

OSHCOP-モデルによる航路整備と 航行規制効果の検討

STUDY ON EFFECTS OF FAIRWAY IMPROVEMENT AND NAVIGATIONAL REGULATIONS BASED ON OSHICOP-MODEL

黒田勝彦*・喜多秀行**

By Katsuhiko KURODA and Hideyuki KITA

1. はじめに

港湾整備事業が進められた今日、船舶交通のネックは港湾から狭水道に設けられている航路に移ったかの感がある。運輸政策審議会答申¹⁾で示された機関別国内貨物輸送量の将来推計値によると、海運による輸送量はトンベース、トンキロベースとも全国平均で年6%程度のかかなり高い伸び率をみせるとされ、外航海運が主体を占める外貨物輸送量もほぼ同様の伸びが見込まれている。また、海上保安庁が毎年実施している主要狭水道における航行船舶実態調査結果²⁾からは、航行船舶が年々大型化してきている傾向が読み取れる。このように、航路における輻輳は今後もさらに進展するものと考えられる。さらに、危険物輸送船の数も増加し、加えて、いったん衝突事故が発生した場合の被害の波及も甚大かつ広範囲に及ぶようになってきている。

上述のごとき状況を背景として、航路における船舶の航行安全性を確保するため、適切な航路整備や航行規制が要請されてくる。しかしながら、船舶交通の今後の推移に伴って航行安全性がどの程度低下するのか、あるいはある施策をとることにより航行安全性がどれだけ高められるのかは、まだ十分定量化されているとはいえない。航路における船舶の航行安全性を論じた従来のモデル^{3)~5)}は、航路特性や交通特性に関する操作性の面で、本研究で扱うような分析に適した構造とは必ずしもいいがたいため、種々の施策の効果を詳細に検討することは困難であった。

著者らは、これまで、船舶の航行安全性を定量的に表わす指標の1つとして船舶相互の衝突事故確率に着目し、これを確率論的に記述された船舶航行挙動から求め

るモデルを先に提案した^{6),7)}。このモデルは、次章で説明するごとく航路特性や交通特性を説明変数としており、これら説明変数それぞれの、あるいは相互の影響を容易に検討できるように考慮して構築されている。本研究では、操作性に富む著者らのモデル（操作型船舶衝突確率モデル、Operational Ship Collision Probability Model：以下、OSHCOP-Model と呼称する）を用いて、航路整備や航行規制が船舶衝突事故確率軽減に及ぼす効果を定量的に明らかにし、合理的な航路整備・運用計画策定のための方法論の基礎とすることを目的とする。

2. では船舶衝突事故確率推定モデルの概要を説明し、3. では航路整備が船舶衝突確率減少にもたらす効果を定量化する。4. では、まず交通特性の変化に伴う船舶衝突確率の変化を推定し、ついで航行規制によりもたらされる効果を算定して考察を加える。5. は結論である。

2. OSHICOP-モデルの概要

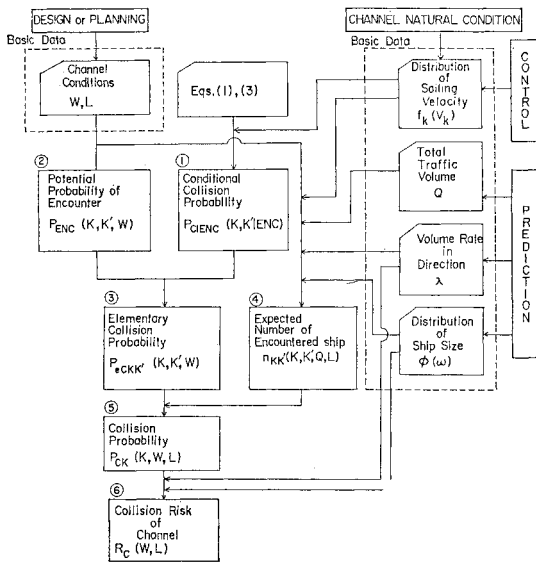
ここで述べる OSHICOP-モデルは一部すでに発表しており^{6),7)}、モデルの前提条件や仮定は文献 6) などに整理されているので、これらを参照されたい。紙数の都合上、ここではその概略を述べ、各施策の効果を算定するために必要となる改良点はそのつど示すこととする。

本研究で対象とする航路は延長 L_c 、一定幅 W の両側通行航路である。

本推定モデルの特徴は、船舶が衝突に至るプロセスを「出会い」と「避航失敗」に分け、これらの状態におちいる確率を、船舶の航行挙動を確率論的に表現することにより求めようとするところにある。また、航路・交通・船舶に関する諸特性、具体的には航路幅、交通量、船型構成などが、航行挙動を表現する際の説明変数とし

* 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



図一 モデルにおける推定プロセス⁹⁾

て組み入れられているため、これら諸特性が衝突確率に及ぼす影響を容易に定量化できることも特徴といえる。

図一は、本モデルによる1隻1トリップ当たりの衝突確率および水路全体がもつ衝突危険度を推定するプロセスを示したものである。以下、これに沿って概説する。

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。2船の“衝突”を船幅を直径とする2円の接触で表現することが、モデル構成上設定した他の仮定などのバランスで改良すべきかどうかは、モデル全体の精度を勘案して考察しなければならない。現段階では前に発表⁷⁾したように、既往のモデルと比較して全体としてかなりよい精度を与えていると考えられるが、さらに精緻な検討は今後の課題として残されている。避航の形態は行き会い、追い越し、被追い越しの3種類を考え、行き会いの場合は両船同時に、追い越しおよび被追い越しの場合は追い越しをかける船舶のみが避航動作をとるものとする。

