

航路横断橋に対する船舶衝突危険度の推定*

Estimation of Ship-Bridge Collision Risk

黒田 勝彦**, 喜多 秀行***

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

連絡橋や湾岸道路の建設にともない航路横断橋は年々増加の傾向にある。航路横断橋の計画策定にあたり、航路利用者は操船の容易さからできるかぎり航路幅の広い計画代替案を望むが、建設技術や費用面などの要請から施設提供者は逆に中央径間がなるべく短い計画代替案を指向する場合もあり、合意に至り難いことも少なくない。ひとたび船舶の横断橋への衝突が生じれば、それがもたらす損害は計り知れないものとなるため、事故防止は操船する立場のみならず航路や橋梁を計画・設計する立場からも考えられなければならない。そこで、本研究では航路横断橋への船舶衝突をとり上げ、航路や橋梁、および交通流などに関するさまざまな特性を説明変数として含む衝突確率推定モデルを構築し、船舶衝突危険度を考慮した航路・橋梁計画の基礎とすべき方法論を提案しようとするものである。説明変数は表1のうちの操作可能変数であるが、その詳細については筆者らの以前の研究¹⁾を参照されたい。

表1 橋脚への衝突に影響を及ぼす要因

(2) 乗り揚げならびに海洋構造物との衝突に関する従来の研究

乗り揚げあるいは橋脚やオイル・プラットフォームといった海洋構造物との船舶の衝突を論じた研究は、以下の3つのアプローチに大別される。

その1つは、既往の事故統計の要因分析を行なったものである。久々宮²⁾は海難審判庁裁決録から事故に関与していた要因を抽出し、因子分析法を用いて解析している。また、Rabien³⁾はタンカーの、Drager et al.⁴⁾はノルウェーにおける内航船の事故統計から、それぞれFault Treeの作成を試みている。

第2のアプローチは、一定期間の乗り揚げ、衝突件数を、ある水路特性と関連づけて整理した原単位法とでも言うべきものである。Goodwin & Kemp⁵⁾は、北海南部水域における年間平均乗り揚げ件数と水深4 m以下の浅瀬の延べ幅員との関係に着目し、年間期待乗り揚げ件数を求めている。また、Fujii⁶⁾は、何ら避航することがない場合に想定される乗り揚げ件数と実績値との比を乗り揚げ確率として求めた。一方、Macduff⁷⁾は、水路内船舶が操船不能となり障害物との衝突に至る確率を与えるモデルを作成しており、この流れをくむものにRashad⁸⁾やLarsen⁹⁾がある。

以上のアプローチが衝突・乗り揚げ確率そのものを求めようとするものであったのに対し、井上¹⁰⁾は、航路内航行船舶の航行位置分布を交通量や航路幅員と関連づけて整理し、この分布が航路外へはみ出す確率と乗り揚げの潜在確率から、乗り揚げ事故危険度に応じた航路幅員を求める方法論を提案している。

第1のアプローチで検討される要因の大部分は操船者に関するものであるため、航路計画に直接結びつく性格のものとは言えない。また、第2、第3のアプローチにおいても、操船面で無視し得ない避航動作が何ら考慮されておらず、実績値から求められた補正値の意味を有する諸確率も理論的裏づけに欠けることが指摘される。そこで、本研究では、避航動作に着目した船舶航行挙動モデルを作成し、航路・橋梁計画諸元と衝突確率との関連づけを試みる。

操作可能要因		操作不可能要因	
水	1 航路幅	船	1 船型
	2 航路長		2 速度性能
	3 屈曲状態		3 操舵性能
	4 航路標識		4 停止性能
橋	5 航路標識状態	注	5 レーダー装置
	6 スパン長		6 潮流
	7 橋脚直径		7 波浪
	8 標識帯幅		8 視界
交	1 船型分布	特	1 風向
	2 速度分布		2 風速
	3 船交通量		3 天候
	4 方位角分布		4 時刻
通	5 横断交通量	性	
	6 航路分布		
	7 到着分布		
	8 避航開始距離分布		

