

内陸運河の航行安全性評価と改良計画法

Safety Improvement Planning of Canal Based on Availability Measure

黒田勝彦 (Katsuhiko KURODA) *

吉田哲生 (Tetsuo YOSHIDA) **

芝原靖典 (Yasunori SHIBAHARA) ***

As presented in the Report I (1985) the risk analysis is the basis of the safety improvement planning of a canal. This paper reports the procedure of planning of the safety improvement of a canal by a practical example of S-canal. Modeling of a collision risk is also presented to demonstrate the risk estimation process in the whole analysis while the previous report presented the modeling process of the grounding risks in the canal. A measure for safety evaluation of whole canal is also proposed and discussed.

1. まえがき

著者らは第一報(1985)において、内陸運河の航行安全を主目的とする改修計画案の作業がリスク分析に基づいて実施可能であることを示した。即ち、(1) 運河における航行リスクの同定、(2) 航行リスクの推定、(3) リスクの評価、の主要な3つのステップを経て行うことができることを示した。ここで困難なステップは(2)の航行リスクの推定であり、当該運河の地形・地質、風及び潮流等の自然条件、航行船舶の船型、船種等の船舶条件、航行船舶の交通量、航行速度等の交通条件及び運河周辺の

社会・経済条件を考慮に入れてリスクの種類ごとにそれを推定する操作型モデルを作成しなければならない。本報告は第1報で報告しなかった内陸運河での衝突事故分析を中心にS運河での航行安全調査の概要を示し、この種の調査の進め方の参考に供したい。

2. S運河の調査概要と手順

図-1はS運河の航行安全対策調査の全体の調査内容の流れを図示したものである。図中の番号は調査のフェイズを示したもので、先ず、現況の運河の地形・地質条件、自然条件、交通流条件、停泊地条件、安全対策状況、運河周辺の社会・経済条件を調査すると共に、当該運河の利用船の船長に危険を感じる箇所、その理由、管理・運営上の問題等をアンケート調査した。次に、当該運河での過去の事故統計及び他の運河の事故統計を収集し、当該運河の

