

通行船舶制限が海上衝突事故率に与える影響

京都大学工学部 正会員 黒田 勝彦
京都大学工学部 正会員 喜多 秀行

§1. 緒言

航路計画を策定する際、安全性の検討は経済性の検討と共に不可欠のものである。特に、昨今の交通量増加や船舶の大型化に伴ない、海難事故は多発化・大型化の傾向にある。このため、航路の改良や通行制限の実施が要請されてきているが、この場合、採るべき施策が事故率にどのような影響を及ぼすかを把握されていなければならない。

船舶の衝突事故を扱った従来の研究は航海学の分野でいくつかあるが、①事故記録の統計的分析を行なったもの、②確率論的モデルを用いて事故率推定式を作成したもの、の2つに大別できる。前者に属するものに、衝突隻数と換算交通量(船舶長を重みとして交通量)との比を衝突危険度と定義し、主要狭水道の危険度を比較した藤井¹⁾の研究、海難隻数と在籍隻数との比と海難発生率と定義し、海難発生率が船型(総トン数)の乗数に比例することも示した塩原²⁾の研究、全交通量に占める船型(船舶長)別交通量の比率と全衝突船舶隻数に占める船型別衝突隻数の比率との比と各船型に対する危険率と定義し、この危険率がほぼ長さの $1 \sim 1.2$ 乗に比例することも示した藤井³⁾の研究がある。これらは、事故率とある特性との単相関を検討したものが主であり、各種の特性が複合的に作用する場合への適用は困難である。一方、後者に属するものには、海面の船舶の運動がランダムであることから、分子運動論を適用して衝突確率を求めた藤井⁴⁾の研究、単位時間に必要な避航回数と避航能力を待ち行列理論における到着率およびサービス率と考え、ある時間で以上他船を待たせる確率が衝突確率に等しいと示した原⁵⁾の研究がある。しかし、④と⑤とも「ある確率 P 」、「ある時間 T 」の理論的裏付けに欠ける点がある。また、これらの研究は総じて航海学をその背景になされたものであるため、航路にどのような改良・規制を加えるかといった土木計画学的視点には考慮が払われていないように見える。

筆者の一人は、先に、航行船舶の相対運動と各船舶の航路内の位置に着目し、前者を船種・船型によって、後者を航路幅・交通量等によって表現し、「2船の出会い確率」と「出会い時の衝突確率」という2つの概念をもとに、航路特性・交通特性を組み込んだ運動学的な衝突事故確率推定モデルを提案した⁶⁾。本研究は、このモデルに修正を加え、各特性に関するパラメータを動かすことにより、交通量や船型等についての通航制限が衝突事故率にどのような影響を与えるかを算出し、航路計画策定のための基礎情報を得ようとするものである。

§2. 航路特性と交通特性

本研究で考察する航路特性ならびに交通特性について、以下に略述する。

(1) 対象とする航路

横断交通及び漁船の少ない狭水道を対象とし、航路幅を W 、航路長を L_c とする。

(2) 船型別・方向別交通量

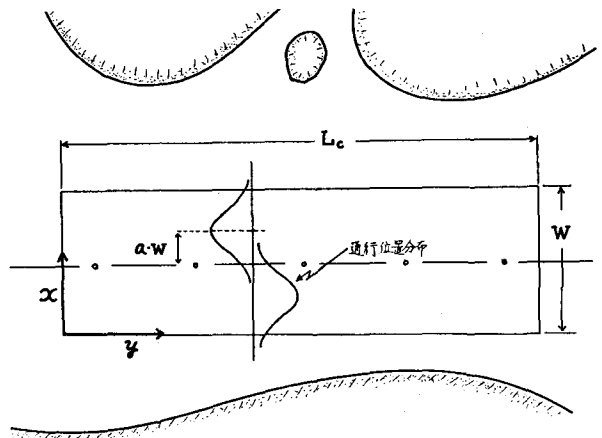


図-1 航路と通行位置分布

全交通量に占める漁船の割合が小さい水路では、通行船の船型分布は対数正規分布

$$\phi(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\alpha - M)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

