



第126回日本航海学会 --- 海上交通工学研究会

IALAのリスク管理ツールボックス

IALA Risk Management Toolbox

IWRAP Mk II

理論的背景について
Theory behind the software

一般財団法人: 日本航路標識協会

Japan Aids to Navigation Association
2012年5月

1

IWRAP とは IALA Waterways Risk Assessment Program

オリジナルとなったプログラム

GRISK: GateHouse Risk Assessment Program

OR

IMOの FSA Methodを支援するツールとして開発
GRACAT: Grounding And Collision Analysis Toolbox

OR

IMOの FSA(総合的安全評価): Formal Safety Assessment

1988年:パイパー-アルファ-事故

2002年:ガイドライン(MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392)

2005年:MSC80 改訂-エキスパートグループの設置

複数の評価プログラムの一貫性などを研究

2006年:IMO : NAV52でIALAのリスク分析ツールを紹介

2010年:SN.1/Circ.296 "Degree of Risk Evaluation" IALAツールに言及

2

SOLAS条約 第13規則-1 沿岸国の義務
船舶交通量とリスクの度合いに応じ航路標識を提供する
To Provide Aids to Navigation in accordance with Traffic Volume and Degree of Risk

IALA勧告O-134: 港湾及び狭水道におけるリスク管理ツール

IALA Recommendation on IALA Risk Management Tool
for Ports and Restricted Waterways

Ver.1:2005年12月:USCGが開発した定性的分析ツールPAWSAが
ベースとしたもので、デルファイ法を活用した方法)

1990年代:エクソバルデス事故を受けたVTS整備計画の中で
PAWSA(Ports and Waterway Safety Assessment)が開発された。

同時に、定量的分析ツールとしてIWRAP (Ver.0)の開発と評価の結果、
2007年からは第二世代のIWRAP MkIIの開発が始まる。

Ver.2:2008年 5月(PAWSAのバージョンアップに併せて改訂)

Ver.3:2009年 5月(IWRAP MkIIのリリースに合わせて全面改訂)

IWRAP(Ver.0)開発の経緯: 1974年の藤井等、Macduffによる座礁と衝突の確
率的発生の研究、Canadian Coast GuardのMSD(Minimum Safe Design)の美
用化などに併せてデンマーク工科大学を中心に研究。

3

理論的背景

IWRAP は航路において衝突と座礁の頻度を確率的に推定するソフト
ウェアツール。ソフトウェアの背景となっている理論は以下の方々の研究
による。

* 藤井弥平氏 : 電子航法研究所(1974~1998)

* MacDuff : デンマーク工科大学(1974)

* Petersen. デンマーク工科大学(1995)

* Friis-Hansen.デンマーク工科大学(1999-2008)

IWRAPが取り扱うインシデントの種類

Types of incidents in IWRAP

- 正面衝突及び追い越し衝突: Head-on and overtaking collision
- 交差、合流及び屈曲部の衝突: Crossing, merging & bend collision
- 自由航行水域の衝突(航路以外): Area collision (ships not on routes)
- 機関推進中の座礁: Powered grounding
- 漂流による座礁: Drifting grounding

4

基本的な考え方

衝突と座礁の確率的な分析

> 藤井らとマクダフ(1974)

1974年頃から海域のリスクに基づく座礁と衝突をシステムティックな分析方法を研究。
マクダフはドーバー海峡で発生した座礁と衝突事故を研究し、理論的な発生確率を計算。
ここでは航行可能な狭水道又は海域に船舶がランダムに分布していると想定。

> 幾何学的な確率

幾何学的に分布している船舶が船舶間において他の船舶を意識することなく航行
しているということを前提に衝突候補を求めることから、この確率は幾何学的確率とば
れる。座礁と衝突の既知の事例から、幾何学的な確率とリスク、事故の候補を予測。