* 確率モデル、航路計画、航路横断橋、船舶衝突危険度、交通管制

** Katsuhiko KURODA, 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

*** Hideyuki KITA, 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

2. 船舶交通流の統計的特性

(1) 概 説

衝突件数を解析するためには、時空間上における船舶や障害物相互の位置関係の記述、すなわち、相対挙動を記述することが必要である。この相対挙動は、ある時間断面における船舶それぞれの位置、移動方向、移動速度の3要素により規定され、船舶交通流全体に関するこれらの挙動は交通特性として整理されている。ところで、船舶の航行挙動は操船者の意思決定の1つの結果とみなすことができ、それゆえ操船者の資質や船舶特性、交通特性、水路特性、自然条件などとも密接な関係があるのに加えて、意思決定における認識、予測、判断の各段階に存在する多くの不確実性に起因するばらつきを本質的に有している。認識に係るばらつきとして、例えば自船と対象物(障害物、相手船)との距離や方向の測定誤差、応答遅れに伴う蛇行などを、予測に係るばらつきとして、将来の相対位置、相手船の避航行動などを、判断に係るばらつきとして、ある状況を危険と感じるか否かなどを挙げることができよう。以上より、ばらつきをもつ一連の意思決定の結果もたらされる衝突現象は確率事象として取り扱われるべきであり、これを解析するための交通諸特性は確率分布として記述されるべきと考える。ここでは、既に確率分布の形に整理されている交通特性のうち、本研究で用いるものを示すとともに、新たに避航開始距離と方位角の分布を提案し、分布形を同定する。

(2) 船型構成分布と航行位置分布

藤井¹¹⁾は、我が国の主要狭水道における観測結果をもとに、船型を垂線間長の常用対数 ω で表わした場合の船型構成分布が、正規分布、

$$\phi_{\omega}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\omega}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega - \mu_{\omega}}{\sigma_{\omega}} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

とよい一致を見せることを示している。平均値 μ_{ω} と標準偏差 σ_{ω} は、水路により異なる値をとる。

一方、井上¹²⁾は、船舶の水路幅方向の航行位置の分布に着目し、この航行位置分布 $\phi_x(x)$ が正規分布、

$$\phi_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表現できることを明らかにした。その平均値 μ_x は1方向航路では航路中央となり、2方向航路では中央分離表示の有無を表わすパラメータと、航路幅 B の関数として規定される。標準偏差 σ_x についても航路幅 B と L 換算交通量(垂線間長の比で重みづけられた交通量) Q_L を説明変数とする観測式を示している。

(3) 避航開始距離分布

航路横断橋などの海洋構造物への衝突を解析するには、操船者が衝突の危険を感じてから避航動作をとり、障害物を回避したのち安全に通過するという一連の挙動を考える必要がある。ここでは、避航挙動を定量的にとらえるため、橋脚にどの程度近づいてから避航動作をとりはじめるかという「避航開始距離」に着目する。

避航開始距離は、自船と避航対象との相対的位置関係の測定誤差と将来予測のばらつき、および「危険な状態」なる概念のばらつきが「危険になった」と認識する時機をばらつかせ、さらに、他船に対する避航など当該避航対象に対する避航が望んだ時機にできない場合があることなどにより、かなりのばらつきが見られるため、分布形をなした交通特性と考えるのが妥当であろう。この概念は、筆者ら¹³⁾が船舶相互の避航に関するものを用いてはいるものの、固定された構造物に対する避航に関しては、わずかに山口他¹⁴⁾による避航開始距離ならびに離隔距離の観測結果が報告されているにすぎず、これとても統計的処理に耐えうるサンプル数が提示されているわけではない。そこで、橋脚に対する避航開始距離の分布形を求めるため、実態観測を実施した。

観測場所は山口県の大島瀬戸であり、ここにかかる大島大橋の下を航行する船舶の航跡を2基のレーダーで観測した。観測期間は昭和57年10月4日～6日の72時間であり、観測結果のうち約200隻の船舶の避航開始距離を集計した。その結果を対数正規確率紙上にプロットしたものが図1である。これより、本観測データに基づく避航開始距離の分布はほぼ対数正規分布に従い、その平均値は6.15、標準偏差は0.59であることがわかった。

大島瀬戸以外の航路横断橋が設置されている水路で同様の調査・解析を行えば、さらに、平均値や標準偏差といったパラメータを橋脚間隔や水路形状と関係づけることが可能となろうが、我が国には適切な場所がほとんどないため、これ