に従うことが知られている。⁹⁾ここに α は船舶長 L_s の常用対数である。また、 M 、 σ は α の平均および標準偏差であり、主要水路に対する値が求められている。従って、全交通量 Q 、方向別交通量の全交通量に対する割合を λ_d とすると、船型別交通量 Q_{di} は、

$$Q_{di} = Q \cdot \lambda_d \cdot \int_{\alpha_i} \phi(\alpha) d\alpha \quad (2)$$

と表わされる。

③船型別・方向別速度分布

船舶の速度が水路上の位置や進行方向に無関係であると仮定すれば、船型別速度分布は正規分布 $N(\mu_{vk}, \sigma_{vk}^2)$ と見做すことができる。⁹⁾ここに μ_{vk} 、 σ_{vk} は各船型に対応した値とする。但し、潮流速の大きい水路では同一船型であっても進行方向により速度が異なるが、ここでは潮流の影響は考慮しないこととする。

④水路上の船舶通行位置分布

各種の船が混在している水路では、単位時間 Δt 内に任意の見通し線を通過する船舶数がポアソン分布に従うことから、船舶は水路方向にランダムに分布しているものと考えられる。一方、航路幅方向の通行位置の分布は、直線航路では正規分布 $N(D_E, \sigma_{pd}^2)$ に従うことが確かめられている。¹⁰⁾ D_E は航路中央分離線からの距離であり、

$$D_E = a \cdot W \quad (3)$$

$$\sigma_{pd} = -7.170 + 0.105W + 2.168Q_{ed} \quad (4)$$

ここに、 W は航路幅、 Q_{ed} は方向別L換算交通量である。 a は航路形状によって定まる係数であり、中央分離線表示の有無等によって0.1~0.2の値をとる。一方通行航路では D_E は0となり、平均的な通行位置は航路中央線となる。

§3. 推定モデルの基本的な考え方

船舶交通は道路交通に比べてとりうる船型の範囲が広く、それに伴ない船速・避航開始距離等のばらつきが大きくなるため、解析の際には船型の違いも十分考慮することが重要である。そのため、あらかじめ船舶をいくつかの船型ランクに分けて考察を進める。

