

船舶衝突確率の推定モデル

PROBABILISTIC MODELLING OF SHIP COLLISION

黒田勝彦*・喜多秀行**

By Katsuhiko KURODA and Hideyuki KITA

1. 結 言

水路の計画や設計を行う際、安全性に対する考慮は経済性に対するものと同様に不可欠なものである。昭和40年代以後、船舶が大型化・高速化するとともに船舶交通量が増加し、航路における輻輳が顕著となってきている。また、タンカーやLNG船といった危険物輸送船が増加し、一たび事故が発生すると経済的損失はもとより環境面においても甚大な被害をこうむることが予想される。このような背景から、海難事故の分析と事故防止のための研究が要請されてきている。

海難事故のうち船体に損傷を受けるものは、衝突、乗り揚げ、転覆、火災、機関故障、浸水に大別される。これらのうち、水路計画に資することを目的とする立場から交通事故的海難（衝突、乗り揚げ）に着目し、また、福島¹⁾によると全海難に占める衝突の割合は約60%とわけて多いため、著者らはまず衝突確率と水路・交通特性との関係を明らかにしようとした。

一般に、海難は自然条件、交通条件、航路条件、船舶

条件と運航者条件が相互に関連して生ずると考えられる²⁾。これらを著者らはそれぞれ、自然条件、交通、水路、船舶、および操船者特性とよび、そこに含まれる諸要因を表-1のように分類した。航路によっては、防波堤の設置などにより波浪や潮流といった一部の自然条件も操作可能となる場合があるが、一般には、水路特性と交通特性の一部が航路計画上の操作変数となり得る。すなわち、交通特性の一部は航行規制の形で変更が可能であり、水路特性は障害物の除去、航路の浚渫・拡幅、航路標識の整備等の事故率減少策が、限度はあるにせよ人為的に行い得る。このために、航路計画上の操作変数と衝突確率との関係が、定量的にかつ相互作用を考慮し得る形で明らかにされる必要がある。

船舶衝突確率の推定に関する従来の研究は、ある要因と事故率との単相関を統計的に整理したものがほとんどであり、航路の計画、設計に直接適用し得る形でシステマティックな分析を行った研究は、シミュレーションによる杉崎ほか³⁾、木俣・石崎⁴⁾、待ち行列理論の適用をはかった原⁵⁾、⁶⁾、航路外へ出る際の衝突確率を扱ったCurtis⁷⁾、出会い確率までを求めた藤井⁸⁾、Lewiss⁹⁾、

表-1 衝突確率に影響を及ぼす要因

Operational		Non-Operational		
Channel Characteristics	Traffic characteristics	Navigators Characteristics	Ship Characteristics	Natural Conditions
1. Fairway Width 2. Fairway Length 3. Depth 4. Curvature 5. Fairway Crossing 6. Navigation Mark 7. Obstacles 8. Channel Side Shape etc.	1. Ship Size Distribution 2. Sailing Velocity Distribution 3. Total Traffic Volume 4. Traffic Volume Ratio in Different Directions 5. Crossing Traffic Volume 6. Wake Position Distribution 7. Headway Distribution etc.	1. Quality 2. Illegal Sailing 3. Bad Watching 4. With or Without Pilot etc.	1. Ship Size 2. Speed Performance 3. Steering Performance 4. Stopping Performance 5. Radar Equipment etc.	1. Tidal Stream 2. Wave 3. Sight Distance 4. Wind Direction 5. Wind Force 6. Weather 7. Time etc.

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

以外には見当たらない。シミュレーションによる分析は演算時間と演算費用の制約を受け、原のモデルは交通諸特性が有するばらつきが到着時間間隔を除いて明示的に考慮されていない。一方、Curtis は同航船の前方を回り込んで航路を横切るという特殊な状態のみを扱うものであり、一般的な交通条件に対しては適用できない。また Lewisson, 藤井については 避航動態が考慮されておらず、出会い確率と衝突確率の間の理論的な関連づけにも欠ける。

前報¹⁰⁾で、著者らは表-1 に示した 航路計画操作上可能な諸要因を組み込むとともに、船舶の避航動態を考慮した船舶衝突確率推定モデルの基本プロセスを構築した。本報告は、これをもとに種々の改良を加え、航路設計代替案の探索・評価の道具とし得る船舶衝突確率推定モデルを提案するものである。そして、実績値と計算値を比較してモデルの妥当性に検討を加え、モデルが有する若干の問題点に対する議論を行う。

2. 本モデルの概要

(1) モデルにおける推定プロセス

図-1 は本モデルによる1隻1トリップ当たり衝突確率および水路全体がもつ平均的衝突危険度を推定するプロセスを示したものである。表-1 に示した船舶衝突に関連する諸特性のうち、モデルに入力されるものは水路

