

リスク・アナリシスによる内陸運河の改修計画法*

Safety Improvement Planning of Canal Based on Risk Analysis

黒田勝彦 (Katsuhiko KURODA) **

吉田哲生 (Tetsuo YOSHIDA) ***

伊藤雅之 (Masayuki ITOH) ***

井上欣三 (Kinzou INOUE) ****

Methodology of safety improvement planning of a canal is presented. Since the navigational safety of ships through a canal is very important, the methodology of planning for safety improvement is desired to be established. The present paper proposes the planning method based on the risk analysis which has been developed in the field of system reliability. In application of the risk analysis to safety improvement planning of a canal, the risk identification and the risk estimation processes are fundamentally important in the sense that the risk estimation model should include the controllable variables for planning. The present paper also presents the case study of a canal in order to demonstrate this problem.

1. まえがき

スエズ運河やヨーロッパに見られる内陸運河等の改修計画で重要な問題は、航行船舶の安全性の確保である。しかし、安全性を主たる問題とする改修計画の方法には未だ確たる手法がなく、一般的な計画の方法の確立が望まれている。本研究は、内陸運河を通行する船舶の航行安全性、逆に言えば、航行危険性とは何か、これらを分析し改修計画をどのような手法で立案すればよいかについてリスク分析手法

に基づく計画法を提案するもので、2章では基本となるリスク分析の方法論について概述し、3章では、リスク分析法の運河における適用法について述べ、4章では、航行船舶の座礁事故についてのモデル化の方法を例に改修案の立案法について述べる。

2. リスク分析の概要と手順¹⁾

リスク分析は図-1に示すように、大別して2つの作業に分類することができる。1つはリスク決定のプロセスであり、他の1つはリスク評価のプロセスである。リスク決定は、リスク同定とリスク推定からなる。ここで言うリスク(Risk)とは、望ましくない結果とその結果が発生する確率の積で定義し、前者を危険、後者を危険の発生確率と呼ぶことにする。従って、リスク同定は考えているシステムに如何なる種類の危険が潜在しているかを明らかにすると共に、危険の発生メカニズムを分析するプロセスで Fault Tree Analysis(F.T.A.)や Event Tree

* キーワーズ：運河、海上交通、リスク、事故モデル

** 正会員 工博 京都大学助教授
交通土木工学教室

*** 正会員 工修 三菱総合研究所 第一社会公共システム室

**** 正会員 神戸商船大学助教授 商船学部
商船学科

Analysis(E.T.A.)や多変量解析等の手法が用いられる。

リスク評価は、許容リスクレベルの設定及びリスク減少又は回避の方策の決定プロセスである。許容リスク・レベルは対象としている運河の航行リスクが許容レベル内かどうかの判定の為の基準で、他の運河のリスク・レベルとの比較等を参考にして決められる。もし、現在のリスク・レベルがこの許容値以内に入っていない場合や、許容基準が設定されていない場合には、当該運河における妥当なリスク・レベルを決める必要がある。妥当なリスク・レベルの決定法は図-2に示すように、4つの方法が考えられる。²⁾図において、リスク比較法(Comparative Risk Method)は、比較可能な他のリスク、例えば、

道路の交通事故によるリスク・レベルとの比較、といった方法である。リスク・バランス法(Risk Balance Method)は、A、B、2種類のリスクが考えられて、Aを減らすとBが増えるといった場合に、両者の和(合成リスク)を最小にする方策を選ぶ、といった方法である。リスク・便益法(Risk - Benefit Method)は、リスクの減少分を便益と考え、これに要する費用と比較して合理的なリスク・レベルを決める方法である。バックグラウンド・リスク法(Background Risk Method)は、自然界に存在するリスク・レベルを超過しないように設定する方法である。