* 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 工修 三菱総合研究所 第一社会
公共システム室

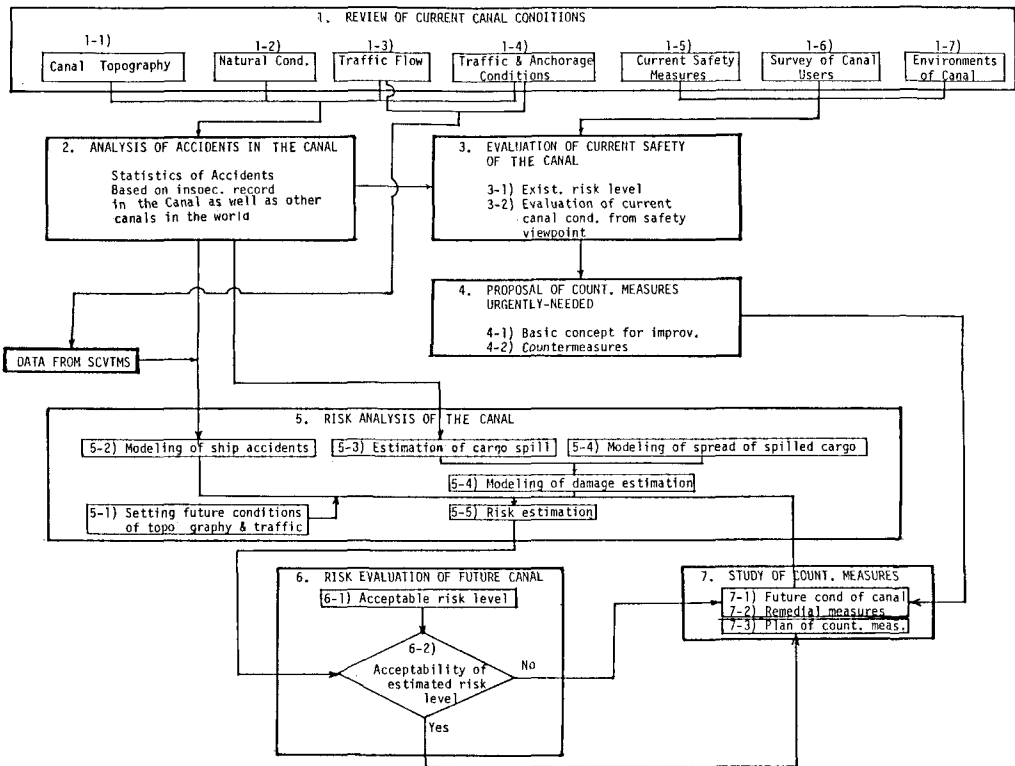


図1 運河の航行安全対策調査のフロー

航行危険性の概略を把握し問題点を抽出する。この検討によって緊急に実施すべき対策と長期間に亘る対策とを分離する。次に、長期に亘る改良案を策定する為の分析がフェイズ5のリスク・アナリシス（狭義の）で、フェイズ6及び7で最適代替案を選定する。第一報では、上図のフェイズ5～7の方法論を中心に報告した。今回は運河における船舶衝突危険度の推定モデルの作成法について述べると共に、運河をシステムと見做した時のトータルの安全性を評価する方法について述べる。緊急に実施すべき対策とは、現状の運河および管理体制、事故処理体制、航行援助体制の内、現況の運河の航行危険度を減少せしめるのに必要で比較的すみやかに講じられる対策をいい、(1) 航路標識の整備、(2) 通信手段の改善、(3) パイロットの教育訓練、(4) 水深の不十分な地点の維持浚渫、(5) 運河通航船団の停泊

地からの編成方法の改良、(6) 通関手続地点の改善、(7) エスコート・タグボートの整備、(8) 事故処理資機材の整備、(9) 事故処理班の編成と教育・訓練、(10) 海難統計の継続及び調査事項の追加、(11) 統計データの管理と分析班の編成、等の措置で、大規模で長期に亘る工事又は設備の新設等を必要としない改良対策を意味している。これらは予備的な現状リスクの分析によってなされるものである。

3. 衝突危険度の推定モデル

運河における船舶同士の衝突事故は、(1) 先行船が何らかの原因で減速又は停戦しているのに気付くのが遅れて追突する、(2) 水路交差部で出会いがしらに衝突する、(3) 両方向水路で片方が航路を離脱して衝突するの3つの場合が考えられる。図2と