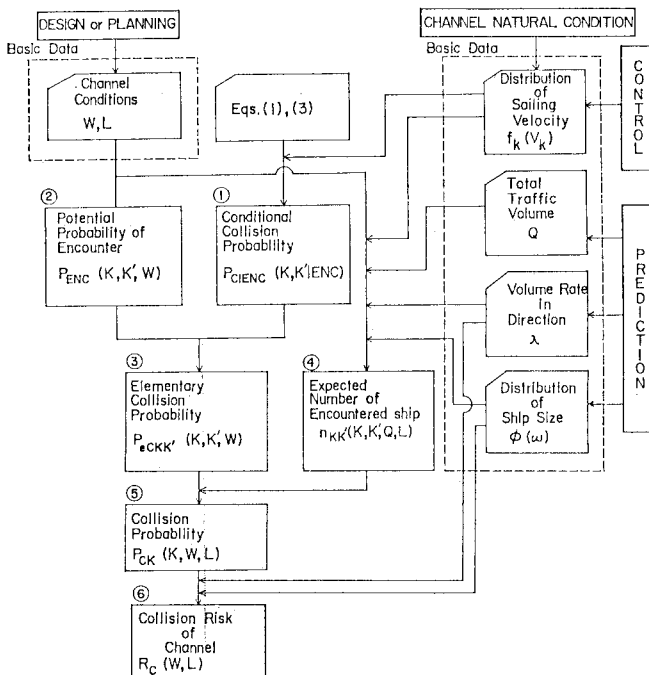


図-1 本モデルにおける推定プロセス

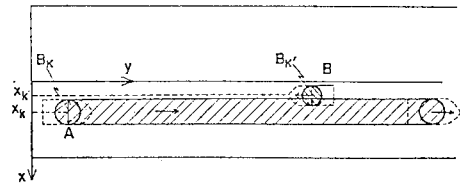


図-2 水路内での2船の出会い

特性と交通特性ならびに船舶特性であり、自然条件および操船者特性は、平均的な状態あるいはばらつきの程度が、観測値として取り込まれている交通特性に反映されているものと考えている。

まず、交通特性、水路特性と船舶特性から2船間の避航失敗確率(①)および水路内での出会い確率(②)を算出し、両者から2船間の船型別基本衝突確率(③)を求め、一方、交通特性から着目船が水路を通過する際に出会う可能性のある船舶の隻数(④)を求めておく。ここまではすべて出会いの形態別(行き合い, 追い越し, 被追い越し)および両船の船型別に計算される。そして、③と④からある船型の船舶1隻が水路内で衝突する確率(⑤)を求め、これを船型に関する期待値演算を行うことにより、水路における船舶衝突危険度(⑥)を得る。

(2) モデルの前提と避航動態のモデル化

解析対象とする水路は延長 L_c , 幅 W の一様な両側通航水路である。この水路上を、避航時を除いて船舶は水路と平行に独立して直進し、横切り船舶の存在はないものとする。図-2 に示すように、船舶は船幅 B を直径とする円で表現され、この円が一部でも重なった場合を「衝突」、避航動作をとることなくそのまま進めば衝突に至る位置関係にある場合を「出会い」と定義する。なお、避航の対象となる相手船は着目船の進路の延長線上を航行し、この線上で出会うとの仮定を設けている。

避航の形態は行き合い, 追い越し, 被追い越しの3種を考え、それぞれ反航船, 着目船より速度の遅い同航船, 着目船より速度の速い同航船との避航に対応する。行き合いの場合(図-3 (a))は両船同時に避航を開始し、追い越しの場合(図-4 (a))は追い越しをかける船のみが避航動作をとる。避航に伴う航跡は折線で表現し、そのときの変針角を θ とする。避航中に両船が接するような位置関係は、これ以上避航開始が遅れば避航動作をとったとしても衝突に至るため、このような状態における避航開始時点の両船の距離を限界避航開始距離 (Critical Give-Way Starting Distance : C.G.W.S.-距

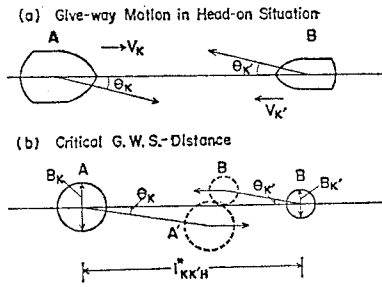


図-3 行き合い時の避航動態

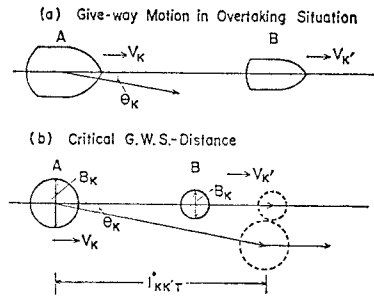


図-4 追い越し時の避航動態

離) l^* とよぶ (図-3 (b), 4 (b)).