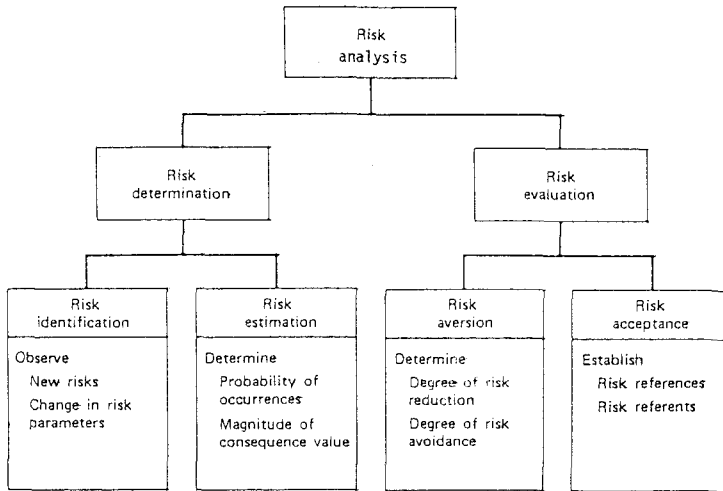


Fig. 1 A hierarchy of risk analysis terminology

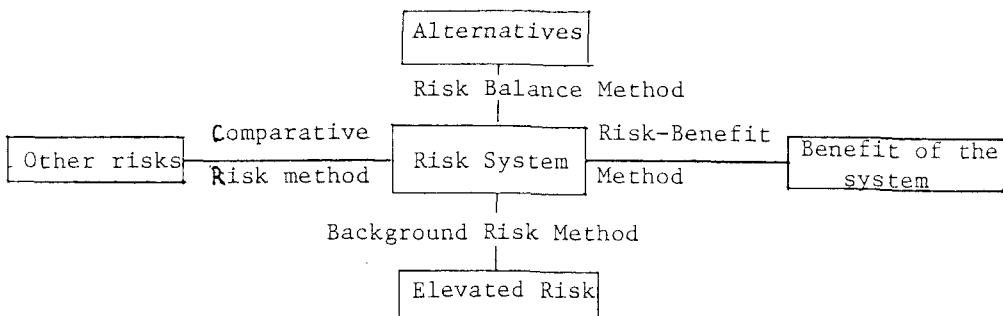


Fig. 2 Risk Evaluation Methods

3. 運河の航行リスク分析

2. ではリスク分析の一般的な内容を概述したが、本章では、これらリスク分析の具体的な方法について述べる。

3・1 航行リスクの同定

運河の航行リスクを同定する為の最初のステップは、1)運河の幾何学的形状、2)運河の自然条件、3)運河周辺の社会・経済環境、4)運河を利用する船舶（船種、船型、積荷etc）、5)運河の管理システム、等の諸条件を明確にすることである。次いで、過去の統計や視察により、考え得る危険の原因を列挙する。船舶の航行に関しては、既に海上保安庁で海難分類として挙げられている船舶事故が考えられる危険の要因である。これらは、1)衝突、2)乗上げ、3)転覆、4)火災、5)浸水、6)エンジン・トラブル、7)推進器故障、8)転舵器故障、9)その他、に分類できる。問題は、これらの原因が、誰に、どのような結果をもたらすかといった分析である。図-3は原因

(Causative Event)がエンジン・トラブルの場合について、どのような主体に如何なる結果が及んでいくかを示したものである。図中、Outcome の事象レベルでは、危険の受け手が特定化されず、Exposure の事象レベルで、個々の危険事象とその受け手が特定化されてくる。そして、Consequence のレベルで受け手の危険の具体的な内容が明らかにされる。リスク同定で重要な点は、図-3の例に示すように、内在する危険の種類とその危険が誰にとっての危険であるかを明らかにすることであり、原因事象とその直接的結果 (Outcome)との関係を明らかにすることではないという点である。

3・2 航行リスクの推定

先に述べたように、リスクの推定は、結果 (Consequence) の定量化と結果の発生確率の推定である。結果の発生確率の推定は、図-4に例示したように、同定された結果を頂上事象とするフォールト・ツリー分析を通じ、根源事象の発生確率を推定すること