は今後の研究に期待し、本研究では避航開始距離 l の分布 $f_l(l)$ は次式のような対数正規分布に従うものとする。

$$f_l(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} l \sigma_l} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log l - \mu_l}{\sigma_l} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

(4) 方位角分布

直線状航路における乗り揚げあるいは障害物との衝突を論じた従来の研究^{5),6)}の多くには、すべての船舶が航路に平行に航行しているという仮定が置かれていた。しかし、実際にはすべての船舶の航跡が常に航路に平行であるということではなく、進行方向にはばらつきが見られる。これは、自船の船位測定誤差、波や潮流、風によるドリフト、応答遅れによる蛇行運動(周期的ヨーイング)、他船や障害物に対する避航、ならびにこれらの原因によりはずれたコースラインに戻るための操船などに起因するものである。そして、操船行動は、「自船が水路内のどの位置を航行しているか」という情報だけでなく、「どのような方向に航行しており、進路は安全な水域内にあるか」という情報の両方を判断材料として決定されと考えられる。したがって、船舶の進行方向も水路幅方向の航行位置と同様に重要な交通特性となりうる。以後、ある地点における船舶の進行方向と航路中央線とのなす角を「方位角」と呼び、ある地点を通る多数の船舶の方位角のばらつきを「方位角分布」と名付ける。航路航行船舶の方位角分布は本研究で初めて導入される新たな概念であり、既往の報告もないため、浦賀水道船舶航行実態観測調査データを用いて解析を行なった。図2に示す浦賀水道航路を、屈曲の影響を考慮してX軸方向に大きく3分割し(A~C)、各区間をさらに6分割した(①~⑥)。当航路は中央分離線が表示された2方向航路であるため、Y軸方向には片側10区間、合わせて20区間に分割した。こうして分割した片側180、合計360のメッシュ上における船舶の方位角を読み取り、正規確率紙上にプロットしたところ、ほぼ正規分布に従うとみなせる結果を得た。そのうちの数例を図3に示す。

また、分布の平均値と標準偏差が航路方向および航路幅方向でどのように異なるかを見るため、航路屈曲の影響が小さいと思われるBの区間について、メッシュごとの平均値と標準偏差を図4、図5にまとめた。これを見ると、航路側端部では、航行する船舶が少なく標本数も少ないため、平均値と標準偏差の値はばらつくものの、標本数の多い航路中央部では、平均値、標準偏差ともに航路方向にも航路幅方向にもほぼ一定値をとる。これより、一様な直線航路においては、方位角分布は航路のどの部分でもほぼ同じ平均値と標準偏差を持つ正規分布

$$\phi_\varphi(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\varphi} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi - \mu_\varphi}{\sigma_\varphi} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

に従うとの結論を得た。ここに、平均値 μ_φ はおおむね航路方向に一致し、標準偏差 σ_φ は約 4° である。ある方位角 φ で航行している船舶が、航路端にある程度まで近づいた時点で $-\varphi$ の方位角に逆針して航路中央部に向かうものと推測すれば、 $\mu_\varphi = 0^\circ$ は予想と一致する結果と言えよう。