ある一船の進路上に対向船ないし速度の小さい船舶が存在する場合、何ら

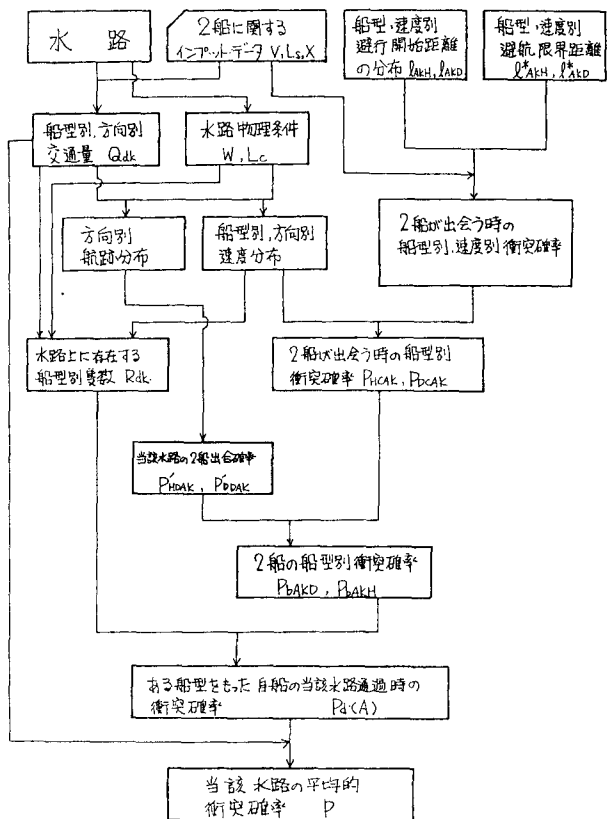


図-2 任意水路における衝突確率推定のプロセスフロー

かの避航を行わなければ衝突を招く。また、避航のための処置をとっても、その処置が遅きに失すれば衝突に至る。今、船舶もその船幅 B_{SA} を直径とする円で表わし、これを衝突直径と考える。この衝突直径を進行方向に掃引した領域に、同じく円で表わした他船が存在することも船舶の「出会い」と定義すると、着目している船型 k_A の船舶が航路を航行中に船型 k_K の船舶と「出会い」の状態となる確率は、航路を航行する船型 k_K の船舶の隻数とその位置、及び着目船の航行位置に依存している。一方、「出会い」状態の2船が避航に失敗する確率は、避航動作開始時の2船の相対的な位置関係(2船間の距離)と両船の運動性能に依存する。本研究では、船型別の船舶特性と交通特性ならびに航路の物理的条件から2船の「出会い確率」を求め、次に確率的に表現された避航開始時期のばらつきと船型別の船舶特性から2船の「出会い時の衝突確率」を得る。そして、この両者の積として計算される船型別衝突確率の全船型にわたる総和を取ることにより、「水路の衝突危険度」を推定しようとするものである。この推定フローを図示したものが図-2である。

3-1 水路における2船の出会い確率

先に述べた2船の「出会い」を、図-1に示す水路幅方向の座標 x と船幅 B_k 、あるいは $B_s = (\frac{3}{20}) \cdot L_s$ の関係により船舶長 L_s とで表現すると次式となる。

$$|x_A - x_K| < \frac{1}{2}(B_{SA} + B_{SK}) = \frac{3}{20} \cdot (L_{SA} + L_{SK}) = D_{AK} \quad (5)$$

但し、添字 A, K は着目した船の船型である。水路幅を W とすると、通行位置分布の平均値は、

$$x_1 = W \cdot (\frac{1}{2} - a) \quad , \quad x_2 = W \cdot (\frac{1}{2} + a) \quad (6)$$

であるから、方向別通行位置分布 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ はそれぞれ独立に $N(W(\frac{1}{2}-a), \sigma_P^2)$ 、 $N(W(\frac{1}{2}+a), \sigma_P^2)$ に従う。いま、方向2へ進む船型 A の船舶が $x = x'$ にいるとき、方向1へ進む船型 K の船舶(即ち、反船舶)の出会い確率 $P_{D,AK}$ は、

$$P_{D,AK} = \int_0^W P_2(x') \int_{x'-D_{AK}}^{x'+D_{AK}} P_1(x) dx dx' \quad (7)$$

と表わされる。(7)は $Prob(|x_A - x_K| < D_{AK})$ であるが、 x_A, x_K の分布は上述の正規分布に1に拘束されているため、結局、

$$P_{D,AK} = \int_{-D_{AK}}^{D_{AK}} N(2aW, \sigma_P^2 + \sigma_P^2) \cdot d(x_A - x_K) \quad (8)$$

となり、これに対航する2船の船型別出会い確率である。一方、同方向 d に進む2船(即ち、同航船)の出会い確率 $P_{O,AK}$ も同様に求まり、

$$P_{O,AK} = \int_{-D_{AK}}^{D_{AK}} N(0, \sqrt{2} \sigma_P^2) \cdot d(x_A - x_K) \quad (9)$$

となる。式(8)、(9)は、船型 A の船舶が航路上のどこにいても船型 K の船舶と出会う平均的確率を表わす式である。

3-2 出会い時の衝突確率

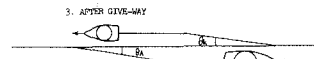
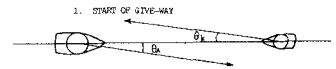
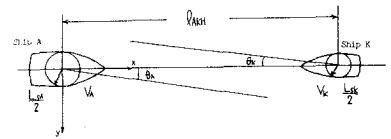


図-3 行き違い船舶の避航動態

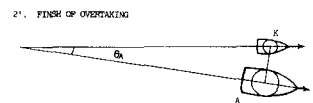
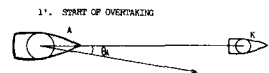
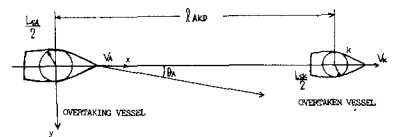


