選択せざるを得なくなる。すなわち、先行船に対する相対位置 (x_d, y_d) に第四船が存在することにより $l^*(x_d, y_d)$ 以遠では第四船に対して安全な避航ができない場合、(13)式は次式で表される分布 $f'(l)$ に修正される。

$$\begin{cases} f'(l) = f(l) & \text{for } l < l^*(x_d, y_d) \\ f'(l) = \int_{l^*}^{\infty} f(l) dl & \text{for } l = l^*(x_d, y_d) \\ f'(l) = 0 & \text{for } l > l^*(x_d, y_d) \end{cases} \quad (14)$$

この修正避航開始距離分布によって生成される一連の避航コースの分布が、とりもなおさず本来の2次元的な避航領域である。

(2) 第四船の位置と避航開始地点の変更

ここでは、どの位置を航行する船舶が第四船となり、当初の避航開始地点をどの程度変移させるかについて検討する。いま、追い越し船Cの予定避航コース上の任意の地点に着目し、これを可能衝突点と呼ぶ。そして、船Cと第四船Dとの衝突は、側方避航目標点の選択モデルと同様、船Dが回頭して船Cのコース上の回避しきれない位置に進出してくることによって起こると考える。それでは、着目している可能衝突点で船Cと衝突する可能性のある船Dは、船Cが避航開始地点にさしかかった時点でどのあたりを航行している船舶になるのだろうか。この検討を行うためには、船Dが回頭後どのような進路をとって可能衝突点にまで進出してく

るか、そして、船Dがどこでどのように回頭した場合に衝突する可能性があるかを明らかにしておく必要がある。

船Dの回頭後の進路は、先行船や第三船と同じく、回頭角が $\pi/2$ に達するまでは回転半径 r ($< r^*$: 船Dの最小回転半径) の円運動をし、回頭角が $\pi/2$ に達した後は直進するものと仮定する。したがって、回頭後船Dが可能衝突点へ至るまでの時間を t ($< T$: 実効時間遅れ) とすると、回頭開始点の位置は、可能衝突点を原点とする $\bar{X}-\bar{Y}$ 座標系(図-7参照)上で、

$$\begin{cases} \bar{x} = r \{1 - \cos(V_D t / r)\} \\ \bar{y} = r \sin(V_D t / r) \end{cases} \quad \text{for } V_D t / r \leq \pi/2 \quad (15)$$

$$\begin{cases} \bar{x} = V_D(t - \pi r / 2 V_D) \\ \bar{y} = r \end{cases} \quad \text{for } V_D t / r > \pi/2 \quad (16)$$

$$r^* \leq r, \quad 0 < t \leq T$$

と表されることになる。

一方、避航開始地点上に固定した X_P-Y_P 座標系を考えると、着目している可能衝突点の座標は、船Cが避航を開始した後この地点に至るまでに要する時間 T_A を媒介変数として $(X_P(T_A), Y_P(T_A))$ と書くことができる。船Cが避航を開始してから船Dが回頭を始める時刻、 $T_A - t$ まで船Dは速度 V_D で直進しているのであるから、船Cが避航開始地点で第四船と認知すべき船舶の位置は、

$$(X_P(T_A) + x, Y_P(T_A) + y + V_D(T_A - t)) \quad (17)$$

$$0 < t \leq T$$

となる。このようにして船Cの避航コース上のすべての可能衝突点について同様の考察を行えば、船Cが当該コースを選択する場合にそこに存在する船舶が第四船となる領域が求められる。

さて、この領域の Y_P 軸正方向側の境界線（外側境界線と呼ぶ）より少しでも Y_P 軸正方向側に存在する船舶は船Cと衝突することがまったくないため、ある位置に船舶が存在する場合に、避航開始地

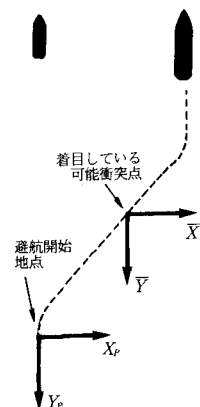


図-7 第三船の存在領域検討のための座標系

点をどこまで変移させればよいかを知るための基準としてこれを用いることができる。すなわち、外側境界線は避航開始地点に関して相対的に常に同じ位置関係にあるため、 $X_F - Y_F$ 座標系上でこの境界を $Y_0 = Y_0(x)$ と表すとすると、位置 (X_D, Y_D) を船舶が航行している場合、避航開始地点の変移量 Δl は、

$$\begin{cases} \Delta l = 0 & \text{for } Y_D > Y_0(X_D) \\ \Delta l = Y_0 - Y_0(X_D) & \text{for } Y_D < Y_0(X_D) \end{cases} \quad (18)$$