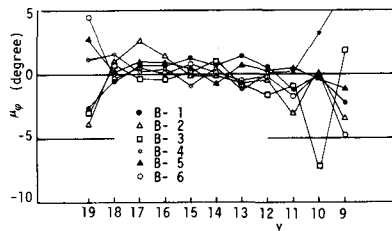


図4 方位角の平均値

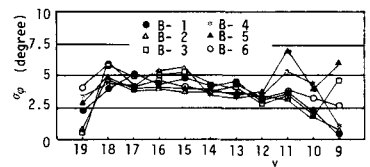


図5 方位角の標準偏差

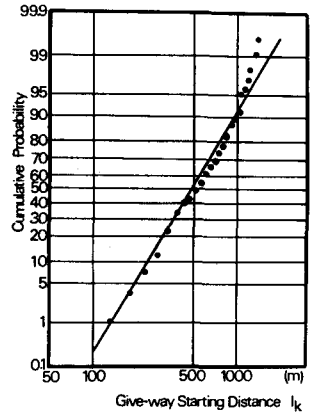


図1 避航開始距離分布

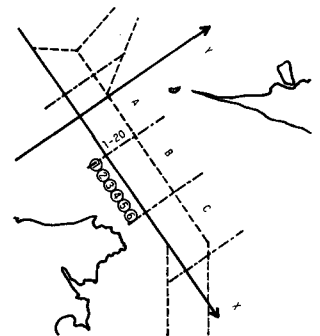


図2 浦賀水道航路と解析のための区間分割

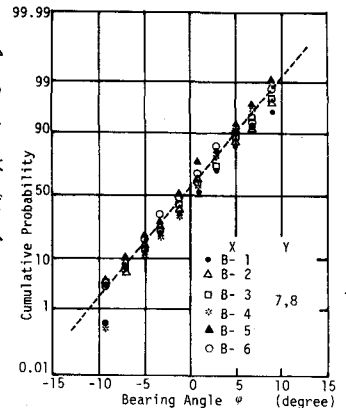


図3 方位角分布

3. 橋脚に対する船舶衝突確率推定モデル

(1) 対象水路と推定プロセス

解析の対象とする水路の概要を図6に示す。水路には、幅 W の屈曲のない2方向水路が設定され、航行に支障をきたすことのない十分な水深を有しているものとする。横断橋は航路に直角に架設され、航路側端から一定幅の緩衝帯を隔てて直径 D の橋脚が設置されている。水路内には障害物はないものとする。この航路上を交通量が Q 、方向別交通量が λ 、船型構成分布の平均値と標準偏差がそれぞれ μ_w, σ_w である船舶交通流が航行する。

船舶は任意の方向に直進し、避航は一定の変針角 θ の変針によってのみ行なうものと仮定する。また、簡単のため、船舶をその幅 B を直径とする円で表現し、この円の中心の位置を船舶の位置とみなす。

以上の如き前提のもとで、本モデルでは、衝突に至るプロセスを「船舶と橋脚との出会い」と「橋脚への避航失敗」という2段階に分けてとらえる。すなわち、操船者は自船の進路上に危険があるか否かを判断しつつ航行している。そして、自船の位置とその方向から、橋脚との衝突に対して危険な状態であると認識した場合に避航操船を行なうのであるが、この時、既に回避できないほど橋脚に近づきすぎていれば、衝突に至ると考えようとするものである。そこで、まず危険な状態としての「出会い」を規定する。次に、橋脚を回避しうるか否かを判定する基準として「限界避航開始距離」なる概念を導入し、これを船舶特性と航路特性から求める。そして、この限界避航開始距離と2で述べた避航開始距離分布から避航失敗確率を導き、先の「出会い」の状態となる確率と合わせて基本衝突確率を求める。これは、ある船型の船舶がこの航路を航行する際、橋脚に衝突する確率を意味するものであり、これをもとに、ある一定期間内の衝突事故発生確率と期待事故件数が得られる。以上の推定プロセスをフローチャートで示したものが図7である。

(2) 衝突と出会いの定義

先に、船舶を円で表現した。この円が橋脚と一部でも重なる状態を「衝突」と定義する。また、避航することなくそのまま直進すれば衝突に至るような位置に船舶がいることを「出会い」と定義すると、以下のように表現される。図6に示した如く座標軸を定め、位置 (X_0, Y_0) について Y 軸に対し φ の方向を向いている幅 B_k の船舶について考えると、この船舶が進行方向右側の橋脚の内側に接する場合の方位角 φ_k^{r*} 、左側橋脚の内側に接する場合の方位角を φ_k^{l*} として、

$$\begin{aligned} \varphi \geq \varphi_k^{r*} &= -\tan^{-1} \frac{(X_0 - \frac{L}{2})}{Y_0} - \sin^{-1} \frac{D_{ek}}{\sqrt{Y_0^2 + (X_0 - \frac{L}{2})^2}} \\ \varphi \leq \varphi_k^{l*} &= -\tan^{-1} \frac{(X_0 + \frac{L}{2})}{Y_0} - \sin^{-1} \frac{D_{ek}}{\sqrt{Y_0^2 + (X_0 + \frac{L}{2})^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

のとき、右側橋脚ないしは左側橋脚にそれぞれ出会いの状態にある。

(3) 限界避航開始距離

まず、進行方向右側の橋脚に対する限界避航開始距離 L_k^* を導く。図8の如く、 $t=0$ に点 (X_0, Y_0) 上で方位角 φ の方向を向いて右側橋脚に出会っている船型 k 、速度 V_k の船舶を考える。