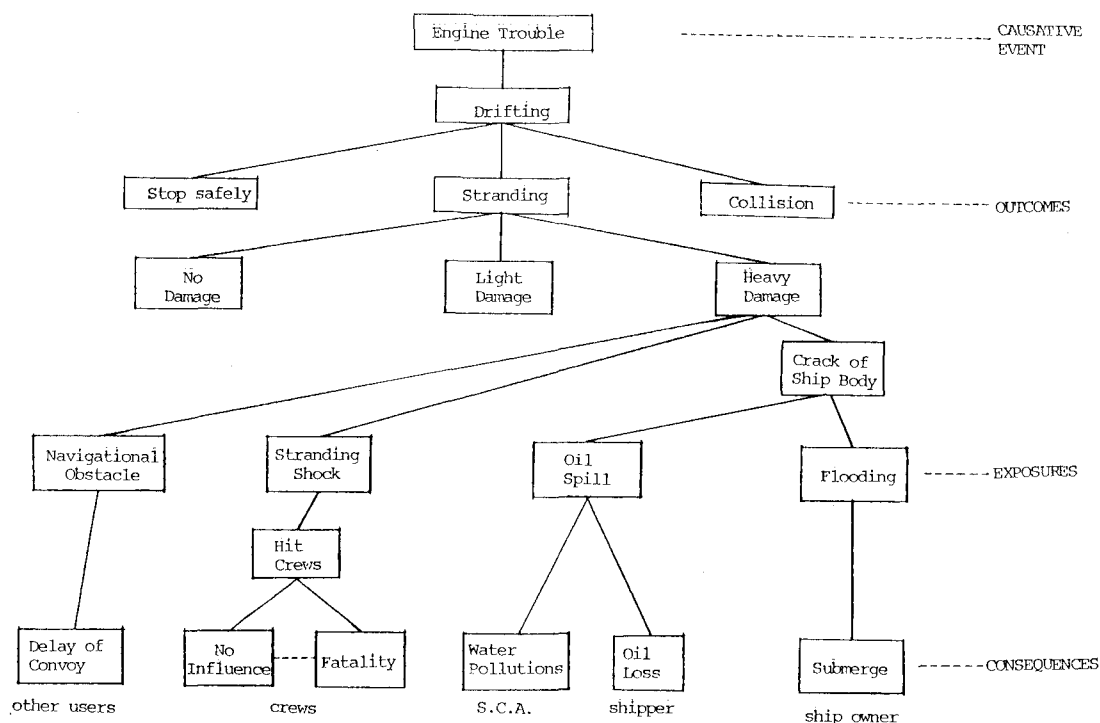


Fig. 3 Event Tree of Engine Trouble

によって計算できる。但し、この時点で重要なことは、原因事象の内、計画変数と関係する事象は、これを明確にする必要がある点である。何故なら、リスクを減らす方法は一般に2種類考えられ、1つは、結果の発生確率を減らす方法で他の1つは、結果の大きさを減らす方法である。例えば、図-4の例で、根源事象の発生確率は、運河の幾何学形状を変えれば変化させることが可能であるし、また、この確率が変えられないとしても、事故の処理を迅速に行う方策を考えていけば、航行時間の遅延という結果を減らすことができる。

3・3 リスクの評価

リスクの評価は、許容リスク・レベルが与えられている場合、現在のリスク・レベルがこのレベル以下でなければ、許容レベルまで低下させなければならず、各種の方策で最も費用のかからない方策を選択する。また、許容リスク・レベルが与えられていない場合は、先に述べた4つの方法のいずれかを用いるが、最も適した方法を選ばねばならない。図-5は、リスク減少度とその費用との関係を示したもので、 $\Delta R_i / \Delta C_i$ ($i=1, 2, \dots, m$) を最大にする基準は、費用-便益比最大化基準と同じ考え方である。

る。

4. ケーススタディ (確率許容値が与えられている場合)