図-4 追い越し船舶の避航動態

簡略した航路上での個々の船舶の航行動態は非常に複雑であるため、次のような簡単化のための仮定を置く。

〈仮定1〉 各船舶は避航時を除き、各々独立に航行しているものとする。

〈仮定2〉 避航を行なうにあたっては、機関は操作せず航航のみによるものとする。すなわち、この時の航跡を近似的に直線で表現し、航角は一定であるとする。

〈仮定3〉 対航船も避航する際には、両船同時に避航を開始するものとする。

〈仮定4〉 避航中の第3船の存在は考慮しないものとする。

図-3、図-4に一連の避航動態を示す。行き合関係においては両船同時に避航動作に入り、両船がすれ違うところで避航終了と定義する。追いつき関係においては後方の船舶のみが航航して避航を行ない、両船が衝突直径外に離れたところで避航終了と定義する。

最初に、船型別・速度別避航限界距離 L_{AK}^* を求める。図-3の座標系で L_{AKH} 離れた船型 A, K 、船速 V_A, V_K (m/min) の2船が行き合う場合、避航開始から時間 t が経過した後の両船の距離 $\overline{AK}(t)$ は次のように表わされる。

$$\overline{AK}(t)^2 = t^2 \{ V_A^2 + V_K^2 + 2 V_A V_K \cos(\theta_A - \theta_K) \} - 2 L_{AKH} \cdot t \cdot (V_A \cos \theta_A + V_K \cos \theta_K) + L_{AKH}^2 \quad (10)$$

$\overline{AK}(t)$ は常に D_{AK} より大きくなければならぬから、 $\overline{AK}(t)$ の最小値が D_{AK} に等しい時の L_{AKH} を避航限界距離 L_{AKH}^* とすると、

$$L_{AKH}^* = D_{AK} \sqrt{V_A^2 + V_K^2 + 2 V_A V_K \cos(\theta_A - \theta_K)} / (V_A \sin \theta_A + V_K \sin \theta_K) \quad (11)$$

となる。図-4で示される追いつき関係の場合の避航限界距離 L_{AKD}^* も同様にして得られる。

$$L_{AKD}^* = D_{AK} \sqrt{V_A^2 + V_K^2 - 2 V_A V_K \cos \theta_A} / V_A \sin \theta_A \quad (12)$$

次に、船型別・速度別避航開始距離 L_{AK} の分布について述べる。本研究ではこの分布を正規分布と考え、実態調査結果から得られた以下の関係式によりその平均値と分散を規定する。行き合関係、追いつき関係に於いてそれぞれ、

$$\bar{L}_{AKH} = -931.4 + 4.59 (V_A + V_K) \quad , \quad \sigma_{EH}^2 = 437 \quad (13)$$

$$\bar{L}_{AKD} = 326 - 139 X_A + 344 X_K \quad , \quad \sigma_{ED}^2 = 102 \quad (14)$$

である。ここに X_A, X_K は船舶総トン数である。

避航開始距離 L_{AKH}, L_{AKD} から避航限界距離 L_{AKH}^*, L_{AKD}^* より小さい時に衝突が起こるとすると、出会い時における2船の船種別・速度別衝突確率 P_{CAK}, P_{DAK} は次のように表現される。

$$P_{CAK} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{L_{AKH}^*} N(\bar{L}_{AKH}, \sigma_{EH}^2) \cdot N(\mu_{VK}, \sigma_{VK}^2) \cdot N(\mu_{VA}, \sigma_{VA}^2) \cdot dL_{AKH} \cdot dV_K \cdot dV_A \quad (15)$$

$$P_{DAK} = \int_0^{\infty} \int_0^{V_{AKD}} \int_0^{L_{AKD}^*} N(\bar{L}_{AKD}, \sigma_{ED}^2) \cdot N(\mu_{VK}, \sigma_{VK}^2) \cdot N(\mu_{VA}, \sigma_{VA}^2) \cdot dL_{AKD} \cdot dV_K \cdot dV_A \quad (16)$$