“補正ファクター”としての人的要因である因果確率(Causation Probability) P_c という概
念を導入。

> 因果確率

“補正ファクター”: 座礁、衝突が起こる可能性のある状況下で二つの要素を考える。
船舶の性能と当直航海士の能力が回避能力に直結する。“因果確率”はこの二つを数
学的にモデル化したもの。マクダフの研究では、交差する衝突の場合の因果確率を
 1×10^{-4} 、針路が正反対の正面衝突におけるそれを 5×10^{-4} としている。

$$\lambda_{col} = P_c \times N_C$$

衝突頻度 = 因果確率 × 幾何学的衝突の候補

5

因果ファクター

因果ファクターとは、他の船舶との衝突あるいは座礁するコースを航行
中の船舶が航海ワッチ中の航海士が回避操作を行わない(できない) 確率。

場 所	P_c [$\times 10^4$]	事故の形態	参考文献
ドーバー海峡	5.18	分路通航なしの正面衝突	
	3.15	分路通航ありの正面衝突	
オアソノ海峡	0.27	正面衝突	カールソン(デンマーク工科大)
日本の海峡	0.49	正面衝突	藤井(電子航法研究所)
	1.23	交差衝突	藤井と水城(電子航法研究所)
ドーバー海峡	1.11	分路通航なしの交差衝突	マクダフ
	0.95	分路通航ありの交差衝突	マクダフ
ジブラルタル海峡	1.2	追い越し衝突	COWIコンサルタント社
日本の海峡	1.10	追い越し衝突	藤井と水城 ^[2]
グレートベルト海峡	1.30	レーン屈曲部での衝突	ペデルセンら ^[3]
デンマーク海域	3.0	正面、追い越し、交差の各衝突	COWIコンサルタント社 原田及び化学物質の流出2007

場 所	P_c [$\times 10^4$]	事故の形態	参考文献
日本の海峡	[1.0, 6.3]	衝突と座礁	藤井(電子航法研究所)
	1.58	衝突と座礁	藤井と水城 松井(電子航法研究所)
ドーバー海峡	1.55	分路通航なし	マクダフ
	1.41	分路通航あり	マクダフ
ジブラルタル海峡	2.20		COWIコンサルタント社
デンマークのオアソノ海峡	2.00		カールソン

6

正面衝突(Head-on collision)追い越し(Overtaking collision) における幾何学的衝突候補数を求める

(Number of geometric collision candidates)

$$N_G^{head-on} = L_W \sum_{i,j} P_{col,i,j}^{head-on} \frac{V_{ij}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} (Q_i^{(1)} Q_j^{(2)})$$

基本式(追越しの場合は方向と
相対速度を変更したもになる)

L_W : 水路の長さ(セグメント当たり)、 L_C の長さとして入力する

$Q_i^{(1)}, Q_j^{(2)}$: 単位時間当たりの船舶種別ごとの通航隻数

$V_i^{(1)}, V_j^{(2)}$: 正面衝突の関係にある船舶i,jの速度

$V_{ij} = V_i^{(1)} + V_j^{(2)}$: 相対速度、(1), (2) は船舶の航行方向

$P_{col,i,j}^{head-on}$ は、2隻の船舶が正面で出会う場合の衝突確率



7

正面衝突: 交通が正規分布であるとしてモデルを単純化する Head-on collision: Simplified model Normal distributed traffic

$$P_{col}^{head-on} = P \left[\frac{B_1^{(1)} - B_2^{(2)}}{2} < -x_j^{(2)} + \frac{B_1^{(2)} - B_2^{(1)}}{2} (1 - \mu_1 \mu_2) + \frac{B_1^{(1)} - B_2^{(2)}}{2} > -x_j^{(2)} - \frac{B_1^{(2)} - B_2^{(1)}}{2} \right]$$

$$= P \left[x_j^{(2)} + y_j^{(2)} < \frac{B_1^{(1)} + B_2^{(2)}}{2} \right] - P \left[x_j^{(2)} + y_j^{(2)} < \frac{B_1^{(2)} + B_2^{(1)}}{2} \right]$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{x_j}(x_j) f_{y_j}(y_j) dx_j dy_j$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f_{x_j}(x_j) [F_{y_j}(-x_j + \bar{B}) - F_{y_j}(-x_j - \bar{B})] dx_j$$

$f_{x_j}^{(2)}(y)$ と $f_{y_j}^{(2)}(y)$ を、それぞれ平均と分散の分布パラメーター (μ_2, σ_2) 及び (μ_y, σ_y) を持つ正規分布であるとすれば、式(4.3)は次のように書きかえることができる。

$$P_{col}^{head-on} = \Phi \left(\frac{\bar{B}_y - \mu_x}{\sigma_y} \right) - \Phi \left(\frac{\bar{B}_y + \mu_x}{\sigma_y} \right)$$