この船舶が時刻 t_s に避航を開始したとし、変針角を θ (< 0)、避航後の速度変化がないものとする、避航後の位置は、

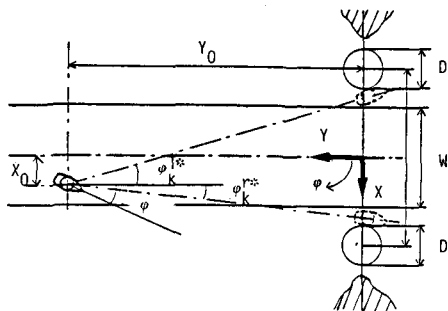


図6 対象水路と橋脚に対する出会い

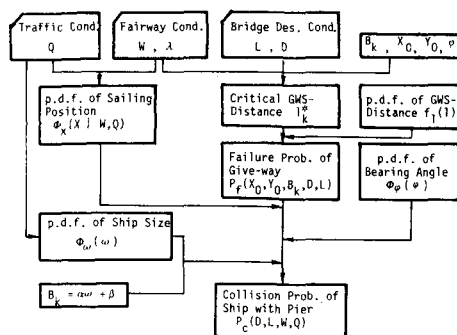


図7 モデルにおける推定プロセス

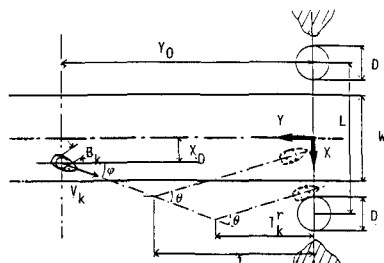


図8 避航動作と限界避航開始距離

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0 + V_k t_s \sin \varphi - V_k(t-t_s) \sin(\theta_r - \varphi) \\ Y(t) &= Y_0 - V_k t_s \cos \varphi - V_k(t-t_s) \cos(\theta_r - \varphi) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、船舶中心と右側橋脚中心との距離の極小値 d_r^* は、次式のように表わされる。

$$d_r^* = Y_0 \sin(\theta_r - \varphi) - (X_0 - \frac{L}{2}) \cos(\theta_r - \varphi) - V_k t_s \sin \theta_r \quad \dots\dots\dots (7)$$

$D_{ck} = (B_k + D)/2$ とすると、 $d_r^* \leq D_{ck}$ の場合が衝突を意味するため、 d_r^* が D_{ck} に等しいとおくことにより、これより遅い時機に避航を開始しても橋脚を回避しきれないという限界避航開始時機 t_s^* が求まる。この t_s^* を(6)式に代入すると、限界避航距離 l_k^{r*} は次式で与えられる。

$$l_k^{r*} = (\sin \varphi + \cot \theta_r \cos \varphi) \{ Y_0 \sin \varphi + (X_0 - \frac{L}{2}) \cos \varphi \} + D_{ck} \operatorname{cosec} \theta_r \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (8)$$

左側橋脚に出合う場合、避航後の船舶の時刻 t における位置 $(X(t), Y(t))$ は、式(6)において $\theta_r = -\theta_l$ とし、橋脚の位置を $(-\frac{L}{2}, 0)$ としたものとするため、進行方向左側の橋脚に対する限界避航開始距離 l_k^{l*} も同様の過程を経て、次式の如く与えられる。

$$l_k^{l*} = (\sin \varphi - \cot \theta_l \cos \varphi) \{ Y_0 \sin \varphi + (X_0 + \frac{L}{2}) \cos \varphi \} + D_{ck} \operatorname{cosec} \theta_l \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (9)$$