(3) 基本衝突確率

船舶の避航開始距離 (Give-Way Starting Distance : G.W.S.-距離) l は個々の避航によって大きく異なる。著者らは、ばらつきを有する避航開始距離が、本研究で明示的に取り扱われる船舶特性や交通特性に依存する確定値項と、操船者の経験や天候などの本モデルで明示的に取り扱っていないランダム項からなっているものと仮定する。観測結果¹¹⁾より、避航開始距離は、行き合い (Head-on)、追い越し (Overtaking)、被追い越し (Overtaken) (以後、それぞれ添字 H, T, O で表わす) に対して以下の形で表わされる。ここで、確定値項は文献 11) で解析された結果を用い、ランダム項はこの確定値項による推計値と実現値との残差を種々の説明変数に対して解析した結果を用いている。

$$\left. \begin{aligned} l_{kk'H} &= \alpha_H + \beta_H V_k + \gamma_H V_{k'} + \delta_H \varepsilon_H \\ l_{kk'T} &= \alpha_T + \beta_T L_k + \gamma_T L_{k'} + \delta_T (L_k + L_{k'}) \varepsilon_T \\ l_{kk'O} &= \alpha_O + \beta_O L_{k'} + \gamma_O L_k + \delta_O (L_k + L_{k'}) \varepsilon_T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 V は速度、 L は船舶の長さ (垂線間長) であり、以下添字 k, k' は着目船と相手船を意味するものとする。 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は偏回帰係数であり、 ε は平均値 0、分散 1 の標準正規確率変数である。式 (1) のランダム項は、操船者の経験、天候等の本モデルで明示的に扱っていないランダム要素の影響を表わしている。

一方、前節で述べた C.G.W.S.-距離 l^* は、変針角 θ

が一定であるとし、衝突直径 (船舶 k, k' の中心間距離がこの円直径より小さい場合は衝突を意味する) $D_{kk'}$ を

$$D_{kk'} = (B_k + B_{k'}) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

と定義すれば、幾何学的関係から

$$\left. \begin{aligned} l_{kk'H}^* &= \frac{D_{kk'}}{\sin \theta} \\ l_{kk'T}^* &= D_{kk'} \cdot \frac{(V_k^2 + V_{k'}^2 - 2 V_k V_{k'} \cos \theta)^{1/2}}{V_k \sin \theta} \\ &\quad \text{ただし } V_k \cos \theta_k > V_{k'} \\ l_{kk'O}^* &= D_{kk'} \cdot \frac{(V_k^2 + V_{k'}^2 - 2 V_k V_{k'} \cos \theta)^{1/2}}{V_{k'} \sin \theta} \\ &\quad \text{ただし } V_k < V_{k'} \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

と表わされる。避航失敗確率は G.W.S.-距離 l が C. G.W.S.-距離 l^* より短い事象の確率であるので、出会いの条件下での 2 船の衝突確率は

$$\left. \begin{aligned} P_{CH|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.}[l_{kk'H} \leq l_{kk'H}^* | \text{Encounter}] \\ P_{CT|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.}[l_{kk'T} \leq l_{kk'T}^*, V_k \cos \theta > V_{k'} | \text{Encounter}] \\ P_{CO|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) &= \text{Prob.}[l_{kk'O} \leq l_{kk'O}^*, V_k < V_{k'} \cos \theta | \text{Encounter}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。本来、避航失敗確率は出会い時の 2 船間の中心間隔により異なるはずのものであるが、先に示したように、本モデルでは出会いが着目船の進路の延長線上で生ずるとの仮定を設けているため、2 船の相対位置には依存せず、船型と速度のみから規定される。

次に、水路内での出会い確率を求める。図-2 に示したように、水路に直角な方向に x 軸をとり、着目船と相手船の x 軸方向の位置を $x_k, x_{k'}$ とし、相対距離 $L_{kk'}$ を

$$L_{kk'} = x_k - x_{k'} \dots\dots\dots (5)$$

と置くと、出会いの条件は次式で与えられる。

$$-D_{kk'} \leq L_{kk'} \leq D_{kk'} \dots\dots\dots (6)$$

水路を航行する船舶の航跡分布が正規分布とよい一致をみせ、その平均値と水路中央との距離 \bar{x} 、分散 σ_x^2 が、

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= aW \\ \sigma_x^2 &= -7.170 + 0.105 W + 2.168 Q_L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

で表わされることは井上¹²⁾によって報告されている。ここに W は水路幅、 Q_L は L 換算交通量であり、パラメーター a は中央線表示がある両側通航水路で 0.2、中央線表示がない場合 0.1 の値をとる。この結果から、対向 2 船および同航 2 船の相対距離 $L_{kk'}$ の分布 $f_H(L_{kk'})$ 、 $f_T(L_{kk'})$ は次式の正規分布で近似できることが導かれ

る。

$$\left. \begin{aligned} f_H(L_{kk'}) &= N(2aW, \sigma_{x_k}^2 + \sigma_{x_{k'}}^2) \\ f_T(L_{kk'}) &= N(0, \sigma_{x_k}^2 + \sigma_{x_{k'}}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

ここに、 $\sigma_{x_k}^2, \sigma_{x_{k'}}^2$ は着目船, 相手船の進行方向の航跡分布の分散である。式 (6) と式 (8) より, 船型 k, k' の 2 船に対する出会い確率は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} P_{ENC}^H(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_H(L_{kk'}) dL_{kk'} \\ P_{ENC}^T(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_T(L_{kk'}) dL_{kk'} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