本章では、運河の地点毎に許容リスク・レベルとして危険の発生確率が与えられている場合の例について述べる。運河の事故のほとんどが乗上げ事故で、

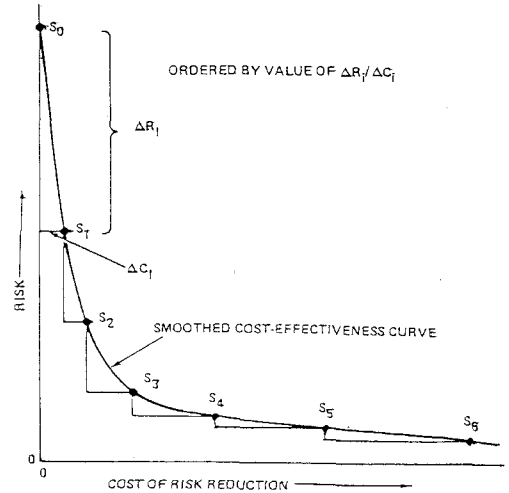


Fig. 5 Cost effectiveness of risk reduction ordered relationship for discrete actions S_i = Risk reduction action. ΔR_i = Change in risk for S_i , ΔC_i = change in cost for S_i .

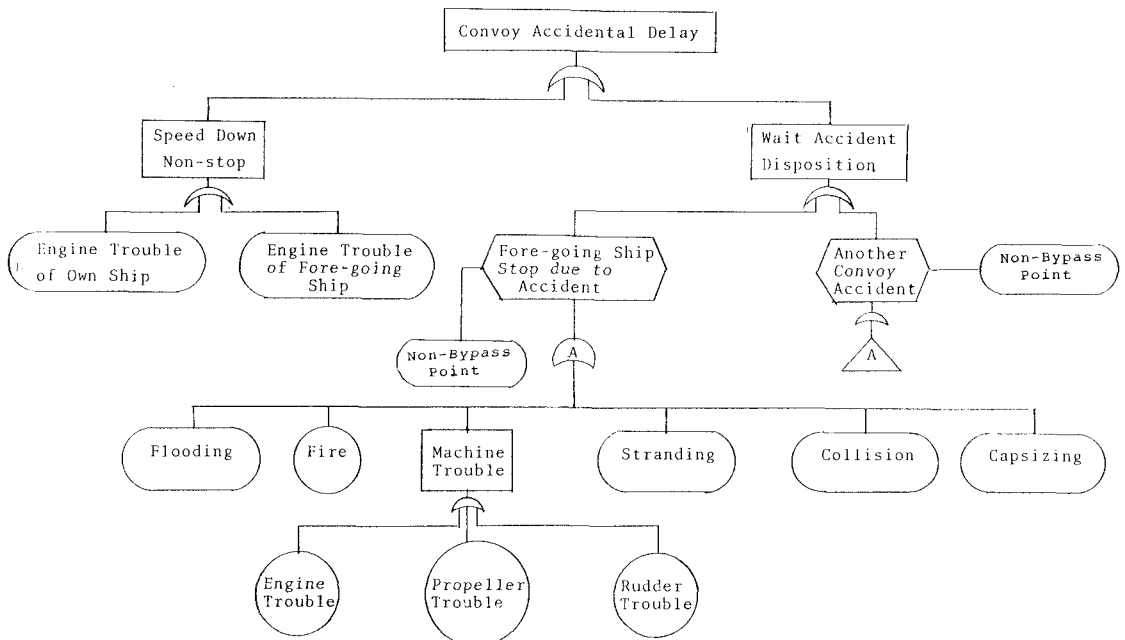


Fig. 4 F.T. of Convoy's Accidental Delay

運河の浅深・拡幅によってリスク・レベルを下げたい例である。その為に、運河の幅や深さが航行船舶との関係で乗上げ危険度に如何なる関係を持っているかを分析する必要がある。

