

# 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

## SAFETY IMPROVEMENT PLANNING OF NARROW WATERWAY BASED ON RISK-BENEFIT ANALYSIS

長尾義三\*・黒田勝彦\*\*・喜多秀行\*\*\*

By Yoshimi NAGAO, Katsuhiko KURODA and Hideyuki KITA

In this paper, a methodology of risk assessment for safety improvement planning of waterways is presented. Safety improvement planning system which involves some risks requires the risk analysis and the evaluation of the risk. This is the quite different point from usual physical planning. For taking this into consideration, the OSHICOP-model is introduced and the method to estimate the direct loss due to ship collision is developed in the present analysis. On the other hand, a simulation model to evaluate reduction of the delayed travel time by improvement of waterway in monetary term is built. Evaluation of the alternatives of the improvement plan is based on the risk-benefit analysis. The usefulness of the methodology and models are examined by numerical computations.

### 1. はじめに

航路計画を策定する際、そこを利用する船舶の航行安全性に対する検討が重要であることはいうまでもない。航行船舶に対する航路のサービス水準を総合的に表わす指標はいまだ確立されるに至っていないが、船舶相互の衝突事故確率は、総合的なサービス水準を構成するものの1つとしての航行安全性、さらには混雑の程度を示す有効な尺度と考えられる。

船舶の航行安全性にまで言及した航路計画に関する研究はこれまでもいくつか見受けられるが<sup>1),2)</sup>、航行安全性算定の面で設計代替案の詳細な検討が十分可能ではなかったり、確保すべき安全性の水準をどこに、どのようにして設定するかという点が明確でないなど、航行安全性を考慮した形での航路の設計をシステムティックに行う方法論はみられなかった。その最大の理由は、航路設計代替案と航行安全性との関連づけが必ずしも容易でなかった点にある。このような状況を踏まえて、著者ら

は、航路計画の安全性の面からの評価を可能とするために、計画諸変数と衝突事故率の関連づけを検討してきた<sup>3)~6)</sup>。その結果、航路整備や航行規制が衝突事故確率の減少にかなり有効に働くことも明らかとなってきた。本研究は、この過程で提案した OSHICOP-モデル (Operational Ship Collision Probability Model: 操作型船舶衝突確率推定モデル) を基礎として、航行安全性を考慮した航路改良計画を策定する方法論を提案するものである。その際、航路を、そこを利用する船舶をも含めて、危険(リスク)が存在する1つのシステムととらえ、リスク・アセスメントの考え方に沿って方法論の構築を進める。

リスク・アセスメントは、通常、準備作業としての「システム同定」とこれに続く「リスクの同定」ならびに「リスクの見積もり」の両者からなる「リスクの決定」、さらにここからの結果を受けて行われる「リスクの評価」といったプロセスに沿って実施される<sup>7)</sup>。OSHICOP-モデルによる衝突事故分析は、このプロセスの「リスクの決定」の部分に相当する。ここで定量化されたリスクは、次いで、評価に適した尺度に変換され、他の評価項目とも合わせて、一定の評価方法と評価基準のもとで受け入れ得るか否かが検討される。評価方法とそこにおける評価基準は、リスクの性質や計画の目的に照らして個々の

\* 正会員 工博 京都大学教授 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 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室  
(同上)

\*\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室  
(同上)

計画に即したものを設定することが必要であり、本研究では“純便益最大”を基準とする“リスク・便益法”を用いて評価を行う。この結果明らかにされたリスクレベルが許容されず、かつ、システムを操作することによってリスクがコントロールできる場合、許容し得るレベルあるいは最も望ましいレベルにまでリスクをコントロールしようとシステムの変更がなされる。

以上より、リスク・アセスメントは、いくばくかのリスクが存在するシステムを計画・設計する際の、1つのシステムティックなアプローチであることがわかる。そこで、本研究では、航路改良計画策定の方法論を、リスク・アセスメントの1つの適用とみて論じることとする。まず、2.では航路改良計画のシステム分析をリスク・アセスメントの実施プロセスと対応づけて行う。次いで、3.でリスクの推定に用いる OSHICOP-モデルを紹介するとともに、4.で衝突のリスクと同時に検討・評価すべき混雑による遅延を定量化するため、シミュレーション・モデルを開発し、その検証を行う。5.では、この両者がもたらす損失を、両者をコントロールするための費用と比較するため、まず貨幣タームに変換する。そして、この結果を用いて効率最大の意味で最も望ましい航路改良計画案を選定する方法論を展開し、簡単な事例計算を行う。6.は結論である。

## 2. 航路改良計画のシステム分析

1.で述べたように、航行安全性の向上を図るための航路改良計画は、リスク・アセスメントの応用例とみなすことができる。このような観点から、航路改良計画を1つのシステムととらえ、これを構成するサブシステム相互の関連をリスク・アセスメントの手順と対応づけて整理したものが図-1である。

まず、対象とする航路を、その上を航行する船舶交通流をも含めて明らかにすることから作業は始められる。これを航路システムとよぶこととすると、それを特徴づける要素は、航路特性、交通特性、船舶特性、操船者特性、ならびに自然条件に大別される<sup>3)</sup>。これらの要素には操作可能なものと不可能なものがある。操作可能な要素のすべてが本来は検討の対象となるのだが、ここでは簡単のため、航路幅のみをもって計画変数とする。

次に、明らかにされた航路システムを検討対象となるリスクとの関連づけを行う「リスク決定システム」に進む。本システムは、航路システムにどのようなリスクが存在するのかを列挙するとともにその性格を明らかにし、計画策定時に考慮すべき重要なリスクを抽出する「リスクの同定」、および、原因となる航路システム構成要素と結果として生じるリスクとの関係を定量化する「リスクの推定」の両者からなる。航路におけるリスクには、