(4) 避航失敗確率と基本衝突確率

本研究では、船舶が橋脚に近づきすぎた場合、すなわち、船型 K の船舶の避航開始距離 l が限界避航開始距離 l_k^* より短い場合に衝突に至ると考えることは先に述べた。したがって、出会いの状態にある船舶が橋脚に対する避航に失敗する確率は、 l が l_k^* より短い確率である。ここで l は(3)式で示した対数正規分布に従うことが明らかとなっているため、避航失敗確率 P_{fk} は、位置 (X_0, Y_0) と方位角 φ 、船幅 B_k 、橋脚直径 D 、スパン長 L の関数として、次式の如く導かれる。

$$P_{fk}(X_0, Y_0, \varphi, B_k, D, L) = \begin{cases} Prob. [l \leq l_k^{r*}] = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^{r*}/\sqrt{2})] & \text{for } \varphi |_{X_0, Y_0} \geq \varphi_k^{r*}(X_0, Y_0) \\ Prob. [l \leq l_k^{l*}] = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^{l*}/\sqrt{2})] & \text{for } \varphi |_{X_0, Y_0} \leq \varphi_k^{l*}(X_0, Y_0) \\ 0 & \text{for others} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$I_{ck}^{r*} = \frac{\log l_k^{r*} - \mu_l}{\sigma_l}, \quad I_{ck}^{l*} = \frac{\log l_k^{l*} - \mu_l}{\sigma_l}, \quad \operatorname{erf}(\xi) = \int_0^\xi \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} du$$

である。 P_{fk} は、位置 (X_0, Y_0) で方位角 φ をもって航行している船型 K の着目船が式(5)に示した出会いの条件下にあるときに、橋脚に対する避航を失敗する確率を与えることになる。

衝突は、船舶が橋脚と出会いかつ避航に失敗する場合に生起するのであるから、任意の位置を任意の方向に航行している船型 k の着目船が橋脚と衝突する確率を船型別基本衝突確率 P_{eck} と名付け、 Y_0 として航行船舶が避航を開始しはじめる点を選ぶと、 P_{eck} は(2)式の航行位置分布 $\phi_k(x)$ 、(4)式の方位角分布 $\phi_\varphi(\varphi)$ 、および避航失敗確率 P_{fk} を用いて、すべての水路幅方向航行位置と方位角に関する期待値をとることにより、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P_{eck}(Y_0, B_k, D, L, W, Q) &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \phi_k^{l*} \{ 1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^{l*}/\sqrt{2}) \} \phi_\varphi(\varphi) d\varphi \\ &\quad + \int_{\phi_k^{r*}}^{\pi/2} \{ 1 + \operatorname{erf}(I_{ck}^{r*}/\sqrt{2}) \} \phi_\varphi(\varphi) d\varphi \cdot \phi_k(X|W, Q) dx \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

P_{eck} が B_k, D, L だけでなく、 W, Q の関数ともなっているのは、航行位置分布 $\phi_k(x)$ が W, Q に依存するためである。

(5) 橋脚への船舶衝突危険度と期待事故件数

ここまででは、ある船型 k の船舶1隻が橋脚に衝突する確率を論じてきた。次に上述の議論から導かれた船型別基本衝突確率 P_{eck} を基に、ある一定期間に期待される橋脚への衝突事故件数を求める。

藤井¹⁵⁾によると、船舶 B_k の常用対数と垂線間長の常用対数 ω_k とは線形関係で対応づけられる。したがって、船幅 B_k の関数である基本衝突確率 P_{eck} は、すなわち ω_k の関数でもある。単位時間あたり交通量が Q 、方向別交通量が λ である水路における船型別単位時間あたり交通量 Q_k は(1)式より、

$$Q_k = \lambda \cdot Q \cdot \phi_{\omega}(\omega_k) d\omega_k \quad \dots\dots\dots (12)$$

で与えられる。この Q_k 隻のうち N_k 隻が橋脚に衝突する確率 $P(N_k)$ は、船型別基本衝突確率 P_{eck} を用いて、

$$P(N_k) = \binom{Q_k}{N_k} (1 - P_{eck})^{Q_k - N_k} \cdot P_{eck}^{N_k} \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。これより、船型 k の船舶の期待衝突隻数 $\bar{N}_{ck}$ は、

$$\bar{N}_{ck} = P_{eck} \cdot Q_k \quad \dots\dots\dots (14)$$

と表わされる。 Q_k は(12)式の如く与えられているため、交通量 Q のうち橋脚に衝突する船舶の期待隻数 $\bar{N}_c$ は(11)式を船型に関して積分することにより、

$$\bar{N}_c = Q \int_0^{\infty} P_{eck} \cdot \phi_{\omega}(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (15)$$