4・1 運河における航跡モデル

図-6に示すように、運河の幾何学的な中心線に沿ってX軸、これと直行する方向にY軸を考える。船舶は狭水道や狭い内陸運河等を航行する場合、ヴィや他の目標物を視準し、出来る限り自船をある安全なコースに沿って走らそうとする。しかし、風や潮流等の外力によって、また、船舶に固有の機械特性や操船者の特質によって期待するコース通りに走らない。これを外部から観察していると船位がランダムに変動しているように見える。そこで、通行船舶の航跡は1つのランダムプロセスに従うという仮説をたて、運河内の進行方向の位置Xにおける船位Y(x)を

$$y(x) = \mu(x) + \sigma(x) \cdot u(x) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わす。但し、 $\mu(x)$ は平均船位、 $\sigma(x)$ は、船位の標準偏差、 $u(x)$ は標準化ランダム・プロセスである。 $u(x)$ は、日本の狭水道による観測では³⁾正規過程とみなせることが報告されているが、実際にS運河でのレーダー観測データによると図-7のように正規過程とみなしてよい。また、 $\sigma(x)$ は位置Xにおける運河の水水面幅を $w(x)$ とすると、

$$\sigma(x) = 6.58 + 0.092w(x) \quad (m) \quad \dots\dots\dots (2)$$

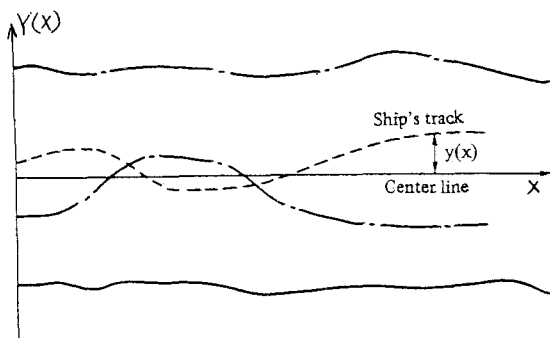


Fig. 6 Ships truck as a stochastic process

と同定できた。さらに $u(x)$ の自己相関関数 $r(\tau_x)$ は、

$$r(\tau_x) = \exp\{-(\tau_x / h_x)^2\}$$

$$h_x = 1.447 \quad (km) \quad \dots\dots\dots (3)$$

でよい近似が得られた。但し、 τ_x はX方向の任意の2点間の距離(Km)である。

4・2 座礁危険領域

(1) 運河直線部

船舶は自船の船位 $y(x)$ が、ある値を越えると進行コースからずれたと気が付き、船位を修正しようと操船する。今、 $y(x)$ で転舵による船位修正を開始したとする。しかし、通常、船舶に働く慣性力により転舵と同時に回頭せず、ある時間Tの間は船は流される。従って、運河のある位置 $y(x)$ で転舵したとしても、横風や横潮流の影響で時間Tの間は y_L なる距離だけ側方に流される。この量は次式で与えられる。

$$y_L = T(cV_W + V_C) \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し、 V_W ：横風速度、 V_C ：潮流速(m/s)、 c は、風圧係数である。

さて、 y_L なる偏位量だけ流された後、回頭が始まり針路が修正されるが、この時、船舶の回転中心を軸として船尾がふれる。このふれ量をキック(Kick)と呼んでいるが、キック量 y_B は船幅Bに対し、近似的に次式で与えられる⁴⁾。

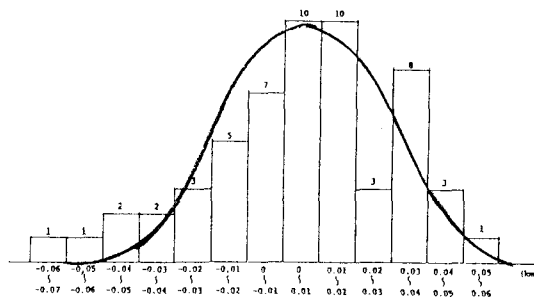


Fig. 7 An example of truck distribution

$$y_{\beta} = 0.9B \quad \dots\dots\dots (5)$$

船位を修正して安全な航行位置にもどろうとする場合、考えておかねばならないのは、図-8(b)に示すように、自船の吃水に応じた水面余裕距離 y_s である。これは、吃水を d とすると

$$y_s = \begin{cases} 0 & \text{for } d \leq h_0 \\ \text{アイと運河の吃水深さまでの距離} & \text{for } d > h_0 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