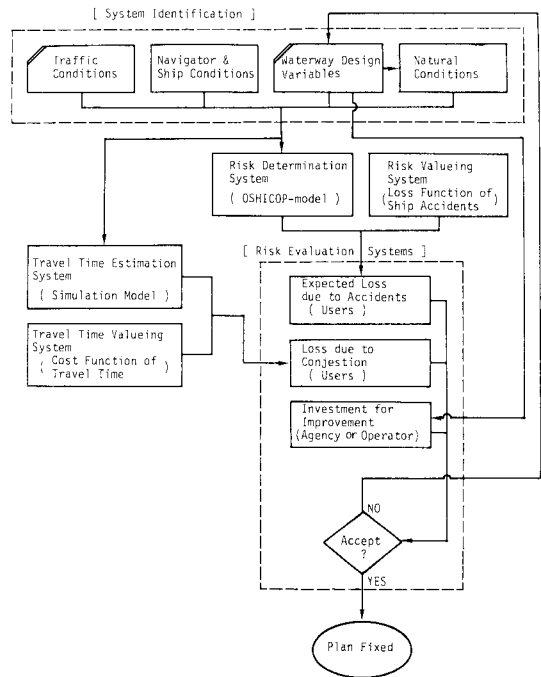


図-1 航路改良計画のシステム把握

衝突、乗り揚げ、沈没、火災、機関故障などがあるが、全海難の約60%を衝突が占め、かつ、その発生率が航路システムの状態に依存する程度が小さくないため、本研究では、まず衝突のみをもって航路改良の際考慮すべきリスクとする。衝突確率の推定に関しては、すでに述べたように、これまで数多くの研究がなされている。これらは、ある特定の計画変数と衝突確率の関係や一定の限られた条件のもとでは有益な情報を提供することが可能であるが、多数の計画変数のさまざまな組合せの中から望ましい航路計画代替案を選び出すために用いる道具としては、検討すべき計画変数がモデルに組み込まれていなかったり、十分な操作性に欠けるものが多い。そこで、本解析では、著者らによる OSHICOP-モデルを導入して航行船舶の衝突に対するリスクを見積もることとする。

一方、「旅行時間推定システム」は、混雑により強いられる航路通過に要する時間の増分を推定するシステムである。ここでは、船舶の航行挙動に基づく航行シミュレーション・モデルを開発し、その結果から作成する実験式を用いて推定するとともに、現象再現性の検証を行う。

「リスク決定システム」により見積もられたリスクと「旅行時間推定システム」により求められた旅行時間とは互いに異なる単位をもっているため、このままでは比較することが困難である。そのため、両者を共通の尺度

に変換しておくことが要請される。本研究では、航路改良費用と比較する必要上これらを貨幣タームで表わすこととする。この手続を行う部分が「リスクの価値評価システム」である。ここでは、衝突により被る船体と積荷の損害額をもって衝突がもたらす損失とし、衝突事故に関する調査資料を収集・解析することによってこれを求める。また、混雑によりもたらされる損失は、燃料費、船費、貨物金利によりその大部分が占められるため、これらを計算することにより算定する。

「リスク評価システム」は、リスクの受け手、すなわちリスクの減少ないしは回避を望む評価主体が、どの程度ならばそのリスクを許容するか、そしてさらに、どの対応策が最も望ましいものとなるかを探るシステムである。本研究では、リスク・便益法の考え方に基づき、種々の航路改良計画代替案の中から純便益最大の意味での最適代替案を選択するプロセスを提示する。ただし、リスク・便益分析の本来の方法は、当該システムのリスクとそれがもたらす便益を比較し、後者が前者を上回る場合にそのリスクは許容されるとするものであるが、ここでは若干その意味を拡張して、リスクを減少させるための努力とリスクの減少によりもたらされる便益とを比較することにより評価を下そうとするものである。この意味では、「リスク・費用・便益法」とよぶことがより適切であるともいえる。

### 3. OSHICOP-モデルによる船舶衝突確率の推定

船舶の航行安全性を取り扱った研究は、これまでも数多く見受けられる。用いている手法別にこれらを見ると、海難事故を統計的に分析したものの<sup>8)~11)</sup>、F. T. A. (Fault Tree Analysis) に基づくもの<sup>12)</sup>、気体分子のランダム運動からの類推により衝突確率を求めたもの<sup>13), 14)</sup>、一連の避航操船の過程を待ち行列システムとしてとらえ、一定以上の待ち時間が生ずる確率を衝突確率としたもの<sup>15), 16)</sup>、などに大別される。これらの研究成果により、航路上の衝突確率に関する情報はかなり豊富に得られるようになってきた。しかしながら、モデルに組み込まれた説明変数やモデル自体の操作性の面から、航路設計代替案の詳細な検討には必ずしも適したものといえず、あくまでも衝突危険度を推定する段階にのみとどまっていた。そこで、本研究では航路設計代替案の検討に用いることを目的として著者らが開発した OSHICOP-モデルを用いて船舶衝突確率を推定する。

本モデルは、船舶が衝突に至るプロセスを「出会い」と「避航失敗」とに分け、これらの状態に陥る確率を、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その特徴がある。既往の衝突事故統計

を用いたモデルの検証結果は良好な現象説明力を示している<sup>4)</sup>。また、航路幅、交通量、船型構成といった航路や交通に関する諸特性が、航行挙動を記述する際の説明変数として組み込まれており、これらの諸特性の変更が衝突確率に与える影響を容易に検討できるように構築してある。