3-3. 水路の衝突危険度

行き合いあるいは追いつき関係にある2船が出会い、そこから避航に失敗する確率 $P_{BH}(A, K | A_C), P_{BD}(A, K | A_C)$ は、

$$P_{BH}(A, K | A_C) = P_{DAK} \cdot P_{CAK} \quad (17)$$

$$P_{BD}(A, K | A_C) = P_{DAK} \cdot P_{DAK} \quad (18)$$

である。今、船型 A の着目船が水路を通過する間に避航すべき船型 $k(i)$ 、速度 $V_{k(i)} < V_A$ の同航船が N_{Ai} 隻、船型 $k(i)$ 、速度 $V_{k(i)} > V_A$ の同航船が N_{Ai}' 隻、船型 $k(j)$ の反航船が M_j 隻いる場合の着目船の平均的衝突確率 $P_d(A)$ は次のようにして求められる。

着目船が、船型 $k(i)$ の船と出会ふ際に船型 $k(i)$ の船舶と衝突せずにいる確率 $S_D(A_i)$ は、

$$S_D(A_i) = \prod_{i'} \left\{ 1 - P_{bD}(k(i'), A | A_i) \right\}^{N_{k(i')}} \quad (19)$$

である。出会つて衝突せずに水路を通過する確率 $S_D(A)$ は、

$$S_D(A) = \prod_i \left\{ 1 - P_{bD}(A, k(i)) \right\}^{N_{k(i)}} \quad (20)$$

であるから、

$$P_{bD}(A, k(i)) = P_{bD}(A, k(i) | A_i) \cdot S_D(A_i) \quad (21)$$

であるから

$$S_D(A) = \prod_i \left\{ 1 - P_{bD}(A, k(i) | A_i) \cdot S_D(A_i) \right\}^{N_{k(i)}} \quad (22)$$

と13。これに反航船と出会つて衝突せずに水路を通過し終える確率 $S_H(A)$

$$S_H(A) = \prod_j \left\{ 1 - P_{bH}(A, k(j)) \right\}^{M_j} \quad (23)$$

を乗じたものが同航船・反航船とも衝突せずに水路を通過し終える確率であるから、着目船の平均的衝突確率 $P_d(A)$ は、

$$P_d(A) = 1 - S_D(A) \cdot S_H(A) \quad (24)$$

また、避航すべき平均隻数 $N_{k(i)}$ 、 $N_{k(i)'}$ 、 M_j は各方向別交通量と全交通量 Q との比率 λ_d を用いて次式のように表わせる。

$$M_j = \frac{50 \cdot L_c \cdot Q \cdot (1 - \lambda_d) \cdot PP(k(j))}{3 \mu_{V_{k(j)}}} \quad (25)$$

$$N_{k(i)} = \int_0^{10} \int_0^{V_{k(i)} \cos \theta} \frac{50 \cdot L_c \cdot Q \cdot \lambda_d \cdot PP(k(i))}{3 V_{k(i)}} \cdot \left(1 - \frac{V_{k(i)}}{V_A} \right) \cdot N(\mu_{VA}, \sigma_{VA}^2) \cdot N(\mu_{V_k}, \sigma_{V_k}^2) \cdot dV_k dVA \quad (26)$$

$$N_{k(i')} = \int_0^{10} \int_0^{V_{k(i')} \cos \theta} \frac{50 \cdot L_c \cdot Q \cdot \lambda_d \cdot PP(k(i'))}{3 V_{k(i')}} \cdot \left(1 - \frac{V_{k(i')}}{V_A} \right) \cdot N(\mu_{VA}, \sigma_{VA}^2) \cdot N(\mu_{V_k}, \sigma_{V_k}^2) \cdot dV_k dVA \quad (27)$$