船舶の避航開始距離 (Giveaway Starting Distance) は船型・速度・操船者により異なり、行き会い、追い越し、被追い越し (以後、それぞれ添字 H, T, O で表わす) に対し、現地観測結果⁹⁾ を用いて次のように定式化した。

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

ここに、 V は速度、 L は船舶長であり、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。

避航に伴う航跡を一定の変針角 θ をもつ折線で表現する。両船がそれ以上近づけば避航したとしても衝突に至るような距離を限界避航開始距離 (Critical Giveaway Starting Distance) l^* とよぶことにすると、衝突直径 $D_{kk'}$,

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

を用いて、幾何学的関係から

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

と表わされる。そして、出会いの条件下での避航失敗確率 (Conditional Collision Probability) は避航開始距離 l が限界避航開始距離 l^* より短い事象の確率であるため、

$$\left. \begin{aligned} P_{CHIENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{ENCOUNTER}) &= \text{Prob.}[l_{kk'H} \leq l^*_{kk'H} | \text{ENCOUNTER}] \\ P_{CTIENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{ENCOUNTER}) &= \text{Prob.}[l_{kk'T} \leq l^*_{kk'T} | \text{ENCOUNTER}] \\ P_{COIENC}(k, k', V_k, V_{k'} | \text{ENCOUNTER}) &= \text{Prob.}[l_{kk'O} \leq l^*_{kk'O} | \text{ENCOUNTER}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

次に、航路内での出会い確率 (Potential Probability of Encounter) を導く。航路中央線を原点に、これと垂直方向に x 軸をとり、自船と相手船の x 軸方向の相対距離を $L_{kk'}$ とすると、出会いの条件は $L_{kk'} \leq |D_{kk'}|$ である。一方、 x 軸方向の航行位置分布は正規分布になると報告されており⁹⁾、平均値と航路中央線との距離 \bar{x} 、標準偏差 σ_x は、

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= aW \\ \sigma_x &= -7.170 + 0.105 W + 2.168 Q_L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

である。ここに、 Q_L は個々の船舶と標準とする船舶との船舶長の比で重みづけされた交通量 (L 換算交通量) である。したがって、両側通航水路での上述の相対距離 $L_{kk'}$ の分布 $f_H(L_{kk'})$, $f_T(L_{kk'})$, $f_O(L_{kk'})$ は、次式の正規分布で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} f_H(L_{kk'}) &= N(2aW, \sigma_{xk}^2 + \sigma_{xk'}^2) \\ f_T(L_{kk'}) &= N(0, \sigma_{xk}^2 + \sigma_{xk'}^2) \\ f_O(L_{kk'}) &= N(0, \sigma_{xk}^2 + \sigma_{xk'}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

ここに、 $\sigma_{xk}^2, \sigma_{xk'}^2$ は着目船と相手船の x 軸方向の航行位置分布の分散である。前述した定義と式 (6) より、出会い確率は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_{ENC}^H(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_H(L_{kk'}) dL_{kk'} \\ P_{ENC}^T(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_T(L_{kk'}) dL_{kk'} \\ P_{ENC}^O(k, k') &= \int_{-D_{kk'}}^{D_{kk'}} f_O(L_{kk'}) dL_{kk'} \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

式 (4)、式 (7) の積として、船型 k と k' の 2 船間の衝突確率 (基本衝突確率 (Elementary Collision Probability) と呼称する) は、行き会い (H)、追い越し (T) および被追い越し (O) のそれぞれの場合について次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} P_{eCH}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CH|ENC}(k, k', V_k, V_{k'}|ENCOUNTER) \\ &\cdot P_{ENC}^H(k, k') \\ P_{eCT}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CT|ENC}(k, k', V_k, V_{k'}|ENCOUNTER) \\ &\cdot P_{ENC}^T(k, k') \\ P_{eCO}(k, k', V_k, V_{k'}) &= P_{CO|ENC}(k, k', V_k, V_{k'}|ENCOUNTER) \\ &\cdot P_{ENC}^O(k, k') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

さて、着目船が航路内で行き会い、追い越し、追い越される船舶の平均隻数 (Expected Number of Encountered Ship) を $\bar{n}_{Hkk'}, \bar{n}_{Tkk'}, \bar{n}_{Okk'}$ とすると、着目船がこれらの船舶すべてと衝突しない確率は、同一船型でも速度にばらつきがあることを考えて、

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{SHkk'} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \{1 - \bar{n}_{Hkk'} \cdot P_{eCH}(k, k')\} \\ &\cdot f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \\ \bar{P}_{STkk'} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \{1 - \bar{n}_{Tkk'} \cdot P_{eCT}(k, k')\} \\ &\cdot f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \\ \bar{P}_{SOkk'} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \{1 - \bar{n}_{Okk'} \cdot P_{eCO}(k, k')\} \\ &\cdot f_k(V_k) f_{k'}(V_{k'}) dV_k dV_{k'} \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

となる。ここに $f_k(V_k), f_{k'}(V_{k'})$ は船型 k, k' の船舶の速度の確率密度関数である。これより、ある船型 k の着目船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ことであるから、船型 k の船舶の期待衝突確率 (Collision Probability) P_{ck} は、

$$P_{ck} = 1 - \int_{k'} \{ \bar{P}_{SHkk'} \cdot \bar{P}_{STkk'} \cdot \bar{P}_{SOkk'} \} \phi(\omega_{k'}) d\omega_{k'} \dots\dots\dots(10)$$

で与えられる。ここに $\omega_{k'}$ は船型 k' の船舶の船舶長の常用対数、 $\phi(\omega_{k'})$ はその確率密度関数であり、平均 μ_ω 、分散 σ_ω^2 の正規分布に従う¹⁾。