本解析でリスクを推定するために用いる同航時船型対別年間期待衝突件数  $\bar{N}_{kk}$  は、航路幅  $W$ 、航路長  $L$ 、交通量  $Q$ 、船型構成分布の平均値  $\mu_w$  と標準偏差  $\sigma_w$  の関数、

$$\bar{N}_{kk} = \bar{N}_{kk}(W, L, Q, \mu_w, \sigma_w) \dots \dots \dots (1)$$

として与えられるが、モデルの詳細については文献 3)、4) を参照されたい。本モデルを用いて求めた船型対別年間期待衝突件数 ( $k$  は船型ランクを表わす) を図-2 に、航路幅と年間期待衝突件数の関係を図-3 に、それぞれ例示する。

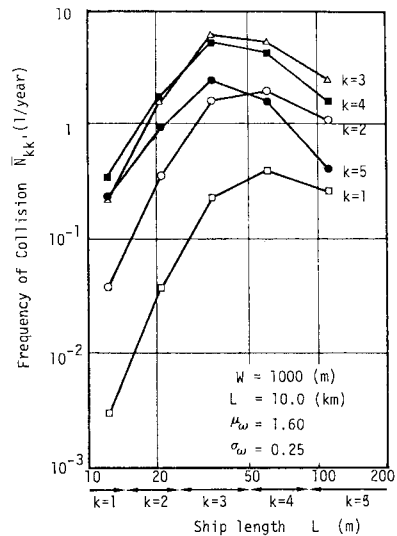


図-2 船型対別年間期待衝突件数

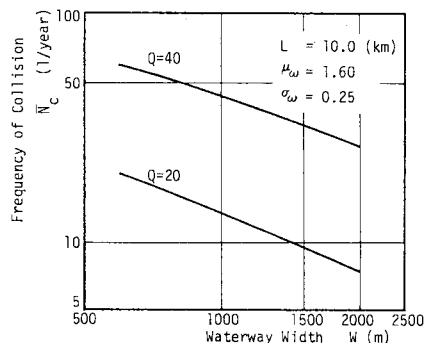


図-3 航路幅と年間期待衝突件数の関係

4. 航路通過に要する旅行時間の推定

航行船舶の衝突危険度を減少させるため行う航路の拡幅は、同時に交通混雑をも緩和し混雑に伴う遅延時間も短縮する。遅延時間の短縮による費用節減効果は船舶1隻のみではわずかなものでしかないが、当該航路を航行する船舶全体を考えると無視し得ないほど大きなものとなる。そこで、航路拡幅がもたらす混雑緩和の効果を定量化するため、航路諸元と交通流特性から航路の通過に要する旅行時間を推定するシミュレーション・モデルを開発した。

このモデルは、SEARCH, ARRIVE, ENTER, STATUSと名付けられた4つの主要な副プログラムと、これらを統合する主プログラムから構成されている(図-4参照)。シミュレーションは定間隔時間制御方式をとり、航路諸元として航路長と航路幅を、交通特性

として船型構成や交通量などをパラメーターとして操作し得る。

副プログラム SEARCHは、航路内を航行中の着目船舶の周囲に存在する他船の位置を探索し、次の1クロックタイムの間の着目船舶の行動を決定する機能をもつ。取り得る行動は、航海速力による直進と左右への変針避航、および先行船と同じ速度で追従する減速避航の3種類である。その決定基準は、1クロック経過後も他船の避航領域に進入することのない場合は直進、そのまま進むと避航領域に進入してしまうような先行船が存在する場合は変針避航、さらに、近傍を航行する他船の避航領域に進入することなく変針することが不可能な場合は減速、というように避航領域を媒介として順次決定を行う。避航領域は、山田・田中<sup>17)</sup>により与えられた径を有する楕円形のうち、図-5に示す後半部を用いている。以上のような周辺探索と行動決定を、航路出口に最も近い船舶から航路入口方向へ、全船舶に対して行う。

副プログラム ARRIVEは、航路入口への到着船舶を発生させる機能を有する。単位時間  $\delta t$  に到着する隻数  $n$  は時間交通量  $Q$  を平均値とするポアソン分布、

$$\phi(n) = \frac{(Q\delta t)^n}{n!} e^{-Q\delta t} \dots\dots\dots (2)$$

に従うものとする。また船舶長  $l_k$  と航行速度  $V_k$  の分布は次式で与え、

$$\phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\omega} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega - \mu_\omega}{\sigma_\omega}\right)^2\right] \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega = \log_{10} l_k$$

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

$$\mu_{V_k} = 10^{0.29 \log_{10} l_k + 0.52}$$

$$\sigma_{V_k} = 0.2 \mu_{V_k}$$

さらに、到着時の航路幅方向の航行位置  $x$  は井上<sup>18)</sup>による航跡分布に従うものとした。

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2\right] \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_x = -7.17 + 0.105W + 2.168Q_L$$

ここに、 $W$  は航路幅、 $Q_L$  は  $L$  換算交通量である。そして、到着隻数はクロックタイムごとに、他の特性は到着船舶ごとに乱数を発生させ、その値を得る。

副プログラム ENTERは、ARRIVEにより生成された到着船舶が航路内に進入できるか否かを判定する機能をもつ。到着船舶はいったん航路入口に設けられた進入待ち行列に加わる。そして、待ち行列の先頭の船舶から航路内に進入可能かどうか判定され、可能であれば待ち行列から離脱して航路に進入する。このときの判定方法と航行状態の決定方法は SEARCHにおける方法と同