として求められる。

4. 数値計算と結果に対する考察

提案したモデルの妥当性を検討し、またモデルに組み込まれた要因が期待事故件数に及ぼす影響を定量的に把握するため、数値計算を行なった。避航時の変針角は 30° とし、航路幅1000 m、船型構成分布のパラメータ μ_{ω} 、 σ_{ω} がそれぞれ1.40、0.15である航路にスパン長1200 m、橋脚直径25mの横断橋が架設されている場合を想定した。1隻あたりの基本衝突確率として、交通量が毎時40隻のとき 5.7×10^{-7} 、毎時30隻のとき 2.2×10^{-7} を得た。橋脚と船舶の衝突事故件数を交通量と関連づけて整理した統計は筆者らの知る限りではとられていないため、我が国主要狭水道における1トリップあたりの平均的な乗り揚げ確率実績値 1.5×10^{-5} と比較すると、上記計算値は乗り揚げ確率実績値の約1/25～1/70に相当する。この数値はかなり小さいようにも感じられるが、狭水道を航行することがさほど非日常的ではないのに対し、横断橋下の通行はかなり特殊な状況であるため、相当の注意を払って航行しているであろうことを考えると、一概に小さいとも言えない。また、この値を年間期待事故件数に換算すると、それぞれ0.20件、0.06件となり、5年から18年に1度事故が発生するという常識からさほど遠くない数字が得られる。以上のことから、推定プロセスの各段階でかなりの簡単化がなされているモデルではあるが、一応の妥当性を有すると言うことができよう。

次に、操作可能要因が期待衝突件数に及ぼす影響の解析結果を示す。

図9における実線は、スパン長 L の変更に伴う年間期待衝突件数 $\bar{N}_c$ の変化を示すものである。筆者らのこれまでの研究¹³⁾によれば、船舶相互の衝突は航路幅が変わらない限り一定であるが(図中破線)、 $\bar{N}_c$ は L が増加することによりかなり急激に減少することがわかる。これは、航路幅 W が一定のまま L が増加すれば緩衝帯幅が広がることとなるため、これに起因する効果である。この結果を見る限りでは、片側90 m(交通量毎時20隻)、ないしは140 m(同40隻)

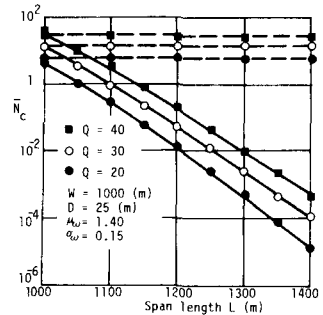


図9 スパン長と年間期待衝突件数

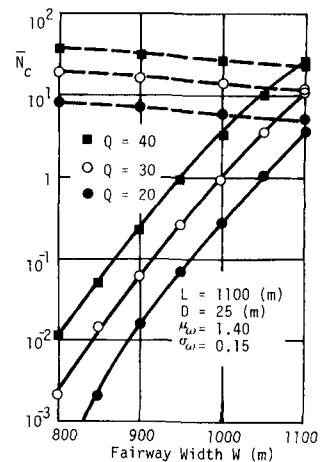


図10 航路幅と年間期待衝突件数

ずつ緩衝帯幅をとることにより、 $\bar{N}_c$ はほぼ100年に1件となり、橋梁自体の耐用年数を考え合わせると、この程度の緩衝帯幅を設けておけば、衝突に対する安全性の面からは十分であることがわかる。

図10に示したのは、 L を一定として航路幅 W を変えて行った時の $\bar{N}_c$ の変化である。 W の減少に伴い、破線で示した船舶相互の衝突件数が増加するのに対し、橋脚への期待衝突件数は減少する。航路幅が減少すれば航行位置分布の平均値は中央寄りとなり、標準偏差も小さくなる。このため、航路上の船舶密度は高くなり船舶相互の衝突は増加するが橋脚からは離れて航行することになるので、橋脚への衝突件数は減少する。

図11は、交通量 Q の変化と期待衝突件数 $\bar{N}_c$ の関係を示すものである。 Q が増加すれば、それに伴い $\bar{N}_c$ も増加することは容易に予測できる結果ではある。