式 (4) および式 (9) で与えられる避航失敗確率と出会い確率の積として, 3 種の避航形態についての船型別基本衝突確率は次式で表わされることになる。

$$\left. \begin{aligned} P_{eCH}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CH|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \\ &\quad \cdot P_{ENC}^H(k, k') \\ P_{eCT}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CT|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \\ &\quad \cdot P_{ENC}^T(k, k') \\ P_{eCO}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CO|ENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{Encounter}) \\ &\quad \cdot P_{ENC}^T(k, k') \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

(4) 出会い状態の隻数分布

前に、「出会い」は 2 船が衝突直径内で遭遇する状態を定義したのに対し、「出会い状態」とは以下の状態をいう。すなわち, 着目船が水路内で行き合い, 追い越し, および被追い越しの状態になることをいい, 「出会い状態の隻数」とは, 着目船がこれらの状態で遭遇する相手船舶の総隻数をいう (図-5 の船舶 A と B の間にある総隻数)。ここでは, これら 3 つの状態での隻数分布の求め方について述べる。

方向別交通量比を λ とすると, 方向別の交通量は $Q_1 = \lambda Q, Q_2 = (1-\lambda)Q$ で与えられる。ところで, 藤井¹³⁾ によれば, 通常の交通量における船型構成分布は, 垂線間長の常用対数 ω を用いて, $\phi(\omega) = N[\mu_\omega, \sigma_\omega^2]$ なる正規分布で近似できる。したがって, 船型 k の方向別期待交通量 Q_{1k}, Q_{2k} は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{1k} &= \lambda Q \phi(\omega_k) \\ Q_{2k} &= (1-\lambda) Q \phi(\omega_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

いま, 図-5 (a) に示すように, 水路端 $o_1 o_1'$ に到着した速度 V_k の船 A が, $L_C + \Delta L_H$ 離れた位置を航行する速度 $V_{k'}$ の反航船と水路内で行き合う条件は,

$$\Delta L_H \leq L_C \frac{V_{k'}}{V_k} \dots\dots (12)$$

である。したがって, 船 A が水路を通過する間に行き

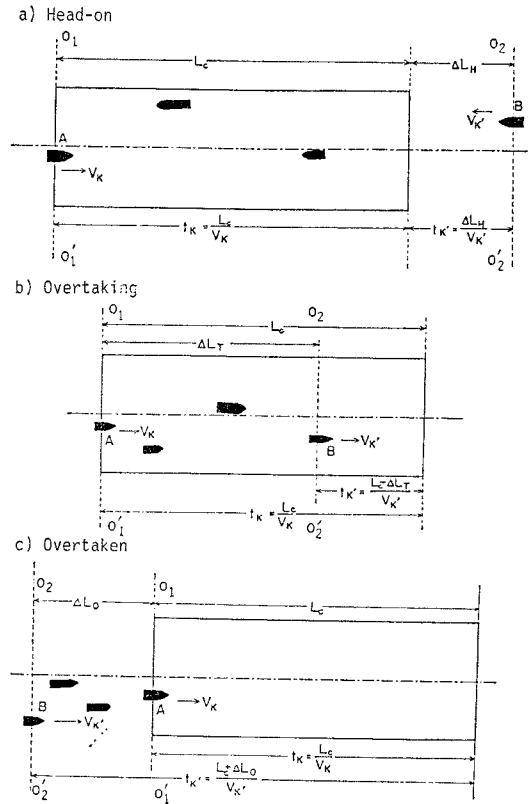


図-5 船舶 A, B が出会うための最長距離

合う可能性のある船舶数は, 船 A が水路端に到着した瞬間に水路端から $L_C + \Delta L_H$ の間に存在する船舶数である。船 B が $L_C + \Delta L_H$ を進むに要する時間 δt_H は,

$$\delta t_H = \frac{L_C + \Delta L_H}{V_{k'}} = L_C \left(\frac{1}{V_{k'}} + \frac{1}{V_k} \right) \dots\dots (13)$$

で与えられる。原¹⁴⁾によると, 定常交通流において任意の時間内に見通し線 $o_2 o_2'$ に到着する隻数はポアソン分布とみなせるので, ある時間間隔 δt_H に $o_2 o_2'$ を通過する船型 k' の船の隻数を $n_{Hkk'}$ とすると, その確率は次式で与えられる。

$$P(n_{Hkk'}) = \frac{(Q_{2k'} \cdot \delta t_H)^{n_{Hkk'}}}{n_{Hkk'}!} \cdot e^{-Q_{2k'} \cdot \delta t_H} \dots\dots (14)$$