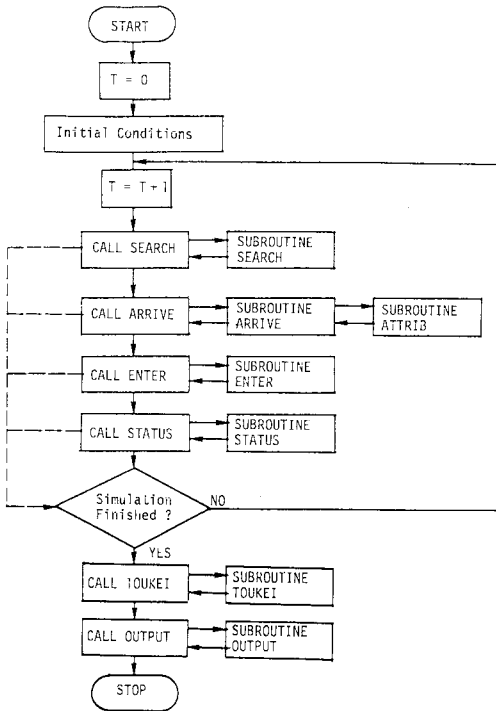


図-4 旅行時間推定シミュレーション・モデルのフローチャート

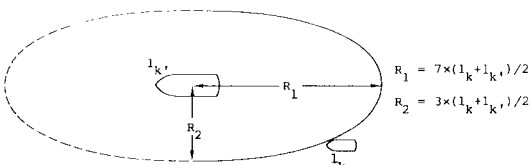


図-5 避航領域

じものを用いている。なお、すべての到着船舶が待ち行列に加わるものとしているが、進入待ち状態の船舶が存在せず、かつ到着時に進入可能な状態であれば即刻待ち行列から離脱するものとしているため、実質的な待ち時間は発生しない。また航路幅方向の到着位置によっては、待ち行列中のより後方の船舶が前方の船舶より先に航路に進入する場合も生じる。

上記の3つの副プログラムにより、船舶の挙動はシミュレートできるのであるが、さらに、副プログラムSTATUSにおいて、種々の識別番号を各船舶に付与し、航路に進入させた全船舶の航行位置を探索・記録することによって、SEARCHとENTERの効率化を図っている。そして、時々刻々の全船舶の航行状態に関する情報をもとに、船型別旅行時間ならびに遅延時間が算出される。

以上のごとく組み立てられたシミュレーション・モデルが、どの程度の現象再現性を有するのかを検討するため、航行実態観測調査データ<sup>19)</sup>から取り出した各船舶の船型と航路入口への到着時刻、および到着時の航行速度と航路幅方向航行位置を入力し、出力として得られた各船舶の旅行時間を実際の旅行時間と比較した。本シミュレーション・モデルは、直線状の一方水路を対象とするものであるため、比較すべきデータも同様の水路におけるものを用いるべきであるが、このような条件を満たしかつ混雑が生じているような水路における観測データが見当たらないため、航行分離がなされている浦賀水道航路の中央部分のデータを用いることとした。ただし、反航船ないしは横切り船の影響を受けていたり、航路進入時に避航の状態であって自由速度で航行していないとみなされる船舶航跡は、モデルの前提条件にそぐわず検証結果をゆがめるおそれがあるため、実航跡をあらかじめ検討することにより取り除くこととした。

検証に用いた航路区間の幅は1000m、延長は5kmであり、船型構成は $\mu_w=1.60$ 、 $\sigma_w=0.25$ 、平均交通量は13隻/時、サンプル数は189である。速度分布は直接シミュレーションには用いないが、観測値の速度分布が仮定したものとよく一致していることは文献20)で確認されている。

図-6にその結果を示すが、避航を行っていない場合にも船舶の実際の速度は一定ではなくある程度のばらつきがみられることなどを考えると、本シミュレーション・モデルは、旅行時間に関する限りおおむね良好な現象再現性を有するものとみなすことができる。

さて、このシミュレーション・モデルを用いて種々の航路幅に対する旅行時間の推定値を計算した。ここに、平均旅行時間はシミュレーションで発生させた全船舶の旅行時間の平均値を意味する。図-7の黒丸は、時間交

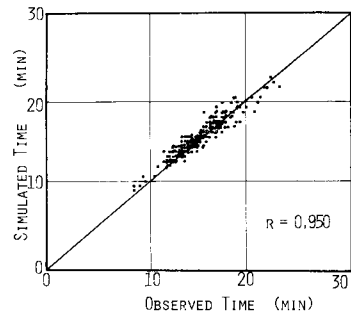


図-6 旅行時間の推定値と観測値との対応

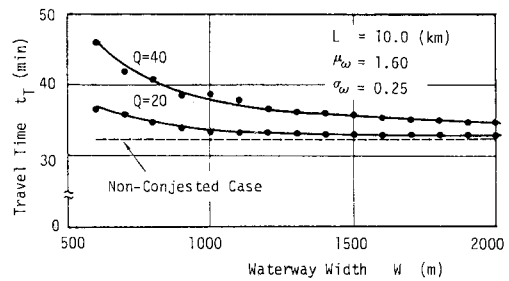


図-7 航路幅と旅行時間

通量が20隻と40隻の場合の各航路幅に対する推定値を示しており、これより次の実験式、

$$t_r = 31.03 e^{\frac{93.14}{W}} \quad (\text{for } Q=20 \text{ ships/h}) \dots\dots\dots (6)$$

$$t_r = 30.81 e^{\frac{223.89}{W}} \quad (\text{for } Q=40 \text{ ships/h})$$

を得た。図-7の実線はこの関係を図示したものである。本図より、たとえば、全長10kmの航路の航路幅を1000mから1500mに拡幅することにより、約2~3分程度の旅行時間の短縮が見込まれることがわかる。図中の破線は混雑がない場合における旅行時間を示すもので、混雑によりもたらされる遅延時間 $t_d(W)$ は両者の差として与えられる。

## 5. 航路改良計画の評価

### (1) 船舶衝突事故損害額の推定

海上交通における事故損害額に関する研究は、Orathaille and Wiedman<sup>21)</sup>、Giziakis<sup>22)</sup>、藤井<sup>23)</sup>など以外にはあまり見当たらない。しかも、前二者は船型に関する対応づけがなされておらず、また、後者は算出の過程で船型ごとの要救助率を用いるべきところを全船型に対する平均的な要救助率を用いていることにより、大型船に対するものほど損害額を過大推定するという問題点があるため、本研究の目的に必ずしも沿うものとはいえない。