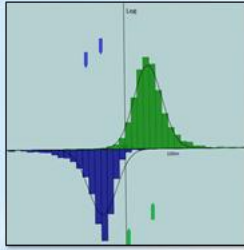
$\Phi(x)$: 標準正規分布関数 $\mu_x = \mu_1^{(1)} + \mu_1^{(2)}$: 2隻の船舶が航行する期間の平均距離

$\sigma_y = \sqrt{(\sigma_1^{(1)})^2 + (\sigma_1^{(2)})^2}$: 結合した正規分布

$\bar{B}_y = \frac{B_1^{(1)} + B_2^{(2)}}{2}$: 船舶の幅の平均値

8

船舶の分布 (Ship distributions)



船舶交通の分布をえるために、航路に時間的インターバルを設定して、ヒストグラムを得る。閉じた解の式とするための確率関数をこのヒストグラムにフィットさせる。正規分布はよく一致することが知られている。
 例えば、平均値(期待値) μ を330m、標準偏差 σ を230mに設定した場合、50mの幅の船舶がレグに接する ($X=0$) 確率は、

$$P(x < -50) = 0.03, P(x < 50) = 0.08$$

$$0.08 - 0.03 = 0.05$$

$$P(-50 < x < 50) = 0.05$$

$X=330$ となるときの確率:

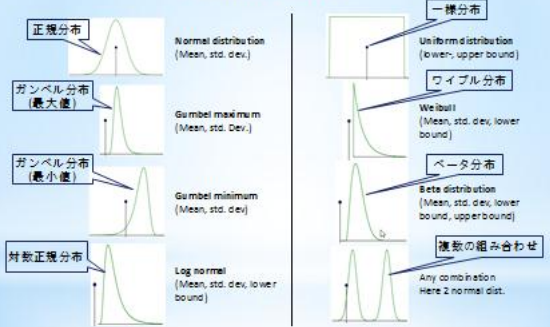
$$P(x < 330) = 0.41, P(x < 430) = 0.59;$$

$$0.59 - 0.41 = 0.18$$

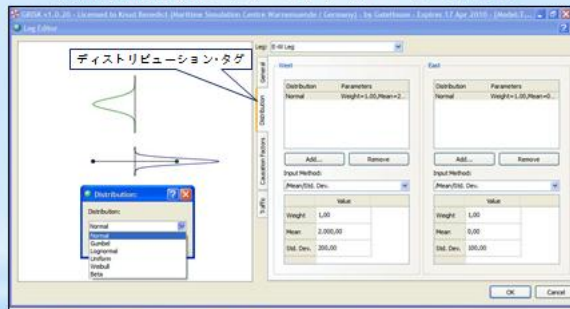
$$P(330 < x < 430) = 0.18 \text{ として衝突確率が求まる。}$$

交通の分布を特定の確率分布として定義できない場合は、数値積分などの方法で近似計算をすることになるので、IWRAPでは、これを選けるためいくつかの確率密度関数を組み合わせてベストフィットが得られるようにしている。

IWRAPで使われる分布 Distributions in IWRAP



交通分布の入力: レグ・エディター・ツール画面



この図では正規分布の入力の例を示す
 Mean: レグ(航路中心)からの平均距離
 Std.dev.: 標準偏差、ベルカーブの幅
 Weight: 複数の分布を入力する場合、各分布の重み付けを例[0.7:0.3]と入力

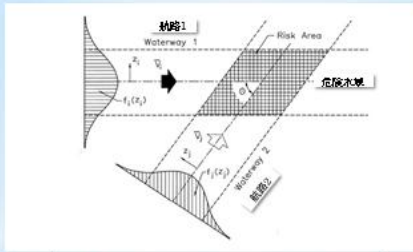
事例1-正面, 追越し衝突 Head-on (Overtaking) collision