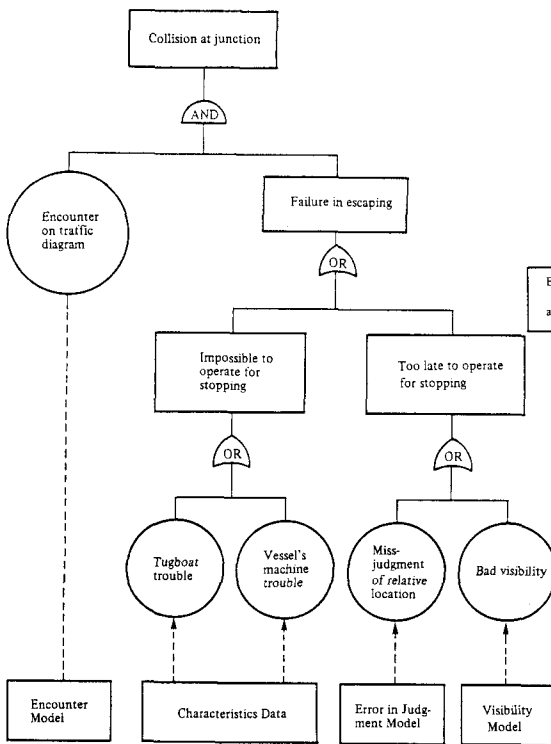


図2 交差点での衝突事故のフォールト・ツリー

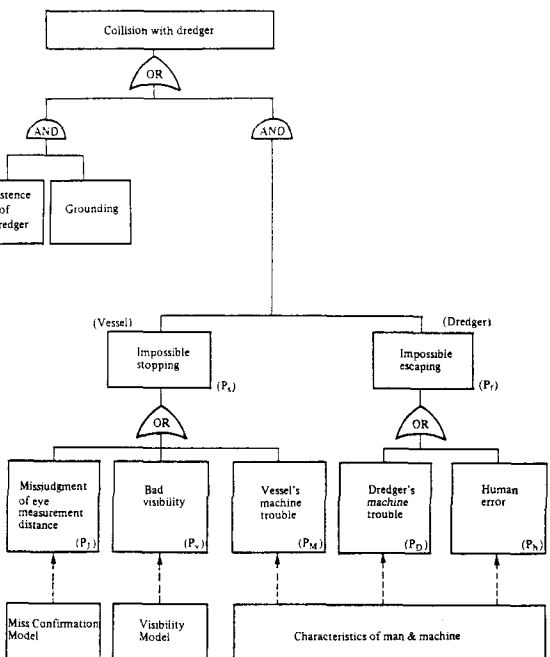


図3 作業船との衝突事故のフォールト・ツリー

図3はこのような衝突事故のモデルを作成する為の基本となるフォールト・ツリーを示したものである。ここでは紙数の都合から水路交差点での行き違い時の出会い衝突確率のモデル化の考え方を示す。

スエズ等の内陸運河では全長が長大になり両方向交通を同時に流せる河幅を確保することが困難なこと、運河の利用効率を高めること等の観点から、行合い船又は船団が待避水路に入って一方の船又は船団の通行を待つというシステムがとられる場合がある。この場合、図4に示すように、待避水路側の船Bは通行船団の最後尾船Aが交差点Pを通過した時点で本水路に進入する。しかし、船Bは自船と相手船Aとの船間距離を誤測し停船動作が遅れてA船が交差点を通過する以前に本水路に進入してしまう場合がある。このような状況は、図2のF、T、に示すように、運河航行スケジュールの面から、A船とB船が出会い、且つ、出会った条件の下で衝突回避に失敗する事象として定義できる。以下、この事象の生起する確率の推定法について述べる。

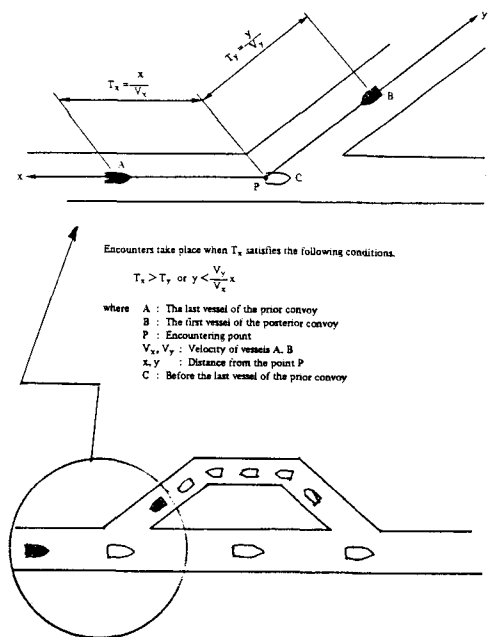


図4 水路交差点での出会い状況

図4で、交差点Pを原点にx軸y軸を図のように水路のセンターに沿って考える。本水路を通過する船団の最後から2番目の船Cが点Pを通過した時の船A、Bの位置が点Pから夫々、距離xおよびyとする。この時、夫々の船速を V_x および V_y とすると点Pで両船が出会うのは $y \leq (V_y/V_x)x$ を満たす場合である。従って、船CがP点を通過した時点でのA、B両船の位置(x, y)の同時確率密度関数を $f(x, y)$ とすると、両船の出会い確率 P_E は次式で与えられる。

$$P_E = \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{V_y}{V_x}x} f(x, y) dy dx \quad (1)$$