船舶の衝突がもたらす損害は、船舶および積荷の直接的な損失と航路の交通機能の阻害および流出油の拡散に

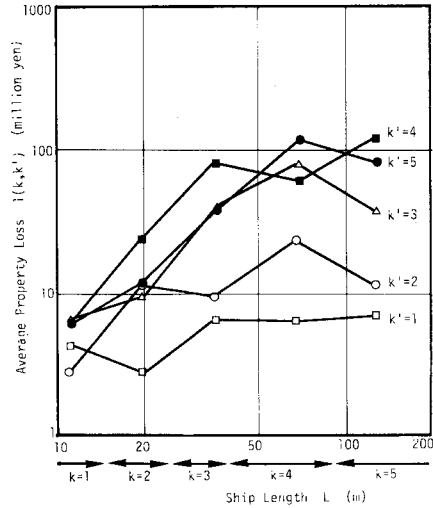
より生ずる間接的な損害の2つに大別され、前者は、さらに、当該事故船舶にかかわる損害と流出油による海洋汚濁といった第三者に及ぼす損害に分けられる。損害額の算定は、個々の損害項目とその損害程度ならびにそれぞれの生起確率とを対応づけ、期待値をとることにより行うべきであるが、こと海難に関しては、サンプルサイズとしての事故件数に比べて損害項目の数が多く、事故を取り巻く環境条件も広範囲にわたるため、上述の方法を可能とするだけの十分な生起確率を算定することが実際上きわめて困難である。そこで、本研究では、第1段階として直接損害のうち当該事故船舶の船体と積荷に関する損害額を推定することを考える。その尺度は、混雑がもたらす損失や航路改良のための投資と比較する必要上、単位時間当たりの期待損害額が適切である。ただし、単位時間当たりのトリップ数と1トリップ当たり船型別衝突確率は別途知ることができるため、求めるべき損害の尺度は“事故1件当たり船型別平均損害額”となる。

算定のための基礎資料として、昭和56年1月から昭和59年12月までの海上保安庁海難調査データを収集した。本データには、事故船舶の諸元と事故を取り巻く諸条件に加えて船体と積荷に関する損害見積り額が記載され、現在のところ本研究で用いる資料としては最も適切なものと思われる。

まず、総トン数5トン以上の船舶のデータの中から、衝突対象物が(岸壁や浮標などでなく)船舶であるもののみを抽出した。次いで、事故発生時刻や発生水域ならびに相手船用途などを手掛かりとして各船舶に衝突した相手船を探し出し、対応づけを行った。対応づけが可能となった衝突事故は950件である。表一に船型対ごとのサンプル数を示す。 $k, k'$ はそれぞれ自船と相手船の船型ランクを表わし、総トン数との対応は表中に示すとおりである。事故1件ごとの直接損害額は、先に述べたように、双方の船舶の船体損害見積り額と積荷損害見積り額の和として求めた。衝突事故1件当たり船体と積荷の損害額の単純平均は、それぞれ約2890万円と約1020万円となり、平均的な直接損害額は約3900万円と推定される。図一に船型別平均的な直接損害額を示す。

表一 解析に用いた衝突事故のサンプル数

Opponent Ship's Size $k'$ Concerned Ship's Size $k$ (GT)	- 3000 ( $k'=5$ )	3000 - 500 ( $k'=4$ )	500 - 100 ( $k'=3$ )	100 - 20 ( $k'=2$ )	20 - 5 ( $k'=1$ )
5 - 20 ( $k=1$ )	35	36	90	29	42
20 - 100 ( $k=2$ )	38	29	66	49	
100 - 500 ( $k=3$ )	117	119	140		
500 - 3000 ( $k=4$ )	59	35			
3000 - ( $k=5$ )	66				



図一 船型別平均損害額

(2) 航路の混雑に伴う時間的損失の費用換算

航路の混雑によって航海時間が伸びたとき、船舶が被る費用として考慮すべきものは、本来不要であったにもかかわらず航海時間の延長によって新たに必要となる費用であり、燃料費、船費、貨物金利の増加分がその主要なものとなる。ここに、燃料費の増加分は、航海時間の延長分に対して消費される燃料費を指す。船費は、船舶を保有しかつ運航可能な状態としておくために必要な直接・間接船費や一般管理費などをいい、航海時間の延長はこのような経費の浪費を意味する。また、航行船舶に積載されている貨物は、付加価値が急変しない限り延着に伴う金利損失を生じる。ここでは、船型  $k$  の船舶が混雑により  $t_d$  時間遅延する場合の損失額  $C_T(k, t_d)$  を上記3費目の和、

$$C_T(k, t_d) = C_F(k, t_d) + C_S(k, t_d) + C_I(k, t_d) \dots \dots \dots (7)$$

として求めることとする。

船型  $k$  の船の  $t_d$  時間当たり燃料費増分  $C_F(k, t_d)$  は燃料のトン当たり価格  $a_F$ 、1日当たり燃料消費量  $F_k$  (トン/日) と、

$$C_F(k, t_d) = a_F \frac{t_d}{24} F_k \dots \dots \dots (8)$$

なる関係にあり、 $F_k$  と総トン数  $G_k$  との間には、  
 $F_k = 43.0 - 36.6 \exp(-8.7 \times 10^{-5} G_k) \dots \dots \dots (9)$   
 なる関係がある<sup>24)</sup>。