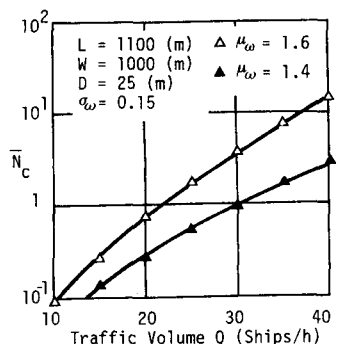


図11 交通量と年間期待衝突件数

5. 結論

船舶の衝突に対する危険性が小さい橋梁計画ならびに高い航行安全性が確保される航行計画が望ましいことは言うまでもない。しかし、両者は相互に影響を及ぼし合い、トレード・オフの関係にあることも少なくない。本研究では、航路・橋梁計画に資するための基礎として、航行船舶の航路横断橋脚に対する衝突事故確率の解析を行ない、以下に示す結果を得た。

- ① 山口県大島瀬戸において実施した航行実態観測調査結果より、横断橋橋脚に対する船舶の避航開始距離分布が対数正規分布として表わされることを明らかにした。
- ② 浦賀水道航路における航行実態観測調査結果より、直線航路における船舶の方位角分布が正規分布として表現でき、その平均値と標準偏差は航路方向ならびに航路幅方向のどの位置でもほぼ同じであることを明らかにした。
- ③ 上記の交通特性を用いて、船舶の航行挙動に着目した横断橋橋脚への船舶衝突確率推定モデルを提案し、設計諸変数や航路特性が衝突確率に及ぼす影響を定量化した。これより、航路側端と橋脚との間の緩衝帯の幅員が衝突確率に関与してかなり支配的であることなど、種々の知見が得られた。

しかるに、避航開始距離分布や方位角分布が航路・交通諸特性と関連づけられていないこと、モデルに未だ多くの仮定や簡単化が存在していることなどの課題は残っており、モデルの妥当性の詳細な検証のための事故統計をまとめることも今後の課題となる。

最後に、航行実態調査に協力いただいた大島商船高等専門学校の辻啓介講師、実態観測資料の面でお世話になった運輸省港湾技術研究所システム研究室の方々、解析作業を手伝っていただいた近畿日本鉄道の藤井滋氏（元京都大学学生）、有益な討議をいただいた神戸商船大学の井上欣三助教授に謝意を表す次第である。

<参考文献>

- 1) K. Kuroda, H. Kita & S. Kono : Mathematical Model of Ship Collision Probability, Mem. of Fac. Eng., Kyoto Univ., vol. XLIV, Part 1, pp. 135~157, 1982.
- 2) 久々宮 久 : 乗り揚げ海難の原因解明の一試み, 日本航海学会論文集, vol. 65, pp. 171~178, 1981.
- 3) U. Rabien : Transportation Risk Modeling of Tanker Ship Operation, Prel. Rep. of IABSE Int. Colloquium, "Ship Collision with Bridges and Offshore Structures, 1983.
- 4) K.H. Drager et al. : Cause Relationships of Collisions and Groundings, Proc. 4th Int. Symp. on Vessel Traffic Service, vol. 1, pp. 91~118, 1981.
- 5) E.M. Goodwin & J.F. Kemp : Collision Risks for Off-shore Structures, J. of Nav., vol. 33, No. 3, pp. 351~356,

1980.

- 6) Y. Fujii et al. : The Probability of Stranding, J. of Nav., vol 27, No. 2, pp. 239~243, 1974.
- 7) T. Macduff : The Probability of Vessel Collisions, Ocean Industry, Sep., 1974.
- 8) R. Rashad : Navigation in the Gulf of Suez, J. of Nav., vol 30, No. 3, pp. 366~377, 1977.
- 9) O. D. Larsen : Ship Collision Risk Assesment for Bridges, Intr. Rep. of IABSE Int. Colloquium. "Ship Collision with Bridges and Offshore Structures", 1983.
- 10) 井上欣三 : 船舶交通量を考慮した航路幅員決定法, 日本航海学会論文集, vol 62, pp. 67~76, 1980.
- 11) 藤井弥平 : 序説海上交通工学, pp. 88~90, 海文堂, 1971.
- 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, vol 58, pp. 103~115, 1977.
- 13) 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. 53~60, 1983.
- 14) 山口篤利他 : 危険物等の離隔距離について, 日本航海学会論文集, vol 34, pp. 59~64, 1965.
- 15) 前掲 11), p. 25.