確率密度関数 $f(x, y)$ は、船位xとyが統計的に独立であることから、船Cが点Pを通過した時点での船A、船Bの船位分布 $f(x)$ 、 $f(y)$ を過去のデータから調べることによって、

$$f(x, y) = f(x) * f(y) \quad (2)$$

で与えられる。

ところで、船Bが船Aと出会った上で、船Aに衝突するのは、図2に示したように交差点直前で停止に失敗する時で、これらは停船制動距離以前に制動をかけたにも拘らず制動しなかったか、又は、制動開始の時期が遅れてA船が通過する以前に交差点に進入してしまう場合かのいずれかである。前者はエスコートタグボートがトラブルを発生して制動が聞かない場合(事象 F_1)か、又は、本船Bの機関故障(事象 F_2)かのいずれかが発生した場合で、それぞれの発生確率 P_{F1} 、 P_{F2} は、船舶の機関故障統計より、

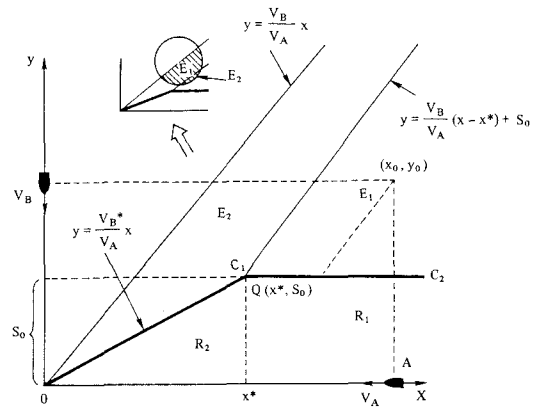
$$P_{F1} = P_{F2} = 2.98 \times 10^{-5} \quad [\text{回}/\text{km}]$$

と推定されている。従って、船舶Bの必要停止距離 S_0 の間で機関故障する確率は $P_F \cdot S_0$ で与えられる。以上より、停船動作に失敗する確率 P_M は、

$$P_M = (P_{F1} + P_{F2})S_0 - P_{F1}P_{F2}S_0^2 \quad (3)$$

で与えられる。

次に、制動開始の遅れは、船Bが交差点までの距離を誤認する(事象 H_1)か又は、視界不良で距離を誤認する(事象 H_2)のいずれかである。



S_0 : Critical Distance for Stopping of Ship B

x^* : ($= \frac{V_A}{V_B} S_0$): Distance between ship A and Point P that ship A can avoid collision with ship B when ship B starts braking at Point Q.

V_B^* : Ship B's speed in stopping action.

(x_0, y_0) : The coordinates of the last transit A of a Northbound Convey and the first transit B of a Southbound Convey when the second to last transit of the Northbound Convey sails at Point P.

図5 衝突回避限界域

図5は船Bが位置 x_0 にあって相手船Aが、位置 y_0 にあって両船が交差点Pに向って航行している時の相対的位置関係を示している。B船が交差点に向っており、停止必要距離 S_0 より交差点近くに進入しているのに目視距離 y_m がまだ $y_m < S_0$ と判断していると制動開始が遅れて、相手船Aが交差点を通過する以前に船BがP点に進入してしまう。このような事象が発生するのは、視認距離がばらつくからである。実距離yの時に視認距離 y_m と判断する確率密度関数をとすると、衝突確率は (x_0, y_0) の領域によって図に示すように2通りの事象の確率として求められる。

$$P_{c1} = \text{Prob}[y_m \geq S_0 / y = S_0, (x_0, y_0) < E_1] * \text{Prob}[(x_0, y_0) < E_1] \quad (4)$$

$$P_{c2} = \text{Prob}[y_m \geq y^{**} / y = y^{**}, x = x^{**}, (x_0, y_0) < E_2] \text{Prob}[(x_0, y_0) < E_2] \quad (5)$$