一方、船型  $k$  の船舶の  $t_d$  時間当たり船費  $C_S(k, t_d)$  は、

$$C_S(k, t_d) = 1200 \times 1.5 \times G_k \times \frac{t_d}{30 \times 24} \dots \dots \dots (10)$$

で与えられる。右辺第1項は下條<sup>25)</sup>による1か月の載荷

重量トン (DWT) 当たり船費であり, 第 2 項は載荷重量トン数と総トン数の換算係数である。

また, 船型  $k$  の船舶の  $t_d$  時間当たり貨物金利損失額  $C_l(k, t_d)$  は, 単位重量当たりの貨物価額  $a_c$ , 貨物の年利率  $i$ , 積載率  $\lambda$ , および, 載荷重量トン数と総トン数の換算係数 1.5 を知るにより,

$$C_l(k, t_d) = 1.5 a_c i \lambda G_N \dots \dots \dots (11)$$

として計算される。

(3) 航路改良計画の費用便益分析

先にも述べたように, 航路改良計画の評価は, 改良のため投入される費用とその結果もたらされる便益の比較をもって論じられるべきものである。その際, 航路改良に伴う費用・便益の変化分の帰属主体が一般に異なり, また公共事業として実施される場合が多いため, 国民経済的観点からの評価が必要となる。

さて, 衝突事故に起因する船型  $k$  の船舶 1 隻当たり年間期待損害額  $l_c(k)$  は,

$$l_c(k) = \sum_k (L_{Skk} + L_{Ckk} + L_{Skk} + L_{Ckk}) \bar{N}_{kk} \dots \dots \dots (12)$$

である。ここに,  $L_{kk}$  は船型  $k$  と  $k'$  の船舶が衝突したときの船舶の損害額で, 添字  $S$  は船体損害を, 添字  $C$  は積荷損害を表すための記号である。ここで, 年間期待衝突件数  $\bar{N}_{kk}$  は式 (1) に示したように航路  $W$  と航路長  $L$  の関数となっているため,  $l_c(k)$  を改めて  $l_c(k, W, L)$  と書くことにすると, 当該航路において, 船舶が衝突により被る年間総期待損失  $L_c(W, L)$  は, 式 (12) の船型  $k$  に関する総和をとることにより与えられる。

$$L_c(W, L) = \sum_k l_c(k, W, L) \dots \dots \dots (13)$$

また, 前節における議論により, 当該航路で混雑により 1 年間に生じる総遅れ損失  $L_d(W, L)$  は, 式 (11) の船型  $k$  に関する総和をとることにより得られる。すなわち, 船型別年間交通量を  $Q_k$  とすると,

$$L_d(W, L) = \sum_k Q_k C_l(k, t_d) \dots \dots \dots (14)$$

である。したがって, 航路利用者 (船舶サイド) にかかわる年間期待総損失は, 両者の和,

$$L_u(W) = L_c(W, L) + L_d(W, L) \dots \dots \dots (15)$$

となる。これより, 現在の航路幅  $W_0$  を  $W$  にまで拡幅する場合に, 航路利用者が新たに享受する便益  $B(\Delta W | W_0)$  が次式のように定義される。

$$B(\Delta W | W_0) = L_u(W_0) - L_u(W) \dots \dots \dots (16)$$

$$\Delta W = W - W_0$$

上式で定義される便益は交通量や船型構成, 積荷の価値などによって毎年変動し得るものであるため, これを明示的に表すために第  $t$  年次に発生する便益を  $B_t(\Delta W | W_0)$  と記すこととする。

他方, 航路改良には航路改良費用が必要となる。公共事業としての航路整備は多く国民経済的観点に立って行われる。この場合, 計画の評価基準として各種のものが

考えられるが, ここでは純便益最大化基準を用いる。すなわち,  $W_0$  から  $\Delta W$  の拡幅に要する改良費用を  $C_c(\Delta W | W_0)$ , 計画対象期間を  $T$  年, 社会的割引率を  $r_s$ , とすると, 次式を満たす  $\Delta W$  が最も望ましい拡幅量を与える。

$$\text{Max}_{W \geq W_0} \left[ \sum_{t=1}^T \frac{B_t(\Delta W | W_0)}{(1+r_s)^t} - C_c(\Delta W | W_0) \right] \dots \dots \dots (17)$$

以上に示した分析は費用便益分析の 1 つの応用であるが, 便益がリスクの減少によりもたらされる本研究のような場合, 特に, “リスク・費用・便益分析” とよばれることもある。

(4) 数値計算例

以上の方法論が現実的なものであることを明らかにするため, 以下のような例を考え, 考察を加えた。

延長 10 km, 幅員 500 m, 時間交通量 40 隻の一方航路を拡幅してより高い航行安全性を確保するための改良計画の例を考えよう。パラメーター  $\mu_w = 1.60$ ,  $\sigma_w = 0.25$  で規定される船型構成は, ほぼ現在の浦賀水道航路におけるものに相当する。混雑に伴う損失に関する諸パラメーターは表—2 に示すものを用いる。ここに, 単位重量当たり貨物価額  $a_r$  は神戸港における統計値を参考としている。

航行シミュレーション結果より求めた船型別遅延時間ならびに OSHICOP—モデルから求めた船型対別年間期待衝突件数  $\bar{N}_{kk}$  を式 (12)~(15) に代入して航路幅  $W$  の変更に伴う利用者の総期待費用の変化を求め, これを図示したものが図—9 である。この図より, 水路改良によって発生する便益を求めることができる。簡単のため, この便益が毎年一定である (すなわち, 船型構成, 交通量, 積荷の価値等が変化しない) と仮定すると,  $T$  年間に考えられる総便益の現在価値  $B(W | W_0, T)$  は,

$$B(W | W_0, T) = \sum_{t=1}^T \frac{B(\Delta W | W_0)}{(1+r_s)^t} = \sum_{t=1}^T \frac{L_u(W_0) - L_u(W)}{(1+r_s)^t} \dots \dots \dots (18)$$