で与えられる。

5. 数値計算例による検討例

(1) 側方避航目標点選択モデルに関する検討

3. で提案したモデルを用いて、追い越し船 C、先行船 A、第三船 B それぞれの船型と速度および 3 船の相対的位置関係を与えた場合に選択される側方避航目標点を計算することができる。そこで、筆者の 1 人が先に開発した検証方法³⁾を用いて、提案したモデルの現象説明力を検討する。ここでは、備讃瀬戸東航路で実施された航行実態観測調査データを用いて計算値と観測値とを対比した。紙幅の関係で設定した船舶・航路・交通諸特性の詳細は文献 2) を参照されたいが、これ以外に、船型別衝突事故損失 L_c として表-1 に示す値を、航行時の単位時間当たり遅延損失 t_f として表-2 に示す値を用いた。

得られた結果を、図-8 に示す。図中の実線が計算値、黒丸が観測値を示している。(a) は 100~500 GT の船舶が 20~100 GT の船舶を追い越すケース、

表-1 衝突による船型別直接損害額⁷⁾

船型ランク	5~20	20~100	100~500	500~3000	3000~
5~20	435.4	285.3	655.6	645.4	709.8
20~100		1155.1	954.3	2335.4	1150.6
100~500			3879.6	7723.9	3730.2
500~3000				5994.9	11964.4
3000~					8072.0

(GT)

(単位は事故1件当たり 万円)

表-2 船型別にみた単位当たり遅延損失⁷⁾

船型 ランク	費目	(1)	(2)	(3)	(1)~(3) の合計
~20	燃料費	367.5	0.7	0.4	368.5
20~100	燃料費	378.3	3.1	1.7	383.2
100~500	燃料費	436.0	16.5	9.1	461.6
500~3000	燃料費	701.8	84.9	47.2	833.8
3000~	燃料費	1579.7	516.2	286.6	2382.5

(GT)

(単位は1隻1分当たり 円)

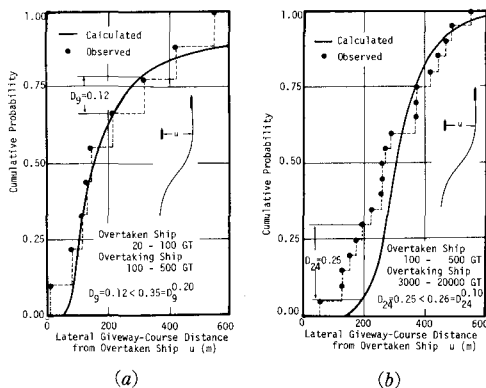


図-8 側方航過距離による計算値と実績値の比較

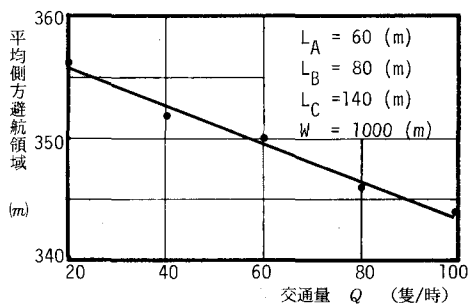


図-9 交通量と平均側方避航領域との関係

(b) は 3000~20000 GT の船舶が 100~500 GT の船舶を追い越すケースである。Kolmogorov-Smirnov 検定により適合度を検定した結果、いずれも有意水準 10 % 以上でその妥当性が確認された。また、図-9 は交通量に関する感度分析の結果の 1 例であるが、交通量が増大するにつれて側方避航間隔の平均値が小さくなるという傾向を読み取ることができる。

(2) 避航開始地点選択モデルに関する検討

2 次元的な避航コースの分布や避航開始地点の分布を観測データと対応づけて検証する方法は、未だ開発されていない。したがって、現段階では、従来提唱されているいわゆる“観測結果の整理による後方避航領域”との比較検討に留まらざるを得ない。