但し、 h_0 は、ブイの設置水深である。

(4) 式において、時間 T は自船の船型と航行速度とによって決まる追従性指数で次式で与えられる。

$$T = (15 \log(D_H) - 47) \sqrt[3]{D_H} / V \dots\dots\dots (7)$$

但し、 $D_{\text{全}}$: 総トン数、 V : 船速、である。

ところで、図一八を見て明らかなように、

$$y_{C1} = y_I + y_R + y_S \dots\dots\dots (8)$$

なる距離以上に運河側方に偏位すると、転舵しても横に流されて座礁するかパイに衝突してしまう。以後この運河の両側パイを基準する y_{C1} に相当する領域を座礁危険領域と呼ぶことにする。即ち運河のフ

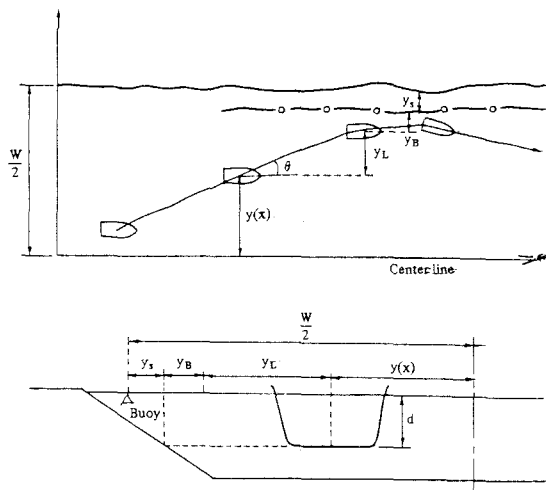


Fig 8 Components of risky zone

イ間距離を W とすると、

$$|y(X)| \geq W/2 - y_{c1} \dots\dots\dots (9)$$

なる領域以上に船位 $y(X)$ があるときは座礁の危険度が極めて高く、急角度の回頭や逆進等でこの領域を離脱する必要がある。この離脱行動を避航と呼ぶことにする。

(2) 運河屈曲部

運河の屈曲部では、運河の形状を中心角 ϕ なる円弧とみなすと、図-9に示すように、A点で転舵したとしても新針路をとるまでにある距離だけ慣性力によって進行してしまう。この距離の新針路の堤防端に直行する方向の成分を y_m とすると、 y_m は次式で与えられる。

$$y_m = \frac{V}{K\delta} \tan\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right) \sin(\theta + \phi) \dots\dots\dots (10)$$

但し、 K は旋回性指数、 δ は舵角、 θ はドリフト角で次式で与えられる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_L}{V_I} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

屈曲部では転舵して回頭を始めてから進行方向全面のバンクに対し、距離 y_m だけ近づいて新針路をと

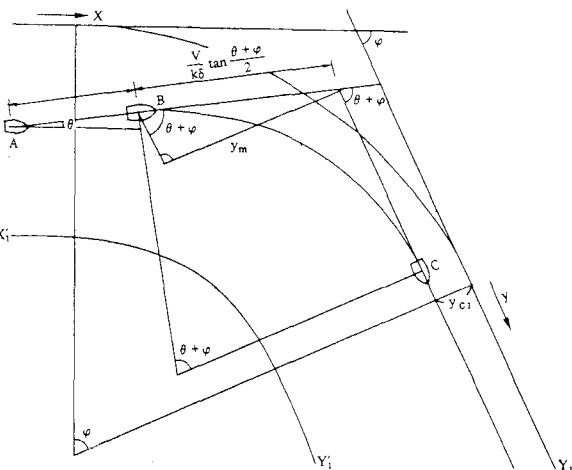


Fig. 9 Vessel's track at curving part

れることになる。従って、進行方向全面のバンクから

$$y_{c2} = y_{c1} + y_m \quad \dots\dots\dots (12)$$

なる範囲が座礁危険領域と考えることができる。

4・3 座礁確率の推定法

先に示したよう、運河を航行する船の航跡は正規確率過程 $y(X)$ に従う。この確率過程が任意の距離 ℓ の間に、先に定義した危険領域に入る確率 $P_c(k, d_c)$ は次式で与えられる。

$$P_c(k, d_c) = \frac{\ell}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma^2(x)^2}{2/h_x}} \cdot \exp\left(-\left(d_c^2/h_x^2\right)\right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