である。

一方, 航路改良に要する費用は, 図—10 に示すように, 航路周辺水域の平均水深から航路底面までの掘削深さが  $H$ , 航路側端の勾配が 1 :  $m$  である台形断面を有する航路を想定し, 単位土量当たり掘削費用を  $C_e$  として算定する。ただし, 航路幅は一般に当該水路の最狭隘部の幅員によって規定されていることが多く, 航路の一部区間

表—2 計算例における諸パラメーターの値

$a_r$	82,000 (yen/ton)	$\lambda$	0.5
$a_c$	160,000 (yen/ton)	$i$	0.1 (1/year)

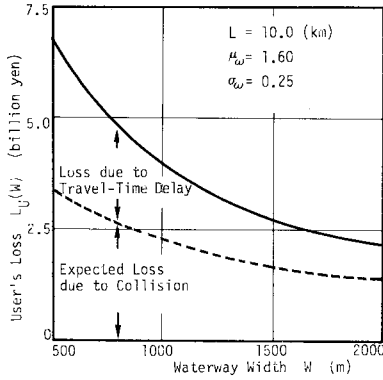


図-9 利用者の期待費用

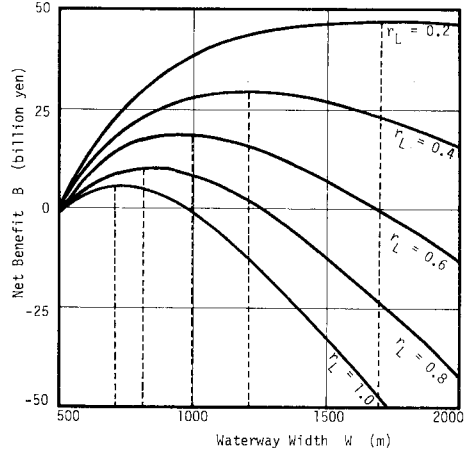


図-12 要改良区間長の比率が代替案選定に及ぼす影響

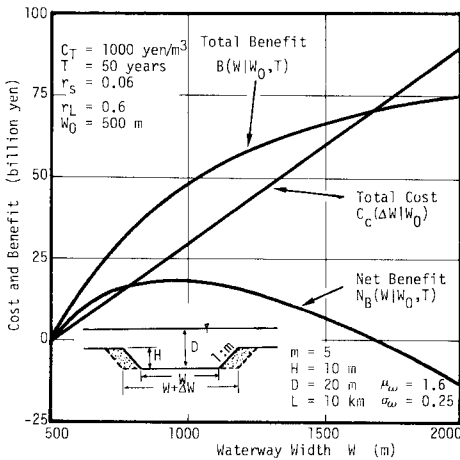


図-10 航路拡幅に伴う純便益の変化

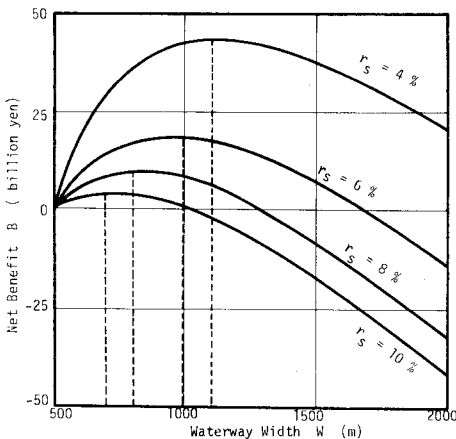


図-11 社会的割引率が代替案選定に及ぼす影響

により与えられるものとした。このとき、 $T$  年間に発生する純便益  $NB(W|W_0, T)$  は、

$$NB(W|W_0, T) = B(W|W_0, T) - C_c(\Delta W|W_0) \dots\dots\dots (20)$$

として表わされる。図-10に、航路幅の変更に伴う改良費用と便益および両者の差として与えられる純便益の変化を示す。社会的割引率は年間6%、耐用年数は50年、掘削費用は1000円/m<sup>3</sup>の場合を考えている。また、前述の要改良区間長の比は0.6とする。本図より、設定条件のもとでは、航路幅を900mとすることが最も望ましい代替案であることがわかる。ただし、今回は考慮に入らなかったが、事故による間接費用も相当大きな額となるものと推測されるため、實際上、望ましい航路幅はさらに広がるものと考えられる。なお、図-11に改良代替案の選定に及ぼす社会的割引率の影響を、図-12に、同じく要改良区間長の航路全長に対する比率の影響を示しておく。

6. おわりに

本研究は、航行安全性の向上を目指した航路改良計画の方法論を、リスク・アセスメントの考え方に基づいて提案したものである。何らかのリスクが内在するシステムの安全性向上策を策定する場合、リスクの分析とその評価を行うことが必須となる。この点が通常の施設計画と異なる点であり、航路改良計画に関しては、海難事故の分析・評価を航路の設計変数と明確に対応づけて行うことがこれに相当する。本研究では、このような分析を容易に行うために開発された OSHICOP-モデルを導入することにより、リスクの見積りを行った。

OSHICOP-モデルの計算結果によると、航行中の対船舶衝突確率は、航路諸元や航路特性により異なるが、1隻1トリップ当たり  $0.5 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4}$  となってい