以上より、所与の航路におけるある方向 i に航行する任意船型の船舶 1 トリップ当たり期待される平均的な衝突確率 P_{ci} は、次式のごとく表わされる。

$$P_{ci} = \int_k P_{ck} \phi(\omega_k) d\omega_k \dots\dots\dots(11)$$

さらに、2 方向の方向別交通量を考慮した航路全体において期待される平均的な衝突確率 (水路の衝突危険度 (Collision Risk of Channel) という) R_c は、全交通量に占める 1 方向交通量の比率を示す方向別交通量比 λ を用いて

$$R_c = \lambda P_{c1} + (1 - \lambda) P_{c2} \dots\dots\dots(12)$$

と表わされる。ここに、 P_{c1}, P_{c2} は式 (11) で与えられる各方向の衝突確率である。

3. 航路整備が航行安全性の向上に及ぼす効果

(1) 航路の拡幅

鉄道や道路では、交通量の増加に対して複々線化や車線増設で対応を図るが、航路にはレーンの概念もなく、これまで拡幅に伴う衝突確率の低減効果は定量化されていなかった。

式 (5)~式 (7) から、水路幅 W を増大させると同航船、反航船いずれの場合も、その出会い確率が減少することが容易に証明できる。この結果、図-2 に示すごとく、航路幅 W が広がるにつれて衝突確率 R_c は単調に減少し、航路幅の対数と衝突確率の対数とがほぼ線形関係にあることがみてとれる。これより、たとえば、交通量が一定の場合、航路幅を 2 倍に拡張すると 1 隻 1 トリップ当たりの平均衝突確率はほぼ半分になることがわかる。

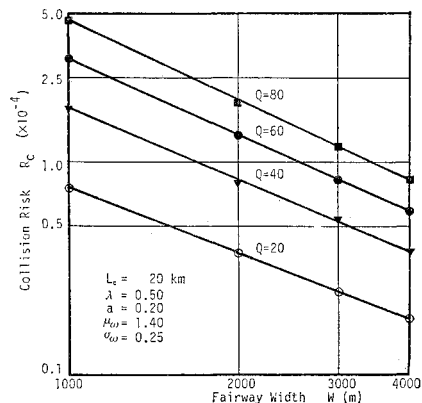


図-2 航路幅の変更が衝突確率に及ぼす影響

(2) 航路中央分離表示の設置

航行位置分布は航路側端の境界条件に依存して平均値の位置が変わるとともに、ブイによる中央分離表示の設置によっても変化する。航路側端の境界条件を変えることは実際には多額の費用を要するため容易ではないが、ここでは航行位置分布の分散を一定としたまま平均値のみを、航路中央から平均航行位置までの距離と水路幅との比 a (式 (5) 参照) を指標として、 $a=0.10\sim 0.25$ の範囲で動かした。ここで、 a の値と航路の状態には、

- $a=0.10$ 両側がバンクでかつ航路中央分離表示による航行分離がなされていない航路
- $a=0.20$ 両側がバンクでかつ航路中央分離表示による航行分離がなされている航路
- $a=0.25$ 航路中央分離表示による航行分離がなされており、かつ両側に余裕水域を有する航路

なる対応関係がある⁹⁾。なお、 $a=0.15$ は $a=0.10$ と $a=0.20$ の中間的狀態、すなわち、目安となるブイが打ってある場合や、中央分離表示がなくかつ両側にある程度の余裕水域を有する場合に対応する。

結果を 図-3 に示す。衝突確率の変化の挙動は方向別交通量比 λ によって大きく異なる。 $\lambda=0.0$ あるいは $\lambda=1.0$ の場合は、観測された航行位置分布データに基づくモデル式 (5) による限り、衝突確率が変化しないのは当然の帰結であるが、これと対比する実証データは今まで得られていない。ところで、 λ が 0.5 に近づくに従って航行分離の効果が顕著に現われてくる。両側がバンクの航路に中央分離表示を設置するのみで、 $\lambda=0.2$ あるいは $\lambda=0.8$ の場合に約 70%、 $\lambda=0.5$ の場合には約 80% もの衝突確率の減少が期待できる。現在、わが国では浦賀水道航路や備讃瀬戸東航路などの開発保全航路に指定されているおもな航路では航行分離がなされているが、いまだ中央分離表示のない両側通行航路も少なくない。ブイの設置費自体は航路拡幅費用に比べて少なくすむことでもあり、有効な施策であるといえよう。

(3) 航路中央分離表示の変移

これまで、航路中央分離表示は文字どおり航路中央に設置するものと考えてきた。しかし、これまでの検討から、方向別交通量比 λ が 1 に近いような状態が生じる航路では、方向別交通量比に応じた中央分離表示の変移が、衝突確率を減少させるうえでの 1 つの有効な方法となることが示唆される。そこで、方向別交通量比のみが変わる場合に中央分離表示の変移がどのような効果をもたらすかについて検討する。