レグを1本作り、各レーンに交通分布、隻数などを入力する。航路幅、隻数を入れ替えて、再試行しながら、結果を比較検討する。

Entering a New Leg

Traffic Distribution Editor Screen

交差衝突(Crossing collision) における幾何学的衝突候補数



船舶-船舶衝突の危険となるエリアを持つ交差水路

図のように「危険水域」は出会いの確率とほぼ無関係に危険な水域が決まる。航路幅に制限があれば、船舶交通の広がりの分布も大ききは影響しない。

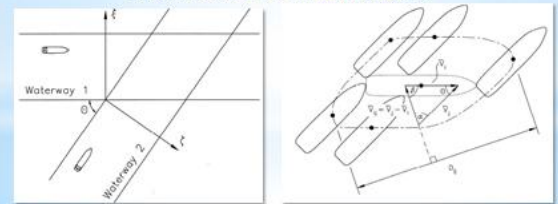
交差衝突の理論 (Theory: Crossing collision)

$$N_G^{crossing} = \sum_{i,j} \frac{Q_i^{(1)} Q_j^{(2)}}{V_i^{(1)} V_j^{(2)}} D_i V_j \frac{1}{\sin \theta} \quad \text{for } 10^\circ < |\theta| < 170^\circ \quad (4.6)$$

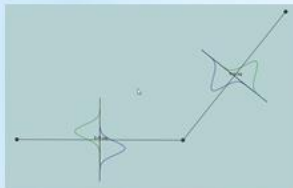
$$V_r = \sqrt{(v_i^{(1)} - v_j^{(2)})^2 + 2v_i^{(1)} v_j^{(2)} \cos \theta} \quad \text{は船舶間の相対速度}$$

交差衝突の頻度は、2航路間の交差角度が大きく影響する。

2隻の船舶が衝突するときの直径 D_{ij} を決定する



事例2 屈曲部における衝突 Bend collisions



事例3 交差衝突 Crossing collisions



水路1を航行する船舶iが水路2を航行する船舶jに衝突する確率 $P[i \text{ vessel} \rightarrow \text{vessel } j \text{ collision}] = \frac{D_i D_j}{D_i}$

水路2を航行する船舶jが水路1を航行する船舶iに衝突する確率 $P[j \text{ vessel} \rightarrow \text{vessel } i \text{ collision}] = \frac{D_i D_j}{D_j}$

船舶対船舶衝突の単位時間当たりの頻度 $\lambda_{ship-ship} = P_{C1} N_{C1}$

与えられた船舶どうしの年間の衝突の頻度 $\lambda_{ship-ship}$ から、時間 Δt の間に衝突が起こる確率はポアソン過程中の現象であると考えられる。

$$P[\text{Collision}] = 1 - \exp[-\lambda_{ship-ship} \Delta t] \approx \lambda_{ship-ship} \Delta t \quad \text{for } \lambda_{ship-ship} \rightarrow 0$$

座礁の理論上の分類

Theory: Grounding / Categories



カテゴリ-I: 常用速力で直線を航行する船舶。事故原因はヒューマン・エラー・船舶の障害(推進・操舵)を含む

カテゴリ-II: 障害物近傍の交差点で操船に失敗する

カテゴリ-III: 障害物近傍において結果として座礁してしまう・航行中の座礁

カテゴリ-IV: 機関故障などで進路を逸脱する・漂流による座礁

航行中の座礁 Powered Grounding

全カテゴリーの座礁隻数: $N_g = N_I + N_{II} + N_{III} + N_{IV}$

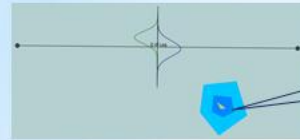
$$N_I = \sum_{\text{Ship class, } i} P_{c,i} Q_i \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f_i(z) dz$$

$$N_{II} = \sum_{\text{Ship class, } i} P_{c,i} Q_i \exp(-d/a_i) \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} f_i(z) dz$$

- a_i : 航海士が位置確認を行う平均の時間
- d : 障害物から航路屈曲部までの距離
- i : 船舶のインデックス船種、載貨重量、または長さでカテゴリーを決める
- $f_i(z)$: 船舶交通の確率密度
- N_I : 年間に発生するカテゴリーIの座礁の期待値
- N_{II} : 年間に発生するカテゴリーIIの座礁の期待値
- N_{III}, N_{IV} は詳細検査中
- $P_{c,i}$: 因果確率。座礁箇所にある船と実際に座礁した船舶との比
- Q_i : 年間に航路断面を通過するクラス*i*の隻数
- z : 航路と直交する座標
- z_{\min}, z_{\max} : 障害物を横断する座標の最大値と最小値