図-10 は航路幅 1000 m、交通量 20 隻/時の 1 方向航路上で、船舶長 80、100、140 m の追い越し船が船舶長 40 m の先行船を追い越す状況を設定して計算した避航開始地点の分布であり、第三船の船舶長は 60 m としている。計算に際しては、航路幅方向の航跡分布⁸⁾と船舶到着時間間隔分布⁹⁾から先行

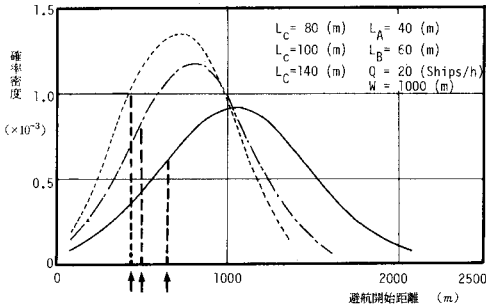


図-10 修正された避航開始距離分布（後方避航領域）

船周辺を航行する第三船ならびに第四船の存在確率を求め、これと4.で導いた修正避航開始距離分布とをたたみ込んで算出したものである。

矢印で示した従来の提唱値、 $3.5(L_A + L_B)$ (L は船舶長)よりは全体的に大きな値となっているが、この理由は従来の提唱値が最接近距離に近い意味合いを持っていると考えられること、および、混雑している水域ではどの船舶に対して避航したかが明確に識別できず、2船間の距離が長いほど一層困難であるため、必然的にその基礎となったデータにゆがみが生じる可能性があること、などが考えられる。

6. おわりに

本研究は、混雑流の性質を規定する主たる要素である船舶の避航挙動を、操船者による避航コースの選択という観点から記述して先に提案したモデルの改良を試みたものである。

改良点は大別して2つあり、1つは追越し避航と追従避航の選択モデルに、追従することによりもたらされる遅延損失を含む一般化費用を導入し、混雑が避航行動の選択に及ぼす影響をより明示的に記述しようとしたことである。改良されたモデルを用いて数値的な検討を加えた結果、わずかではあるが、交通量が増加すると側方避航間隔が短くなるという傾向を見出すことができた。これにより、混雑の影響を十分に反映し得なかったという以前のモデルの欠点を解消するという当初の目的は一応達成し得たものと考えている。

他の1つは、避航挙動を側方避航目標点のみではなく、避航コースそのもので記述するという点である。これについては、「周辺航行船舶の存在により避航開始地点の分布が修正される」という考え方を

軸に、“側方避航目標点と避航開始地点によって規定される同一形状の避航コースの集合”として算定することが可能となり、これまでの1次元避航領域モデルを本来の2次元モデルへと拡張し得た。

しかし、観測データを用いた2次元的な避航領域モデルの検証方法が未だ確立されていないため、その妥当性についての検討が十分でないなど、いくつかの問題点も残されている。これについては今後の課題としたい。

なお、研究を進めるに際して、京都大学工学部黒田勝彦助教授から有益なご助言をいただいた。本研究の一部は、昭和60年度文部省科学研究費補助金（奨励(A)）を受けて行われた。記して感謝の意を表する次第である。

【参考文献】

- (1) 今津隼馬：避航と衝突予防装置，pp.77～105，成山堂，1984
- (2) 黒田勝彦・喜多秀行：避航領域の確率論的取り扱いについて，土木計画学研究・講演集，No.7，pp.331～338，1985
- (3) 黒田勝彦・喜多秀行：分布としての避航領域と航過距離分布の解析，日本航海学会論文集，No.72，pp.1～11，1985
- (4) 貴島勝郎：操縦性性能と Manoeuvring Bookletに関する国際動向，運動性能研究委員会第2回シンポジウム“船舶の航行安全性と操縦性性能”，pp. 1～40，日本造船学会，1985
- (5) 藤井弥平：序説海上交通工学，海文堂出版，pp.32，1971
- (6) 長尾・黒田・喜多：リスク・便益分析に基づく水路改良計画に関する方法論的研究，土木学会論文集，No.365/Ⅳ-4，pp.89～98，1986
- (7) 黒田・喜多：船舶衝突確率の推定モデル，土木学会論文報告集，No. 339，pp.187～194，1983
- (8) 井上欣三：直線航路における航跡分布のモデル化と航路分離に関する一考察，日本航海学会論文集，No.58，pp.103～115，1977
- (9) 原 潔：船舶交通の統計的特性—I，日本航海学会誌，No.36，pp.77～83，1966