図-4 は、航路全体の幅を一定としたまま、交通量が卓越する方向の片側航路幅が当初の r_W 倍 (したがって

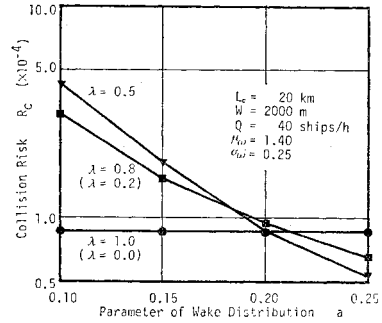


図-3 航路の境界条件と衝突確率との関係

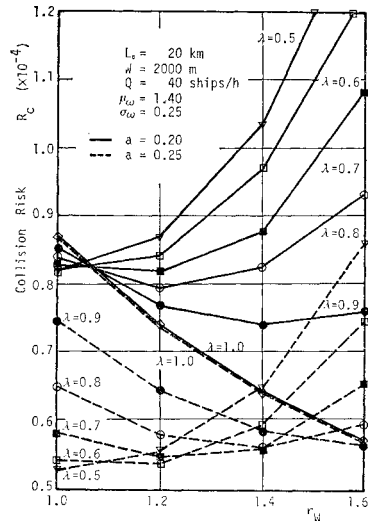


図-4 航路中央分離表示の変移効果

反対方向の片側航路幅は $(2-r_W)$ 倍) となるように中央分離表示を変更することが衝突確率に及ぼす影響を、種々の方向別交通量比に対して計算したものである。図中の実線は航行位置分布のパラメーター a が 0.20 の場合に、破線は 0.25 の場合にそれぞれ対応している。 $a=0.20$ の場合、 λ が 0.6 より小さい範囲では中央分離表示の変移による衝突確率減少効果はまったくみられないが、 λ が 0.7 あるいは 0.8 になると、片側航路幅を 1.2 倍にすることが衝突確率を減少させる。 λ が 0.9 になると、片側航路幅を 1.4 倍に広げることによりさらに大きな効果が期待できる。 λ が 1.0、すなわち対向船舶が存在しない状態は現実にはきわめてまれであるが、この場合は当然のことながら航路全体を一方通行航路として利用することが最善となる。 $a=0.25$ の場合は一層顕著な効果がみられ、 λ が 0.6 の場合でも中央分離表示の変移がわずかながらも効果を上げる。 λ あるいは a の違いによって同じ r_W でも衝突確率に及ぼす影響が異なるのは、後の方向別交通量比の変動による影響のところを考察を加えるが、反航船に対する衝突確率と同航船

に対する衝突確率の双方に及ぼす影響の大小関係が全体の衝突確率の変化を規定していることによる。したがって、実施に際してはこれらのことを勘案して適切な施策を選定する必要がある。図からも理解されるように、航路両側に余裕水域を有する航路では効果は特に大きく、ここで設定された諸条件のもとでは λ が 0.8 の場合でも約 15% も衝突確率が減少する。

なお、このような方策はすでに道路において交通容量の増大化や混雑の解消策として用いられている。航路において中央分離表示を動かすことは技術的には困難であるかもしれないが、陸上部に設置される導灯や導標の利用など実施可能な方法も考えられる。

4. 航行規制が航行安全性の向上に及ぼす効果

(1) 交通特性と衝突確率との関係

航行規制の方策を探るに先立ち、現状のまま何ら施策を講じない場合に、交通特性の変化によってどの程度航行安全性が変化するかを把握するための検討を行う。

図-5 は、他の諸特性を一定とした時の、交通量 Q と衝突確率 R_c との関係を図示したものである。これより、交通量の対数と衝突確率の対数との間にほぼ線形関係が成立しており、衝突確率は交通量の冪乗に比例して増加することがわかる。交通量の増加に伴う衝突確率の増大は、航路内での出会い隻数の増加に起因している。

さらに、交通量だけでなく、航行船舶の船型構成分布もまた衝突確率に大きく影響している。一般に、船型が大きくなるほど衝突に関する危険性は高いと考えられている¹⁰⁾。これは大型船の操縦性能の悪さや死角の大きさなどに起因するところが大きいと思われるが、実際には、大型船の操船者は小型船の操船者に比べて一段と高い技術ならびにそれを保証する資格が要求され、さらに

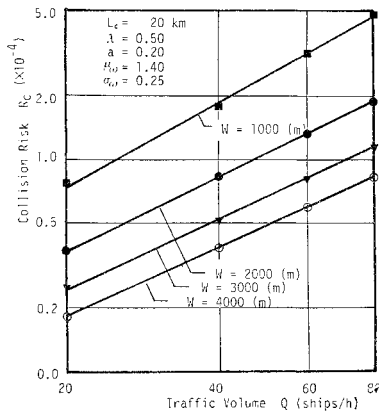


図-5 時間交通量の変化が衝突確率に及ぼす影響

これら大型船が有する危険性の高さを認識したうえで慎重に操船しているため、極端に異なるわけではない。観測結果⁸⁾ から得られている避航開始距離は船型が大きくなるほど長くなる（反航船に対する避航開始距離は航行速度により規定されるが、航行速度は一般に船型が大きくなるにつれて増大するため¹⁰⁾）。これは、船型が大きくなるほど操船者が余裕をもって避航しようとする当然の結果であるが、反面、本モデルで定義した限界避航開始距離も船型が増大するにつれて長くなり、出会いの確率も大きくなる。したがって、他の条件が同じなら、出会い確率ならびに限界避航開始距離の増大といったいわば危険側の効果と、避航開始距離が長くなるという安全側の効果とのバランスにより、船型別にみた衝突危険度は異なってくる。

本モデルでは船型を船舶長 L で表現しており、調査結果¹¹⁾ に基づいて航行船舶の船舶長の対数 ω が正規分布、 $N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$ に従うと仮定されている。そこで、船舶長の対数平均 μ_ω と対数標準偏差 σ_ω を変化させてみた。図-6 に μ_ω による影響を、図-7 に σ_ω による影響を示す。これらの図から、 μ_ω と衝突確率の対数とがほぼ線形関係にあり、 σ_ω についても同様の傾向を示すことがみてとれる。なお、表-1 に $\mu_\omega, \sigma_\omega$ と船舶長、総トン数との対応を示しておく。