同様に, 追い越し, 被追い越しの場合についても 図-5 (b), (c) を参照して, 着目船が出会い状態となる船舶数が $n_{Tkk'}, n_{Okk'}$ である確率 $P(n_{Tkk'}), P(n_{Okk'})$ は, 次式で与えられる。

$$P(n_{Tkk'}) = \frac{(Q_{1k'} \cdot \delta t_T)^{n_{Tkk'}}}{n_{Tkk'}!} \cdot e^{-Q_{1k'} \cdot \delta t_T} \dots (15)$$

$$\delta t_T = L_C \cdot \left(\frac{1}{V_{k'}} - \frac{1}{V_k} \right) \dots\dots (16)$$

$$P(n_{Okk'}) = \frac{(Q_{1k'} \cdot \delta t_O)^{n_{Okk'}}}{n_{Okk'}!} \cdot e^{-Q_{1k'} \cdot \delta t_O} \dots\dots (17)$$

$$\delta t_o = L_C \cdot \left(\frac{1}{V_k} - \frac{1}{V_{k'}} \right) \dots\dots\dots(18)$$

(5) 水路における衝突危険度

船舶が水路内で衝突する確率は、衝突することなく水路を通過する事象の余事象の確率として計算される。行き合い状態のすべての船舶に対し衝突しない確率 $P_{SHkk'}$ は、

$$P_{SHkk'} = \sum_{n_{Hkk'}=0}^{\infty} [1 - P_{eCH}(k, k')]^{n_{Hkk'}} \cdot P(n_{Hkk'}) \dots\dots\dots(19)$$

であるが、 $P_{eCH}(k, k') \ll 1$ (後に示す試算では 10^{-3} のオーダー) であるので、上式は次式のように簡単にすることができる。

$$P_{SHkk'} = \sum_{n_{Hkk'}=0}^{\infty} [1 - n_{Hkk'} \cdot P_{eCH}(k, k')] \cdot P(n_{Hkk'}) = 1 - \overline{n_{Hkk'}} \cdot P_{eCH}(k, k') \dots\dots\dots(20)$$

上式において、 $\overline{n_{Hkk'}}$ は船型 k の船が出会い状態になる船型 k' の反航船の平均隻数である。同様に、追い越し状態および被追い越し状態での非衝突確率 $P_{STkk'}$ 、 $P_{SOkk'}$ もそれぞれ次式のごとくなる。

$$P_{STkk'} = 1 - \overline{n_{TKk'}} \cdot P_{eCT}(k, k') \dots\dots\dots(21)$$

$$P_{SOkk'} = 1 - \overline{n_{OKk'}} \cdot P_{eCO}(k, k') \dots\dots\dots(22)$$

ここで、前に報告¹⁰⁾したように、同一船型であってもその航行速度は正規確率変数として考えられるので、その確率密度関数を $f \cdot (V)$ とすると、期待される非衝突確率はそれぞれ式 (23)~(25) で与えられる。

$$\overline{P_{SHkk'}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P_{SHkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \dots\dots\dots(23)$$

$$\overline{P_{STkk'}} = \int_0^{\infty} \int_0^{V_k \cos \theta} P_{STkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \dots\dots\dots(24)$$

$$\overline{P_{SOkk'}} = \int_0^{\infty} \int_{V_k / \cos \theta}^{\infty} P_{SOkk'} f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \dots\dots\dots(25)$$

ある船型 k の船舶が衝突することなく水路を通過する確率は、すべての避航形態、すべての船型に対して衝突しない確率であるから、船型 k の船舶の期待衝突確率 P_{Ck} は、

$$P_{Ck} = 1 - \int_{k'} [\overline{P_{SHkk'}} \cdot \overline{P_{STkk'}} \cdot \overline{P_{SOkk'}}] \cdot \phi(\omega_{k'}) d\omega_{k'} \dots\dots\dots(26)$$

で与えられる。上式は、船型 k なる着目船が水路 L_C をある方向 (交通量 λQ の方向) に通過する間に期待される平均的衝突確率である。

以上より、ある交通特性を考えたとき、所与の水路でのある方向の1トリップ当たりの平均的な衝突確率 P_C は、次式で与えられる。

$$P_C = \int_k P_{Ck} \phi(\omega_k) d\omega_k \dots\dots\dots(27)$$

上式は、一定の交通特性のもとで、ある水路で期待される衝突危険度を示すもので、その水路の航行安全性を示す一つの指標と考えられる。

3. モデルの妥当性の検討

前章で導いた水路における船舶衝突確率推定モデルの妥当性を検討するため、わが国のいくつかの主要狭水道に対して試算を行い、実績値と比較する。

(1) 入力データ

試算例とした狭水道は交通量・事故件数が大であり、船型構成に占める大型船の比率が小さくない浦賀水道、明石海峡、備讃瀬戸東部、来島海峡の4か所である。

モデルへの入力となる水路特性、交通特性⁹⁾を表-2に示す。

表-2 モデル比較のための入力データ (水路・交通特性)

Channel	L_C	W	Q	$\mu_{\log L}$	$\sigma_{\log L}$	λ	a
AKASHI	18.5	4.0	68.8	1.36	0.26	0.50	0.20
URAGA	28.0	2.0	33.5	1.53	0.26	0.50	0.20
BISAN EAST	35.7	2.0	44.5	1.43	0.20	0.50	0.20
KURUSHIMA	27.8	2.0	35.9	1.30	0.30	0.50	0.20