上式の中で初期の相対位置 (x_0, y_0) が領域 E_1 又は E_2 に存在する確率は、(1)式でその考え方を

示した。視界 l が不良の場合は当然のことながら、実距離 y を目視によって測る距離 y_m は精度が低下し、式(4)、(5)で示した誤判断の確率が增大する。しかし、視界不良時の実距離と視認距離の対応を示すデータは見当たらないので、本研究では、視界が停止必要距離 S_0 以下になる確率と考え、 (x_0, y_0) の領域に対応して衝突確率を

$$P'_{c1} = \text{Prob}[l \leq S_0, (x_0, y_0) \in E_1] \quad (6)$$

$$* \text{Prob}[(x_0, y_0) \in E_1]$$

$$P'_{c2} = \text{Prob}[l < S_0, (x_0, y_0) \in E_2] \quad (7)$$

$$* \text{Prob}[(x_0, y_0) \in E_2]$$

として求めた。図6は参考までに、視界が良好な場合に日本で計測された実距離 y と平均目視距離 $\bar{y}_m$ との関係を示したものである。

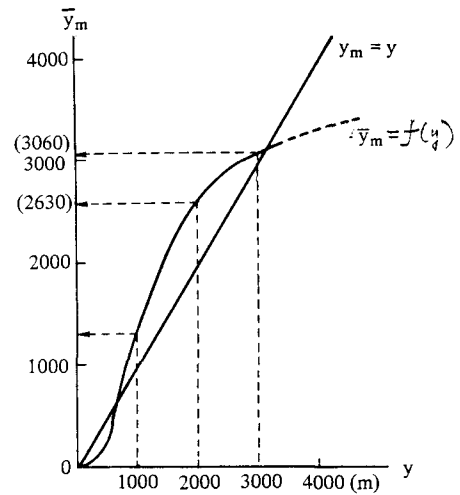


図6 平均目視距離と実距離の関係

4. 運河のシステム・アヴェイラビリティ

第1報及び本報告の3. で述べた事故率推定のモデルは、運河の特定部におけるものであり、運河全体を通しての安全性を評価することは出来ない。当該運河が他の運河ないしは水道等における安全性と比較してどの程度のレベルであるかを定量的に示す為には部分的な事故率ではない尺度の確率が必要である。そこで運河の地形・地質条件と潮流、風等の自然条件が同じ区間を1つのユニットとして運河全体を分割する。次に、既に述べた事故率推定モデルを各ユニットに適用し一隻がユニット i を通航する間の事故率 P_i を算定する。 P_i は i ユニットで考えられる事故モード j の発生確率 P_{ij} を用いて次式で求められる。

$$P_i = \sum_{j=1} P_{ij} - \sum_{j=1} \sum_{l > j} P_{ij} P_{il} \quad (8)$$

P_i はユニットを一隻が通過する場合に期待される事故回数【回/隻】を表わしているから、 i ユニットの時間交通量を V_i とすると単位時間当りの事故発生率 λ_i は

$$\lambda_i = P_i V_i \quad [\text{回/時}] \quad (9)$$

で与えられる。

さて、各ユニットでの事故の発生は経験的にも非常に希であり、ポアソン過程に従っていると仮定することができる。さらに、 i ユニットでいずれかのモードの事故が発生するとそのユニットにおける交通処理機能が直ちに中断されるものとする、十分長い時間間隔 T におけるユニットの交通処理機能が確保される信頼度 $R_i(T)$ は

$$R_i(T) = \text{EXP}[-\lambda_i T] \quad (10)$$

で近似できる。

一方、一度び i ユニットでモード j の事故が発生した場合、これを処理して通航機能を回復するのに必要な時間を τ_{ij} とすると i ユニットで何らかの事故が発生した場合に期待される修復時間 τ_i は

$$\tau_i = \sum_{j=1} P_{ij} \mu_{ij} + t(d_i) + \varepsilon \quad (11)$$

で与えられる。ここに、 μ_{ij} は i ユニットのモード j の事故の処理に要する平均時間、 $t(d_i)$ は修復基地から事故現場へ処理船が到着するに要する時間で距離 d_i の関数である。 ε は事故現場までの航行時間や事故処理時間を含む全ての時間のばらつきを考慮したランダム項である。このランダム項の影響で τ_i は一般に確率変数として取扱う必要があるが、この確率度関数を $\phi(\tau_i)$ とする。 i ユニットで所定の時間 τ_i^* 以内に事故が処理されて交