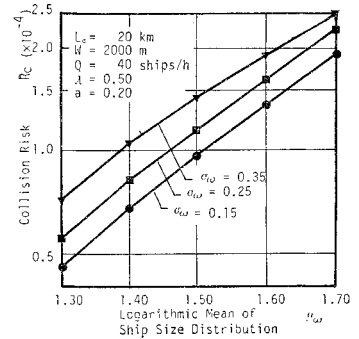


図-6 平均船型の変化が衝突確率に及ぼす影響

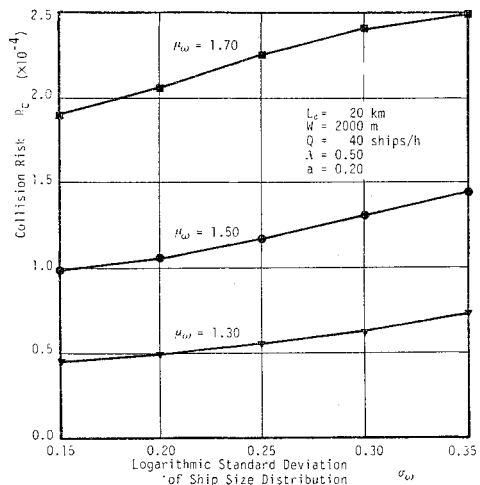


図-7 船型構成のばらつきが大きさが衝突確率に及ぼす影響

表-1 μ_w, σ_w と船舶長 L , 総トン数 GT との対応

μ_w	σ_w	0.15		0.25		0.35	
		$L(m)$	$GT(t)$	$L(m)$	$GT(t)$	$L(m)$	$GT(t)$
1.40	$\mu_w - 2\sigma_w$	12.6	19	7.9	5	5.0	2
	$\mu_w - \sigma_w$	17.8	51	14.1	26	11.2	14
	μ_w	25.1	133	25.1	133	25.1	133
	$\mu_w + \sigma_w$	35.5	352	44.7	672	56.2	1279
	$\mu_w + 2\sigma_w$	50.1	926	79.4	3377	125.9	12333
1.50	$\mu_w - 2\sigma_w$	15.8	36	10.0	10	6.3	3
	$\mu_w - \sigma_w$	22.4	96	17.8	51	14.1	26
	μ_w	31.6	254	31.6	254	31.6	254
	$\mu_w + \sigma_w$	44.7	672	56.2	1279	70.8	2447
	$\mu_w + 2\sigma_w$	63.1	1770	100.0	6457	158.5	23555
1.60	$\mu_w - 2\sigma_w$	20.0	70	12.6	19	7.9	5
	$\mu_w - \sigma_w$	28.2	184	22.4	96	17.8	51
	μ_w	39.8	485	39.8	485	39.8	485
	$\mu_w + \sigma_w$	56.2	1279	70.8	2447	89.1	4668
	$\mu_w + 2\sigma_w$	79.4	3377	125.9	12333	199.5	44961
1.70	$\mu_w - 2\sigma_w$	25.1	133	15.8	36	10.0	10
	$\mu_w - \sigma_w$	35.5	352	28.2	184	22.4	96
	μ_w	50.1	962	50.1	962	50.1	962
	$\mu_w + \sigma_w$	70.8	2447	89.1	4668	112.2	8922
	$\mu_w + 2\sigma_w$	100.0	6457	158.5	23555	251.2	85912

船舶が大型化しつつあるなかで、大型船を通航可能とするための航路の増深などが要請されているが、その結果平均船型が大きくなり、また船型構成の分散を大きくする場合がある。交通量一定のもとでは航行安全性の低下を招くため、同等の安全性を保つためには、これと並行して航路幅などの安全対策をとる必要のあることがわかる。

一方、交通特性としての航路交通量は時間変動が大きく、また主要港湾との位置関係や潮流にもよるが、一般にピーク時は方向により異なる。図-8 は文献(14)による浦賀水道での交通量観測結果から方向別交通量比 λ の 24 時間の変動を求めた一例である。図-9 は方向別交通量比 λ を変化させて衝突確率の変動をみたものである。これより、 λ が衝突確率に及ぼす影響は航行位置分布の平均位置を表わすパラメーター a と深い関係にあることがわかる。 a が 0.10 あるいは 0.15 の場合、すなわち中央分離表示がない場合は λ が 0.5 に近づくほど衝突確率は増大するが、逆に a が 0.25 の場合、すなわち中央分離表示がある場合は減小し、 a が 0.20 の場合にはほとんど変動がみられない。この結果は以下のごとく解釈できる。

衝突確率を、反航船に対するものと同航船に対するものに分けて考える。方向別交通量比が 0.5 に近づくにつれ、同航船との衝突確率は減少する。この減少の程度は中央分離表示の有無には影響されない。一方、反航船に対する出会い確率は大きくなり、このことが衝突確率の増大をもたらす。ここには示さないが、式(4)より求められる避航失敗確率は反航船に対するものの方が同航船