(km) (km) (Ships/h)

表に示した交通特性のうち、船型構成分布を規定するパラメーター $\mu_{\log L}$ と $\sigma_{\log L}$ は、日本海難防止協会¹⁵⁾による各狭水道における船型別交通量の観測結果より求めた。方向別交通量比 λ は時刻により変化するものであるが、1日単位でみた場合両方向ともほぼ交通量は等しく、ここでは一律に 0.5 とした。

船舶特性については、船型別平均航行速度 μ_{V_k} 、船幅 B_k を垂線間長 L と関連づけて取り扱い、藤井¹⁶⁾による次式を用いた。

$$\log \mu_{V_k} = 0.29 \log L_k + 0.79 \dots\dots\dots(28)$$

$$\log B_k = 0.88 \log L_k - 0.47 \dots\dots\dots(29)$$

また、航行速度分布の標準偏差 σ_{V_k} は藤井¹⁷⁾によりすべての船型に対して 2.78 km/h (1.5 knot) とし、避航の際の変針角 θ は通常の避航動態を考慮して 30° とした。式 (1) で示した避航開始距離分布のパラメーター α_H 、 β_H 、 r_H 、 δ_H 、および α_T 、 β_T 、 r_T 、 δ_T

表-3 避航開始距離分布の偏回帰係数

	α	β	r	δ
H	-931.4	4.59	4.59	220.0
T, O	87.1	6.40	1.60	2.45

H : Head-on, T : Overtaking, O : Overtaken
の値を得た。図一

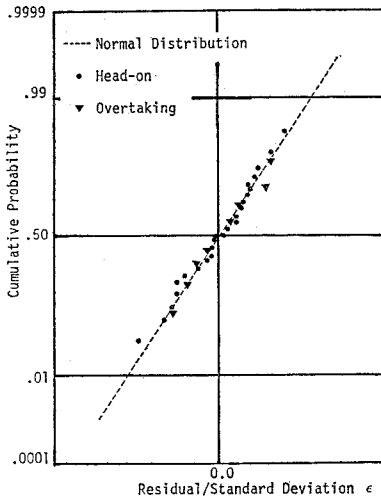


図-6 避航開始距離のランダム変数の分布

6 は実績値 $\bar{l}_{kk'H}$, $\bar{l}_{kk'T}$ と推定値 $l_{kk'H}$, $l_{kk'T}$ の残差をそれぞれ δ_H , $\delta_T(L_k+L_k')$ で基準化して正規確率紙上にプロットしたものである。データ数は少ないが、 e を標準正規分布と仮定しても大きな誤ちはないと考えられる。

(2) 計算結果と実績値との比較

以上の入力データを用いて求めた船舶衝突確率の推定値と実績値の対応を示したものが図-7である。実績値は日本海難防止協会¹⁹⁾による値を用いた。ここで、小型船、中型船、大型船がそれぞれ ~500 G.T., 500~3000 G.T., 3000 G.T.~, に対応し、計算にあたっては、各船型ランクの平均垂線間長 32.9 m, 66.5 m, 122.1 m を有する船舶を代表船型として求めた。ここで示した衝突確率 P_c は1トリップ当たりの衝突確率であり、単位は(回/トリップ)である。総体的にやや過大な推定となっているが、45° 線にほぼ沿っており、水路特性、交通特性がそれぞれ異なる各狭水道における船舶衝突確率をその特性と関連づけて説明し得たといえよう。したが

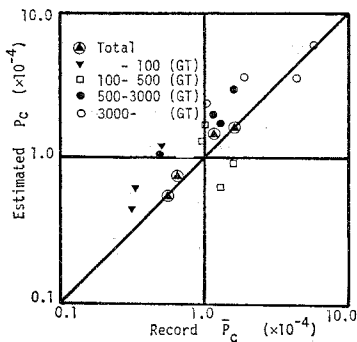


図-7 推定値と実績値の比較(本モデル)

って、本モデルを用いて水路改良効果、すなわち、水路改良による相対的な航行安全性の変化を予測することができる。

次に、本モデルの結果と、同一データで計算した従来のモデルの結果を比較する。なお、各モデルの内容については簡単な説明にとどめ、詳細は参考文献を参照されたい。

原のモデル^{9),6)}は、一連の避航を待ち行列系におけるサービスと考え、サービス時間に相当する平均避航所要時間 ($1/\mu$) と避航すべき相手船の到着時間間隔から計算される待ち時間が、避航開始時機 (τ) より長くなる確率を衝突確率とするものである。先に用いた入力データ以外に用いた数値は原が示した値—使用舵角 15°, 操舵速度 2.33(deg/s), 操縦性指数 $T'=2.5$, $K'=1.8$, 上述の $\tau=3.5$ (min), $1/\mu=0.8$ (min)—に従った。また、このモデルは水路の湾曲の影響も考慮しており、水路の平均湾曲角度 ψ_m だけ変針するために要する航走距離 e は、 ψ_m 変針する際の新針路距離の2倍で代用した。その他の水路特性値は原の示すデータを用いた。図-8が原のモデルによる推定値と実績値を対応させたものである。ただし、小型船の推定値の一部は 0.1×10^{-4} 以下ときわめて小さな値であるため図示していない。