但し、

$$d_c = \frac{W}{2} - y_c \quad \dots\dots\dots (14)$$

で、 y_c は y_{c1} または y_{c2} である。また k は船型を表すパラメータである。

式(13)は、ある船型 k の船が所与の運河を距離だけ航行する間に危険領域に入る確率を表しており、実際に座礁する確率を与えるものではない。今、危険領域に入り込んだ船が避航に失敗する確率を P_F とすると、実際の座礁確率 P_G は

$$P_G = P_F \cdot P_c(k, d_c) \quad \dots\dots\dots (15)$$

で与えられる。 P_F は多分に Human error によって決まるので船型に無関係な確率を考え、対象運河の過去の事故統計から推定した。すなわち、過去に運河のある区間(長さ ℓ)を通行した全ての船の隻数を N 、そのうち座礁した隻数を N_G とすると、この比 N_G/N は近似的に式(15)の P_F を与えるものである。よって、推定値を $\hat{P}_F$ とすると

$$\frac{N_G}{N} = P_F \int P_c(k, d_c) f(k) dk \quad \dots\dots\dots (16)$$

但し、 $f(k)$ は通航船の船型構成の頻度から求めた確率密度関数。

式(16)で推定した P_F は将来も変化しないものと考え、将来の運河の形状や通航船の特性が与えられた時の座礁確率は、

$$P_G(k, d_c) = \hat{P}_F P_c(k, d_c) \quad \dots\dots\dots (15')$$

で与えられる。

式(15)は、運河の幾何学的構成を示す変数として、水面幅 W 、水深 D 、屈曲部の半径 R を含み、自然条件として、横風速 V_w 、潮流 V_c を含んでいる。更に、通航船の船舶特性として、船幅 B 、吃水 d 、追従性指数 T 、旋回性指数 K 、船速 V を含んでいる。

4・4 数値計算例

当該運河の各地点において許容座礁確率が与えられている場合について、許容値を満たす為に水路をどの程度改良すべきかを見る為に、式(15')を用いて現行より W を拡幅するとどうなるかを計算した例が図-10である。図中のナンバーは、運河の区間を

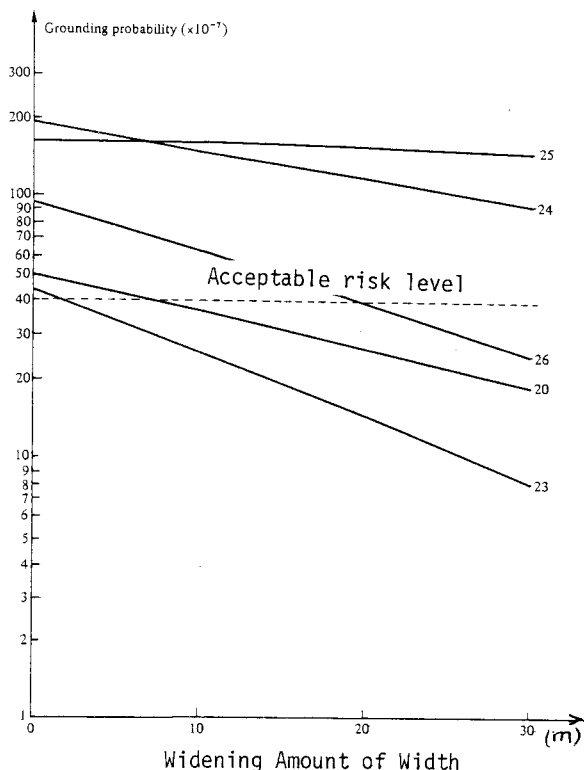


Fig. 10 Sensitivity with Width

示す番号である。図によると、区間26では約20mの拡幅を必要とすることがわかり、区間24、25ではかなりの幅の拡大を計画する必要がある。

図-11および図-12はそれぞれ屈曲部の半径または水深を変化させた場合の結果で、区間25ではほとんど効果がないことがわかる。図-10～図-12を通してある区間では、W、R、D、の変更のいずれもが有効である区間が存在する。これらの区間については、図-5に示すような費用有効度を検討して最も良い改修案を選定すればよい。