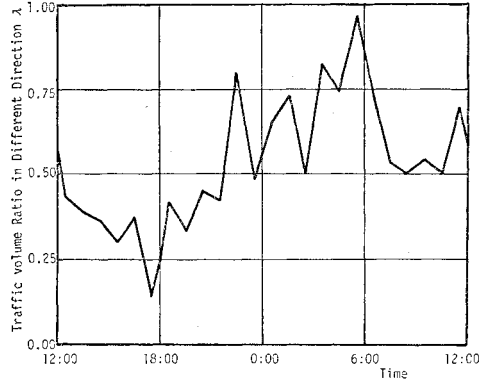


図-8 方向別交通量比の時間変動

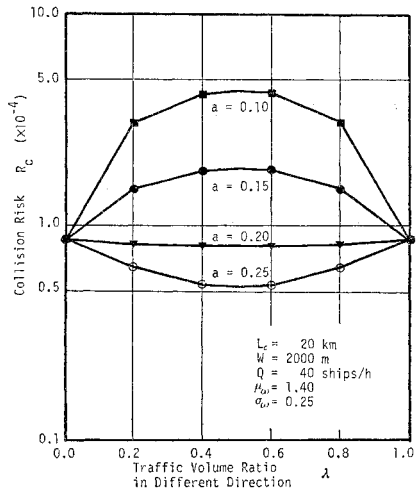


図-9 方向別交通比の変化が衝突確率に及ぼす影響

に対するものより 2~4 倍大きいという実績値^{(5),(6)}にほぼ見合った結果が得られている。中央分離表示がある場合、この増大の程度はさほど大きくないが、中央分離表示がない場合はかなり顕著なものとなる。これらの結果、中央分離表示がある場合は反航船との衝突確率の増大よりも同航船との衝突確率の減少が卓越し、水路全体の衝突危険度 R_c は減少する。逆に、中央分離表示がない場合は反航船との衝突確率の増大が同航船との衝突確率の減少より卓越するため、 R_c は増大する。つまり、 λ が変化する際の、反航船に対する衝突確率の度合いと、同航船に対する衝突確率の増減の度合いの大きい方が、全体としての衝突確率の変化の挙動を規定することとなる。

なお、航行位置分布のパラメーター a の値を 0.2 から 0.1 へと変えるだけで λ の変化に伴う衝突確率の変化の挙動がまったく逆になり、感度が高すぎるようにもみえるが、 a を変えることにより反航船との出会い確率は 6 倍強に増加しており、先に述べた反航船に対する避航失

敗確率の大きさとも考えあわせると、十分納得のいく結果といえよう。

以上の結果を踏まえ、以下では、交通量規制、航行速度制限、航行最大船型規制を行った場合の衝突確率に及ぼす影響を検討する。

(2) 時間交通量の制限

先に示した図-5から、逆に、単位時間交通量を制限することの効果を読み取ることができる。たとえば、時間交通量を40隻から10%および20%カットすると、衝突確率はそれぞれ12%および23%減少する。時間交通量制限の1つの具体的方法は、航路での航行管制を実施することにより、航路入口で進入制限をかけることである。衝突確率はほぼ交通量の幕乗に比例して増大するため、本航行規制は特にピーク時に実施して単位時間交通量の平滑化を図る場合に有効であると考えられる。また、一般に、ピーク時には方向別交通量比が1に近い値となっていることが多いため、卓越している側の交通量を制限したり、大型船の通過時刻を指定して方向別交通量比を0.5に少しでも近づけることが、図-9からも理解できるように、特に航路分離が行われている主要航路で相乗的な効果をもたらす。

ただし、本規制は航路を通過する船舶に待ちを強いる結果となるため、最終的には航行安全性だけでなく船舶の時間価値などをも含めた形での検討が必要となる。あるいは、航路入口における規制といった予期せぬ待ちを強いる方法ではなく、たとえば浦賀水道航路のような港湾前面に存在する航路では広域的な管制による出港時刻の調整、さらには海上交通の枠を越え、航路における航行安全性を考慮した輸送分担の検討といった形で考慮されるべきであろう。

(3) 最高速度制限

航路内で航行速度に上限を設ける場合を想定し、この効果を定量化するための試算を行った。計算にあたっては、式(9)における航行速度の確率密度関数 $f(V)$ の代わりに、

$$f'(V) = \begin{cases} f(V) & 0 \leq V < V_{max} \\ \int_{V_{max}}^{\infty} f(V) dV & V = V_{max} \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

を用い、積分範囲の上限も V_{max} とする必要がある。ここに、 V_{max} は設定される最高速度である。

結果を船型構成分布の平均 μ_w 、標準偏差 σ_w と関連づけて整理したものが図-10、図-11である。航路に最高速度制限を設けることが衝突確率に及ぼす効果は、以下の2点から説明される。その1点は、対象としている船舶交通流が速度のばらつきを有するため、最高速度

制限を設けると追い越し隻数が減少し、追い越しにかかわる衝突確率が小さくなることである。他の1点は、式(1)、式(3)からもわかるように、反航船との避航に際して高速で航行する船舶ほど一般に余裕をみて避航を開始する傾向にあるため、最高速度を越える速度で航行していた船舶については避航開始距離が短くなることが考えられるが、限界避航開始距離は変化しないため、結果として避航失敗確率が大きくなることである。そして、実際の効果はこの2つの効果のうち卓越する側の効果が反映される。ここでは、設定する最高速度が10ノットを下回らない範囲ではすべて追い越し隻数の減少効果が卓越するが、10ノット以下になると追い越し隻数の減少効果よりも避航開始距離の減少による避航失敗確率の増大効果の方が大きくなる。この傾向は平均船型の大きい交通流で特に顕著であるので、このような船舶交通流では速度制限は10ノット以下にすべきではないと考えられる。このようなことから、現在、海上交通安全法に