藤井のモデル⁹⁾は、船舶の大きさと航行速度、出会い角度、船舶密度等から、船舶が避航することなく直進した場合に衝突する船舶数を幾何学的関係から求め、実績値に合うよう統計的な衝突直径なる概念を導入して補正するものである。藤井のモデルによる推定値と実績値の対応を同じく図-8に示すが、統計的な衝突直径は水路を航行する全船舶の平均船舶長に対して求められているため、ここでは全船型に対する値のみをプロットしてある。計算に用いた統計的な衝突直径の値は、反航の場合 $3.0 \times 10^{-4} L$, 同航の場合 $1.0 \times 10^{-4} L$ とした¹⁸⁾。

以上の結果を比較すると、数値的には図からも明らかのように、原のモデルは小型船について特に推定値が小

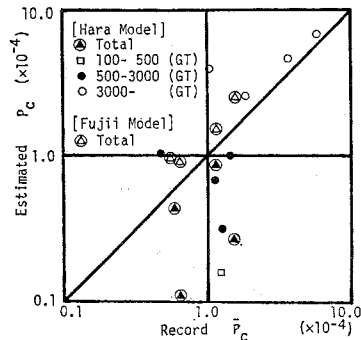


図-8 推定値と実績値の比較(原モデル, 藤井モデル)

さくなっている。藤井のモデルと本モデルは、どちらもやや過大な推定となつてはいるものの、傾向的には現象をほぼ再現しているとみることができると言える。モデルの性格の面では、原のモデルおよび本モデルは避航動態とその失敗確率を考慮したものであり、さらに、原のモデルは水路の湾曲や多重遭遇をも考慮に含めた形となっているが、藤井のモデルは避航動態を考慮に入れず、補正率的な性格をもった統計的衝突直径なる概念を対応づけるため与えているにすぎない。したがって、藤井のモデルは船舶交通特性や水路特性が変化した場合の危険度を予測するモデルとしては使用できない。

このように、水路の改良計画や航行規制、さらには衝突防止機器の改良といった多方面からの船舶衝突事故率低減施策の効果を定量的に把握するための道具として、現象説明力ならびにモデルの性格の点で、従来のモデルと比べ本研究で提案するモデルの方がより適切であると考えられる。

4. 本モデルに残る課題

本推定モデルの各プロセスに存在する問題点を列挙し、以下、これらに対する議論を行う。

その1は、本モデルが1船対1船の避航動態をもとに構築されたものであるため、避航の対象となる船舶の近傍を航行する他船の影響および避航動態に与える水路側端の影響が考慮されていないことである。実際の避航にあたっては、周辺を航行する全船舶の位置と相対運動を認識した後、たとえば船舶密度の低い側へ避航したり、場合によっては減速して追い越しを中止することもあり得る。このような挙動が衝突確率に及ぼす影響を考慮に入れ、水路内での船群の発生や多重遭遇等、混雑流内ではしばしばみられる現象を取り扱うためには、2体問題のみならず多体問題を記述し得るモデルへと拡張することが必要となる。

その2は、用いた関係式についてである。本モデルで用いた航行船舶の動態に関する諸関係式は、種々の状況のもとでの、かつ十分豊富なサンプル数を有するデータをもとにして導かれたとはいいたいものがある。船舶挙動に関しては、船舶諸特性のばらつきが大きくかつ2次元的に運動しているため、検討すべき要因の数が道路交通に比してはるかに多いこと、反射的といつていいほど迅速な運転動作が要求される自動車交通に比べ航行挙動に対する操船者の Human Factor の影響は支配的であり、それが操船環境に左右されやすいこと等を考え併せると、必要かつ十分な要因によって説明される関係式の導出は困難であるとは思われるが、さらなる観測データの蓄積と精度の向上が望まれる。

その3は、モデル化の際に混入する誤差である。本モデルでは、転舵時の航跡を直線で近似したこと、他船との接近時の吸引力の効果を無視したこと等、記述を簡略にするための船体運動の単純化に伴う誤差が混入している。しかしながら、この誤差はモデルの使用目的一たとえば水路相互の大略的な衝突確率の比較を行う場合や、個々の設計代替案の安全面の評価等一に照らして十分な精度であると考えられる。

その4は、分布形のあてはめに関する問題である。すなわち、実際の現象は有限領域でしか生起しないにもかかわらず、無限領域で定義される分布形を当てはめていることである。