ここに、

$$PP(k(i)) = \int_{k(i)} \phi(\alpha) d\alpha \quad (28)$$

従つて、方向 d に航行する任意の船舶が水路を通過する時の平均衝突確率 P_d は、1 船あたり、

$$P_d = \sum_{i=1}^I P_d(A(i)) \cdot PP(A(i)) \quad (29)$$

これより、水路の平均衝突確率（水路の衝突危険度） P は次式で与えられる。

$$P = \lambda_d \cdot P_d + (1 - \lambda_d) \cdot P_{d2} \quad (30)$$

§4. モデルによる推計値と実績値との比較

前節で導いた船舶衝突率推計モデルからの程度の現象説明力をもつものと確かめるために、我が国沿岸の代表的狭水道である浦賀水道・明石海峡・備讃瀬戸・来島海峡を例にとり試算を行った。航路特性・交通特性は表-1に示したものをを用いた。なお、交通量は離峰時のものとし、漁船は除いてある。表-2に示した推計値と実績値の比較を行なうと、全て、推計値の方が実績値よりも全て小さい値となっている。これは(1)より低速(2)で述べた第3船への考慮と(3)についていないこと、(4)横切り航行も取り扱っていないこと、(5)操業中の漁船の影響を考慮していないこと、(6)3つの理由によるものと考えられる。(1)については試算で用いた範囲の交通量ではとして大きくなると思われる。(2)については横切り交通量の多い来島海峡・備讃瀬戸で乖離が大きく、横切り交通量が比較的少ない明石海峡や航路指定がなされている浦賀水道ではかなり近い値が得られている。(3)は、操業隻数の多い来島海峡・備讃瀬戸で影響を被っているものと考えられる。

以上のことから、本推計モデルは、横切り交通量ならびに漁船の操業と比較的少ない狭水路に対して適用性も有するといえる。

§5. 通行制限が水路の衝突危険度に与える影響

水路の衝突危険度は航路特性と交通特性の両者により規定されることは先に述べた。ここでは、通行制限と課することによる交通特性の変化が衝突危険度に及ぼす影響を、各特性に対応するモデルの変数とパラメトリックに動かすことにより考察する。考察の対象とする通行制限は、(1)総交通量制限、(2)速度制限、(3)船型制限、の3つである。航路特性・交通特性のうち、通行制限の対象となる以外のものについては、代表的な値をいくつか選り、それらの組み合わせのもとで通行制限が衝突危険度に及ぼす影響を見た。種々の組み合わせのもとでの衝突

表-1 試算狭水路の航路特性値

	Lc (km)	W (M)	Q (隻/時)	$\mu(\text{LogL})$	$\sigma(\text{LogL})$
明石海峡	18	3500	60	1.25	0.21
来島海峡	28	1500	45	1.55	0.15
備讃瀬戸	36	1400	64	1.55	0.15
浦賀水道	13	1500	42	1.65	0.24

表-2 推計値と実績値との比較

	推計値	実績値
明石海峡	0.344×10^{-4}	0.70×10^{-4}
来島海峡	0.165×10^{-5}	0.12×10^{-4}
備讃瀬戸	0.206×10^{-5}	0.13×10^{-4}
浦賀水道	0.132×10^{-4}	0.22×10^{-4}