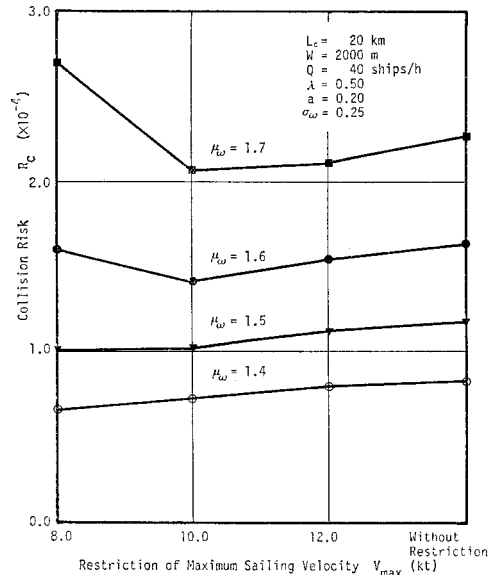


図-10 最高速度制限の効果と平均船型との関係

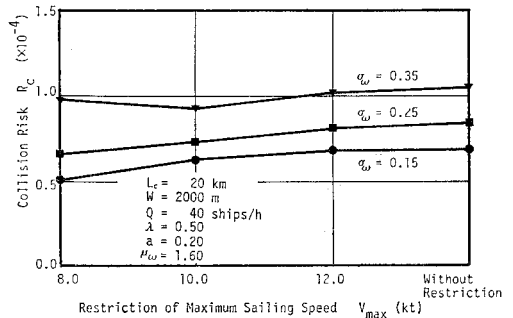


図-11 最高速度制限の効果と船型構成のばらつきとの関係

基づく最高速度制限が 12 ノットに設定されているのは妥当な値であるといえよう。

(4) 最大船型の規制

本研究で用いたモデルでは、すでに述べたように船型を船舶長 L で表現している。しかしながら、最大船型を設定する際に船舶長よりもトン数で記述した方が感覚的に理解しやすいため、船舶長と関連づけて整理されている¹²⁾総トン数を用いることとした。それゆえ、重量トンを用いている船種に関しては換算する必要がある。

航行船舶の船型に上限を設けることの規制効果は、次の 2 つの状況を想定して求めた。1 つは、規制がないときに航行していた船舶のうち、最大船型を越えるものが分担していた輸送量は他の航路に迂回するか海運以外の輸送機関に転換すると考えるものである (Case 1)。この場合、当該航路における交通量は規制のないときよりも減少することになる。計算にあたっては、式 (10)、式 (11) の $\phi(\omega_*)$ の代わりに、

$$\phi'(\omega_*) = \frac{\phi(\omega_*)}{\int_0^{GT_{max}} \phi(\omega_*) d\omega_*} \dots\dots\dots (14)$$

を用い、積分範囲の上限も GT_{max} とする。また、他の 1 つは、最大船型を超える船舶が輸送していた貨物量を規制にかからない船型の船舶で輸送するとするもので、航行可能な船舶の船型構成の比率は一定のまま、交通量は規制がない場合より増加することとなる (Case 2)。この場合も計算には上述の $\phi'(\omega_*)$ を用い、さらに式 (9) の $\bar{n}_{kk'}$ を

$$\bar{n}'_{kk'} = \frac{\int_0^{GT_{max}} GT(\omega_*) \phi(\omega_*) d\omega_*}{\int_0^{GT_{max}} GT(\omega_*) \phi(\omega_*) d\omega_*} \cdot \bar{n}_{kk'} \dots\dots\dots (15)$$

とする。ここに GT_{max} は許容される最大船型を、 $GT(\omega_*)$ は対数船舶長 ω_* の船舶の総トン数を表わす。

図-12、図-13 に前者の結果を破線で、後者の結果を実線で示す。Case 1 では、図-12 から μ_ω が 1.50 以下では 10 000 G.T. までの船型制限はほとんど効果のないことがわかる。また、 μ_ω が 1.70 の場合でも 50 000 G.T. より小さい船型を最大船型として設定しなければ実質的な効果はなく、30 000 G.T. で 7%、10 000 G.T. でも 19% しか衝突確率を減少させない。一方、図-13 から、 σ_ω が 0.35 の場合最大船型を 50 000 G.T. と設定しても約 4%、30 000 G.T. で 12%、10 000 G.T. では 28% とかなり効果のあることが読み取れる。これは、規制にかかる船舶隻数の総隻数に占める比率に起因するところが大きく、たとえば最大船型 30 000 G.T.、 σ_ω が 0.25 の下で μ_ω が 1.4~1.7 の範囲で変化しても規制にかかる船舶の総隻数に占める比率は約 0.6% 増

加するにすぎないのに対し、 μ_ω が 1.6 のもとで σ_ω が 0.15 から 0.35 になると規制にかかる船舶の構成比率は 2.0% も増加する。このことから、現状の μ_ω 、 σ_ω のもとでは特に σ_ω が大きい航路で最大船型規制を課することの有効性が理解される。

次に、Case 2 の結果をみよう。本結果をみる限りでは最大船型規制はかえって逆効果となることがわかる。これは、大型船が航行しないことによる衝突確率の減少効果より交通量増加による衝突確率の増大効果が大きいためである。ただ、現状の航路は水深の面で大型船舶の航行が制約されていると考えられるため、本結果から逆に、航路浚渫による航行制約の緩和がもたらす衝突確率の減少の程度を推定することが可能である。