5. おわりに

本論文では、未だ確立されていない安全性に着目した内陸運河の改修計画法についてその手順の概要と簡単なケース・スタディについて述べた。もちろん、実施されたケース・スタディはここに報告した内容に止まらず広く、Risk-Cost-Benefit Analysisを含み、確率を減らす対策だけでなく各種の防災対策を含む広範なものであるが、データの公表に支障があるので、ここではその全容を紹介することはできなかった。また、取り上げた危険は座礁事故だけであるが、文献6)や7)に発表した方法を用いて衝突危険についても解析し、さらに、座礁および衝突事故後に発生するオイル流出等も危険のひとつとして解析しているが、これらについては次の機会に発表

する予定である。

参 考 文 献

- 1) W.D.Rowe(1977): An Anatomy of Risk, John Wiley & Sons, Inc.
- 2) A.V.Whyte & I.Buton (1980): Environmental Risk Assessment, 日本語訳、「環境のリスク・アセスメント」、環境科学センター編、産業図書
- 3) 井上欣三(1977): 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考察、日本航海学会論文集、No. 58, pp.103~115
- 4) 飯島幸人・本田啓之輔(1973): 港湾水路の幅員について、日本航海学会論文集、No. 50, pp.91 ~ 103
- 5) 志波久光(1971): 舵と旋回、成山堂書店
- 6) 黒田勝彦・喜多秀行(1983): 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
- 7) 黒田勝彦・喜多秀行(1984): OSHICOP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

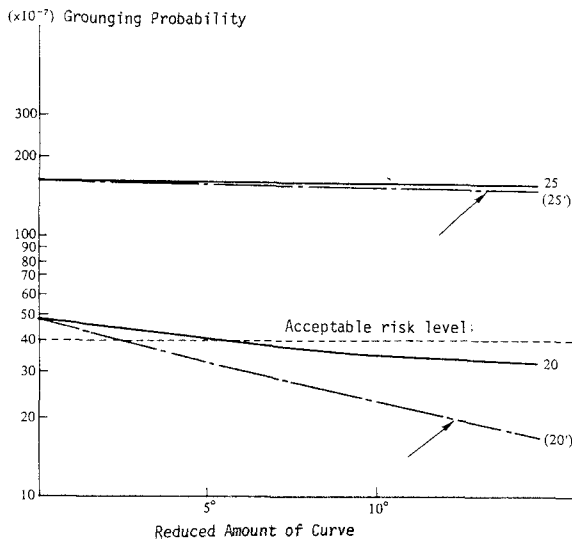


Fig. 11 Sensitivity with Curvature

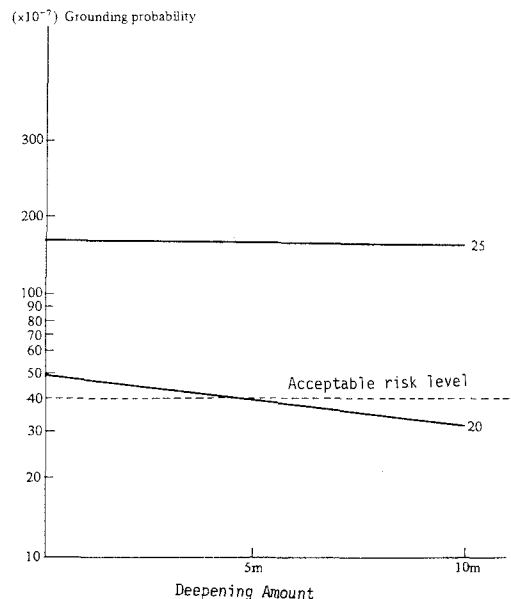


Fig. 12 Sensitivity with Depth