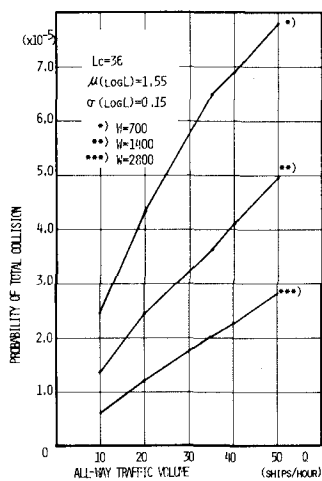


図-5 交通量制限と水路の衝突確率

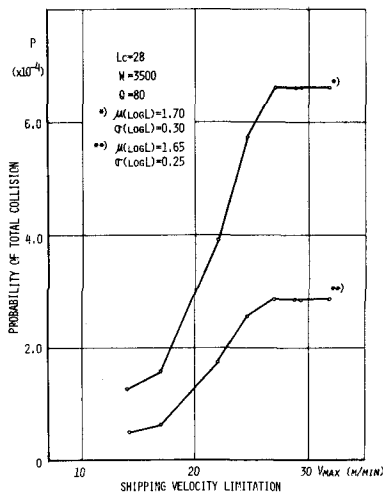


図-6 速度制限と水路の衝突確率

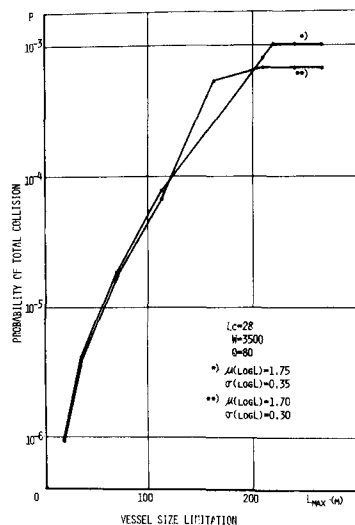


図-7 船型制限と水路の衝突確率

危険度はそれぞれ異なる値を示すが、通行制限が及ぼす影響に関してはどれも同じ傾向をとるため、そのうちの数例を図-5～図-7に示す。

総交通量制限は船型構成分布が一定であるとの条件のもと検討した。総交通量も水路の衝突危険度はほぼ線形関係にあり、総交通量が減少するにつれて衝突危険度も低くなる。(図-5)

速度制限に関しては、船型ランクごとの船の平均速度 μ_{vi} を制限速度にとり、これについて計算を行った。その際、制限速度以上の平均速度を有する船型ランクに属する船舶は、上限となるランクごとの船舶の平均速度 μ_{vi} 及び速度の標準偏差 σ_{vi} に従って通行するものとした。図-6にその結果を示す。設定する最高速度を小さくするにつれて衝突危険度は低くなるが、制限のない状態からある範囲までは最高速度も下げても衝突危険度はほとんど変化しない。これは、大きな船速を有する船舶が一般に大型船であり、航路内に存在する確率が低いことに起因している。

船型制限についても船型ランクごとの制限効果を検討した。船型ランク*i*に対応する船型 L_i を最大船型とし、それ以上の船型ランクに属する船舶の交通量を0とした。ただし、この方法では船型構成の変化に伴ない総交通量 Q まで変化するために、船型構成のみ通行制限下のものを用い、総交通量 Q は制限を課す以前の値によって計算・比較を行なって、総交通量の変化にもとづく影響を排除した。図-7にその結果を示すが、これも他と同様に、最大船型を小さくするにつれて衝突危険度は小さくなる。

以上、検討したものの通行制限に関して、通行制限は衝突危険度を低減させる方向に働くことがわかった。これは、一般的の常識とも一致し、これまでも徐々になされてきた通行制限に対して妥当性を与えるものとなる。

§6. 結 言

交通計画を策定する場合には、現象解析面と受けもつ交通流理論に数えられるところも大きい。道路交通理論は発展をとげてきたが、船舶交通に対する交通流理論はまだない。本研究は、船舶の挙動と確率的に扱った運動学的モデルを作成することにより船舶交通流理論の端緒を開こうとしたのに同航時の衝突確率に関する修正を行ない、修正したモデルを用いて船舶通行制限に対する衝突危険度の検討を行ったものである。結果として、§5で述べた傾向が得られたが、この傾向はその方法論の性質から、原理的には全ての水域について当てはまるべきものである。航路計画は安全性の見地のみから計画決定がなされるべきものであるが、本研究で得られた結果は、航路の運用計画を策定する際に有用な基礎情報となろう。

(参考文献)

- 1) 藤井弥平：序説海上交通工学 PP.147～152, 海文堂, 1971
- 2) 塩原礼次郎：海難の要因について, 日本航海学会誌 No.37, PP.181～187, 1967
- 3) 前掲1), PP.148～149
- 4) 前掲1), PP.154～153
- 5) 原潔：船の衝突確率と注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) 河野, 黒田, 長尾：海上交通事故分析の確率統計理論による基礎的研究, 土木学会第35回年報発表資料第9部
- 7) 前掲1), PP.88～90 L, 1980
- 8) 運輸省第三港湾建設局：海上交通計画調査報告書, 1972.3
- 9) 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
- 10) 井上欣三：直線航路における航路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.56
- 11) 前掲8) L PP.103～105, 1977