なお、ここで述べた最大船型規制の効果や、先に述べ

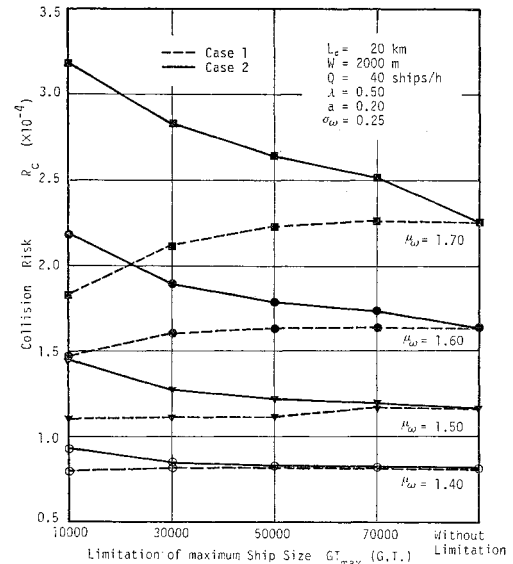


図-12 最大船型規制効果と平均船型との関係

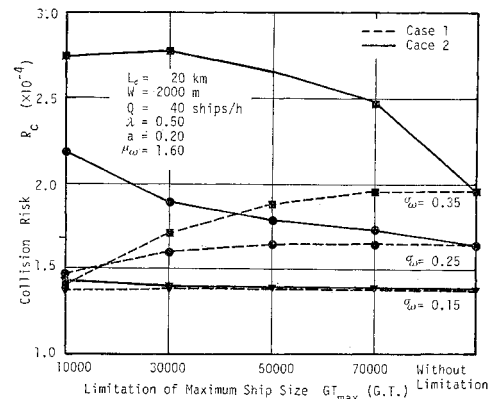


図-13 最大船型の規制効果と船型構成のばらつきとの関係

た σ_0 を小さくすることの効果から、航行速力の小さい小型船舶とそれ以外の船舶とを分離し、新たに通航帯を設置したり小型船舶が航路側端を航行することを推奨することも、航行安全性を向上させる施策の1つとして検討されるべき余地が生じてくる。

5. 結 論

船舶の衝突は稀現象であるがゆえに、航路設計・管理の操作諸変数と船舶衝突確率を実証的に関連づけることは非常に困難である。このため種々の現象説明モデルが開発されてきたが、これまで開発されてきた船舶航行挙動を扱うモデルの多くはシミュレーションモデルであり、膨大な計算時間を要するためきめ細かな解析が十分できないことに加え、船舶の衝突確率を直接扱うものではなかった。また、数理モデルについても、諸特性に関する操作性の面から本研究の目的とする解析には適用が難しかった。本研究はこの点に留意して開発されたモデルを用い、特に、航路整備と航行規制が航行安全性の向上にいかにか寄与するかに着目して解析を行ったものである。得られた主たる結果を以下に示す。

(1) 衝突確率は、航路の単位時間交通量の冪乗にほぼ比例する。その指数は航路幅に依存しない一定値であり、交通量が1.5倍になると衝突確率は1.6~1.75倍に、交通量が2倍になると衝突確率は2.2~2.7倍となる。

(2) 衝突確率は、船舶交通流を構成する船舶の船型分布の対数平均および対数標準偏差の冪乗にほぼ比例する。

(3) 衝突確率と方向別交通量比ならびに航路境界条件とは密接な関係にあり、方向別交通量比の変化が衝突確率に与える影響は一概に規定できない。方向別交通量比が0.5に近い場合、航路中央分離表示を設置することにより衝突確率は著しく小さくなる。

(4) 衝突確率は航路幅の冪乗にも比例する。したがって航路の拡幅は衝突確率を減少させ、たとえば、航路幅を2000mから3000mにすると、交通量が50%増加しても現在と同程度の航行安全性を確保できる。

(5) 一方向の交通量が他方向の交通量に比べて卓越する場合 ($\lambda > 0.5$)、その比率に応じて中央分離表示を変移させることが衝突確率を減少させるうえで有効となる。この効果は、航路側方に航行余裕水域を有する航路で特に顕著となる。

(6) 航行船舶に最高速度制限を課することは衝突確率を小さくする効果があるが、制限値を10ノット以下に設定することはかえって逆効果を招く。船型構成分布のばらつきが大きい航路ほど、この制限は効果的であ

る。

(7) 最大船型の規制も最高速度制限と同じく、船型構成分布のばらつきが大きい航路ほど有効となる。ただし、これは最大船型を越える船舶の分担している輸送量が、他航路ないしは他の輸送機関に転換すると仮定した場合に限る。この輸送量を航行可能船舶が分担すると仮定した場合は交通量増大効果の方が卓越し、かえって衝突確率は大きくなる。

(8) 航路浚渫により大型船の航行を可能とし、これが結果として交通量を少なくするならば、衝突確率は減少する。

以上の解析を通じて、衝突確率は種々の特性と密接な関連を有し、ある施策が有効か否かをそのみでは一概に論じられない場合も少なくないことが明らかとなった。したがって、本研究で検討した施策を組み合わせ、いかにして効果的なものとするかの選択が重要となってくる。

なお、計算には京都大学大型計算機センターの FACOM M-382 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 運輸政策審議会：長期展望に基づく総合的な交通政策の基本方向，昭和56年7月。
- 2) 海上保安庁警備救難部航行安全企画課：通航船舶実態調査報告書，昭和48年度～昭和54年度。
- 3) 藤井弥平：避航と衝突の確率について，日本航海学会誌，記念論文集，pp. 63~73, 1968。
- 4) 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。
- 5) Curtis, R.G.: An Analysis of the Dangers of Ships Overtaking, Mathematical Aspects of Marine Traffic, Academic Press, pp. 175~191, 1979。
- 6) Kuroda, K., H. Kita and S. Kono: Mathematical Model of Ship Collision Probability, Memoirs of the Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol. XLIV, Part 1, pp. 135~157, 1982。
- 7) 黒田勝彦・喜多秀行：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) 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。
- 9) 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。
- 10) VLCC 研究会：VLCC に関する十章，成山堂書店，p. 43, 1977。
- 11) 藤井弥平：序説海上交通工学，海文堂，p. 89, 1971。
- 12) 前掲 11)，p. 24。
- 13) 前掲 11)，p. 32。
- 14) 運輸省第二港湾建設局，(社)日本海難防止協会：東京湾船舶航行実態調査報告書，p. 73, 1976。
- 15) Lewison, G.R.G.: The Risk of a Ship Encounter Leading to a Collision, J. of Navigation, pp. 384~407, 1978。
- 16) 藤井弥平：船の衝突直径と衝突発生率，日本航海学会論文集，No. 42, pp. 1~8, 1969。

(1983.4.22・受付)