を掘削するだけで全体としての拡幅が可能となる場合がある。そこで、これを対象航路全長に対する要改良区間長の比、 $r_L$ 、として表わすこととすると、

$$C_c(\Delta W|W_0) = C_e(W - W_0) H L r_L \dots\dots\dots (19)$$



る。この値を年間衝突事故発生件数に直すと約5~50件にもなる。このように頻発する衝突事故は、その結果として莫大な資産の損失をもたらすことになる。本研究では、このうち船体と積荷が被る直接損害額の算定法を示したが、それによると、衝突事故1件当たり平均損害額は300万円~1億円程度であることがわかった。また、ある一定の期間（たとえば1年間）に航路上で発生する衝突事故がもたらす総損害額は上記の衝突事故1件当たり平均損害額と1トリップ当たり衝突確率、および年間総トリップ数から求めることができ、5. に示した計算例の場合、年間期待総損害額は約20~70億円にも達することがわかった。実際には、これに加えて人命の損失や海洋汚染などに伴う費用が発生するため、航路上における事故損失は予想をはるかに上回る規模であることが明らかとなった。しかしながら、同時に、この損失は航路整備や航行規制などの衝突事故発生率の減少化方策を通じて低減可能となることもまた、明らかにされた。一方、航路の拡幅は混雑による航行費用の増加をも同時に減少させる効果を有する。この効果を測定するため、本研究では新たに航行シミュレーション・モデルを開発した。衝突による損失を求めた計算例と同じ条件のもとでは、混雑による損失は衝突による損失とほぼ同程度にも上り、航路拡幅がもたらす混雑解消効果も無視できないことがわかった。

以上の結果を受けて、最後に、リスク・便益分析に基づく代替案評価の方法に関する議論を行った。ここでは、リスクの減少を便益ととらえ、航行安全性の向上による期待損失の低下と付随的にもたらされる混雑費用の低下を航路改良費用と比較する方法を採用した。この方法に従って種々の代替案（ここでは航路幅）に関する純便益を計算したところ、設定した条件のもとでは純便益が極大（大域的にも最大）となる航路幅が存在した。これをもって、本研究で取り扱った範囲における最も望ましい航路改良計画代替案とみなすことができる。

上述した一連の検討を行うことにより、本研究で提唱した方法論と開発したモデルの有効性をある程度まで示し得たものと考えられる。しかしながら、本研究では航路上での事故として衝突以外のものを検討対象としていないため、今後制限水路の改良計画などへ本方法論を適用する場合には、乗り揚げをも考慮できるようにすることが要請されてくる。また、事故がもたらす損失には環境汚染費用や航路閉塞に伴う費用をも算入する必要がある。これらを今後のモデル開発の課題としたい。

最後に、航行実態観測調査資料の提供をいただいた運輸省港湾技術研究所設計基準部システム研究室の方々、ならびに海難調査資料の提供をいただいた海上保安庁警備救難部航行安全課の方々に対して謝意を表するとともに、

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によってなされたものであることを付記する。なお、数値計算には京都大学大型計算機センターのFACOM M-382を用いた。

#### 参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Vaganov, G. I. et al. : Methods of Increasing Waterway Capacity and Improving Safety of Navigation, Proc. of 25th Int. Nav. Cong., P. I. A. N. C., Sec. 1, Vol. 2, pp. 401~411, 1982.
- 3) Kuroda, K., Kita, H. and Kono, S. : Mathematical Model of Ship Collision Probability, Memoirs of the Fac. of Eng., Kyoto Univ., Vol. XLIV, Part I, pp. 135~157, 1982.
- 4) 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.
- 5) 黒田勝彦・喜多秀行：航路横断橋に対する船舶衝突危険度の推定，土木計画学研究・論文集，No. 1，pp. 59~66，1983.
- 6) 黒田勝彦・喜多秀行：OSHCOP-モデルによる航路整備と航行規制効果の検討，土木学会論文報告集，No. 343，pp. 111~119，1983.
- 7) たとえば，Rowe, W. D. : An Anatomy of Risk, John Wiley & Sons, 1977.
- 8) 藤井春三：衝突事件の分析調査，航海，No. 24，pp. 21~32，1966.
- 9) 塩原礼次郎：海難の要因について，日本航海学会誌，No. 37，pp. 181~187，1963.
- 10) 神鳥 昭：関門海峡における衝突海難と気象との関係，日本航海学会論文集，No. 47，pp. 79~91，1972.
- 11) 藤井弥平・山内宏之：海上交通事故の研究-Ⅳ，日本航海学会論文集，No. 50，pp. 21~28，1973.
- 12) Ostergaard, C. and Rabien, U. : Estimating Risks in Sea Transportation of Clude Oil—Some Problems and Solution—, Proc. of US-FRG Conference on Risk Management, Washington, U. S. A. 1983.
- 13) Riggs, R. F. : A Short Study of Statistics of Collision between Merchant Vessels, J. of the Inst. of Navigation, Vol. 12, No. 3, 1968.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 田中健一・山田一成：船舶の混合交通における交通量換算係数について，日本航海学会誌，No. 44，pp. 67~72，1970.
- 18) 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.
- 19) 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，1976，ならびに運輸省港湾技術研究所設計基準部調べ。

- 20) 藤井弥平：序説海上交通工学，pp. 33～34，海文堂，1971.
- 21) Orathaille, M. and Wiedemann, P. : The Societal Cost of Marine Accidents and Marine Traffic Management Systems, Proc. of the 25th Int. Nav. Cong., P. I. A. N. C., pp. 272～290, 1979.
- 22) Giziakis, K. : Economic Aspects of Marine Navigation-  
al Casualties, J. of Nav. Vol. 35, No. 3, pp. 466～478, 1982.
- 23) 藤井弥平：海上交通事故の研究Ⅴ—損害の程度—，日本航海学会論文集，No. 54, pp. 47～54, 1976.
- 24) 長尾・黒田・井上：台風時における船舶避泊経費について，日本航海学会論文集，No. 70, pp. 187～197, 1984.
- 25) 下條哲司：船型の船価・運送原価・収益への効果，海事産業研究所報，No. 165, pp. 5～20, 1980.

(1985. 3. 20・受付)