処理機能が回復する確率を i ユニットの保全度 (Maintainability) $M_i(\tau_i^*)$ と定義すると、

$$M_i(\tau_i^*) = \int_0^{\tau_i^*} \phi(\tau_i) d\tau_i \quad (12)$$

で与えられる。 τ_i^* はスケジュール頻度によって決まる i ユニットの船団到着時間間隔をとると、 $M_i(\tau_i^*)$ は i ユニットの船団に待ちを生ぜしない確率となるがこれを高くする為には修復基地を密度高く配置したり、事故処理能力を高める必要があるので初期投資、維持・管理費が高くなる。

さて、 i ユニットの交通処理機能がある使命時間 T の間で、事故が幾度発生しても τ_i^* 時間内に修復され T の期間中交通処理機能を保持している確率を使命アベイラビリティ (Availability) と定義する。これは修復系の信頼度 (Reliability) と解釈される。今の場合、 i ユニットの使命アベイラビリティを $AM_i(\tau_i^*, T)$ とすると

$$AM_i(\tau_i^*, T) = [R_i(T)]^{1-M_i(\tau_i^*)} \quad (13)$$

で与えられる。式 (13) は、事故が発生しない確率、即ち信頼度 $R_i(T)$ が高ければ高いほど、又、事故が発生したとしても所定時間 τ_i^* 以内に修復されている確率、即ち、保全度が高ければ高いほど i ユニットの期間 T 内における機能保持確率が大いことを示している。

式 (13) を基に運河全体のシステム・アベイラビリティ、 $AM(T)$ は、各ユニットが直列連結とみなせる場合、次式で与えられる。

$$AM(T) = \prod_{i=1}^m [AM_i(\tau_i^*, T)] \quad (14)$$

但し、 m はユニットの数を示している。

5. S 運河での適用例

図 7 は S 運河に適用する為運河を同一条件のユニットに分割したシステム同定図である。この運河には、NO. 19, 30, 32 に修復基地がある。したがって、保全度の計算には各ユニットから最も近い基地からの処理班の出動を考えた。各ユニットにおける

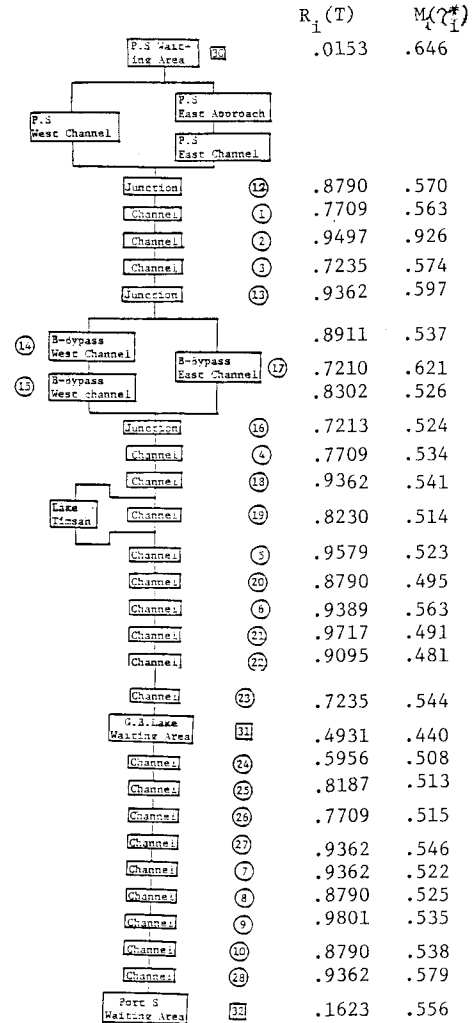


図 7 S 運河のシステム同定

$R_i(T)$, $M_i(\tau_i^*)$ を図 7 の右欄に示したが、この数値計算から直ちに判断できるのは、各ユニットの保全度が極めて低く修復能力の改善を緊急に行う必要があることがわかる。

6. 参考文献

黒田、吉田、伊藤、村上 (1985) : リスク・アナリシスによる内陸運河の改修計画法、土木計画学研究講演集 No. 7