以上に述べたようなモデルに含まれている諸問題は今後の検討課題として残されている。

なお、最後に、モデルを検証する際の一般的な問題として、実績値の精度の問題が議論されねばならない。衝突確率の実績値は、各水路における衝突隻数と通航総隻数の比であるが、前者の記録として「海難統計」、「海難速報」、「要救助海難統計」のどれをとるかにより衝突隻数は異なるものとなる。また、交通量調査は、主要狭水道についてはほぼ毎年定期的に行われているが、おおむね3日間調査であり、年平均交通量がどの程度正確に推定されているかも問題となる。さらに、衝突確率が年度によってばらつきがあるにもかかわらず、現在のところ長期にわたる記録が完備しているとはいえない。これらの点を考え合わせると、3. で示した衝突確率の実績値も幾分幅をもたせて考えるべきである。したがって、モデルの妥当性もこのことを念頭に置いて論じられるべきである。

5. 結 言

航路計画において水路の評価を行う際、交通事故的危険に対する航行安全性は水路の混雑度を表わす一つの指標とすることができる。ある特性を有する水路で、交通量が増大するほど安全性は低下し、逆に安全性を一定の水準以上に保つためには交通量に上限を設ける必要がある。すなわち、水路の交通容量は安全性の面からも規定される。

これまでに提案されてきた航路計画の評価指標としては、待ち時間¹⁹⁾や避航確率²⁰⁾、安全係数²¹⁾が用いられている。これらの指標に加え、本モデルで提案したような安全性を示す指標も同時に水路の評価に用いることができる。今後、これらの指標間の関係を明らかにし、総合的な水路計画に用いられるようにする必要がある。

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

(1) 避航動態を考慮した運動学的な船舶衝突確率推

定モデルを構築し、水路特性・交通特性と衝突確率とを関連づけた。

(2) 過去の実績値と提案したモデルによる推定値を比較し、よい一致をみた。

(3) 従来提案されているモデルとの比較検討を行い、水路の安全性向上のための施策の探索と代替案評価を行うための道具として、本モデルがより適切であることを示した。

(4) 本モデルあるいは船舶交通流の挙動解析モデル一般が有するいくつかの問題点に関して議論を行い、今後のモデル改良の方向を明らかにした。

なお、本モデルは横断船舶が存在しない場合に限定して構築されたものである。現実の水路にはその数の多少は別として横断船舶が航行しており、本モデルの適用には限界があるため、引き続き航路交差点を扱えるモデルへと拡張を図る必要があることを述べておく。

最後に、本研究は昭和56年度文部省科学研究費補助金を受けて行われたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 福島 弘: 海難防止論, 成山堂, p. 35, 1972.
- 2) 同上, p. 59.
- 3) 杉崎昭生ほか: 航路設計のための海上交通容量 I~VI, 日本航海学会論文集, No. 50, pp. 39~45, 1973 ほか.
- 4) 木俣 昇・石崎肇士: シミュレーションによる航路計画の研究, 土木学会論文報告集, No. 194, pp. 113~126, 1971.
- 5) 原 潔: 船の衝突確率を任意の水域で推定する方法について, 日本航海学会誌, No. 46, pp. 191~200, 1971.
- 6) 原 潔: 避航システムモデルによる衝突確率の考察, 日本航海学会論文集, No. 50, pp. 29~38, 1973.
- 7) Curtis, R.G.: An Analysis of the Dangers of Ships Overtaking, Mathematical Aspects of Marine Traffic, Academic Press, pp. 175~191, 1979.
- 8) 藤井弥平ほか: 海上交通工学, 海文堂, pp. 80~83, 1981.
- 9) Lewisson, G.R.G.: The Modelling of Marine Traffic Flow and Potential Encounters, Mathematical Aspect of Marine Traffic, Academic Press, pp. 129~159, 1979.
- 10) Kuroda, K., H. Kita and S. Kono: Mathematical Model of Ship Collision Probability, Memoirs of the Faculty of Eng., Kyoto University, Vol. XLIV, Part 1, pp. 135~157, 1982.
- 11) 運輸省第三港湾建設局: シーバース計画調査報告書, pp. 18~22, 1974.
- 12) 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.
- 13) 藤井弥平: 序説海上交通工学, 海文堂, p. 89, 1971.
- 14) 原 潔: 船舶交通の統計的特性-I, 日本航海学会誌, No. 35, pp. 77~83, 1966.
- 15) 日本海難防止協会: 海上の交通安全に関する調査研究完了報告書, p. 37, 1970.
- 16) 前掲 13), p. 25, p. 32.
- 17) 藤井弥平: 水路の基本航行容量の一試算, 日本航海学会誌, No. 36, pp. 7~14, 1967.
- 18) 藤井弥平: 船の衝突直径と衝突発生率, 日本航海学会誌, No. 42, pp. 1~8, 1969.
- 19) 奥山育英ほか: 輸送ネットワークの評価シミュレーションの拡張, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第4部, pp. 167~168, 1977.
- 20) 運輸省第三港湾建設局: 大阪湾船舶避航確率調査報告書, 1981.
- 21) Goodwin, E. and R.B. Richardson: Strategies for Marine Traffic, J. of Navigation, Vol. 33, No. 1, pp. 40~48, 1980.

(1982.10.25・受付)