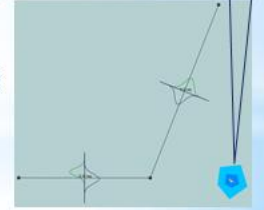
17

事例4:カテゴリーIの座礁 Category I grounding



浅瀬
Shore

事例5:カテゴリーIIの座礁 Category II grounding



浅瀬
Shore

18

漂流による座礁 Drifting Grounding

ブラックアウトが実際に起こる頻度は、予備の有無や保守のレベルで決まる。フェリーやローロー船は、予備のユニットを持つためブラックアウトが少ないが、単船の多くの船舶では、頻度は高くなる。現時点では、ブラックアウトの頻度の基準値は下の表のとおりとしている。

船舶の種類	年間の頻度	時間に換算した頻度
旅客船・ローロー船	0.1年 ⁻¹	1.15 × 10 ⁻² 年 ⁻¹
その他の船舶	0.75年 ⁻¹	8.56 × 10 ⁻² 年 ⁻¹

$$N_{\text{drift}} = N_{\text{ship}} \int_{\psi=0}^{360} P_{\text{wind}}(\psi) d\psi$$

風向ψの風が起こる確率から



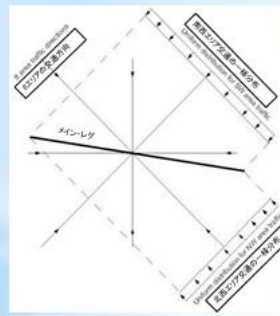
修正が実施されない確率は、デフォルトの修正時間分布としてワイブル分布でモデル化されている



$$\sum_{\text{All segments}} P_{\text{blockout}}(L_{\text{segment}}) \int_{x=0}^{L_{\text{segment}}} \int_{y=0}^{L_{\text{segment}}} P_{\text{no repair}}(v_{\text{ground}} | Z) P_{\text{no anchoring}}(v_{\text{ground}} | Z) f(v_{\text{drift}}) dv_{\text{drift}} dx dy$$

19

自由航行水域の衝突(航路以外) Area collision (ships not on routes)



レグのない海域の船舶交通のリスクを検討する場合、一定の水域内を航行する船舶衝突はランダムに発生すると仮定する。
モデル化は、検討の対象となるメイン・レグと放射状に広がる8本の水域交通のレグ(以下、水域レグと呼ぶ)を北、北東、東、南東、南、南西、西そして北西に指定する。
水域レグとメイン・レグとがどのように交差するかによって、その衝突が交差衝突なのか正面衝突であるかを決めてそれぞれの方法で計算する。
また、特定の航路は無いとしているので断面交通分布は一様分布とする。メイン・レグの長さは、その水域の船舶交通がメイン・レグと交差する範囲として上限(upper boundary)と下限(lower boundary)を決める。
正面衝突の場合には、メイン・レグの側面分布の範囲が上限と下限になる。水域内の船舶数はユーザーが設定、これは年間にメイン・レグを横断する船舶交通の隻数(密度)とする。

20

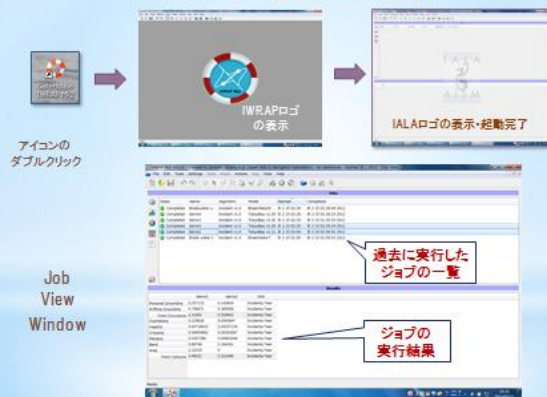
自由航行水域の衝突(漁船・プレジャー・ボート) Area Traffic collision (Fishing, Pleasure Boat)



定義された航路以外で起こるプレジャーボートや漁船の船舶衝突を計算するためのモデル。
交通密度における二つのカテゴリーの違いは、漁船はプレジャーボートよりも大型であるということだけであるが、この数値は実際に実証されたものではなく、検証又はデータ収集が必要となる。

21

IWRAPプログラムの実行



アイコンのダブルクリック

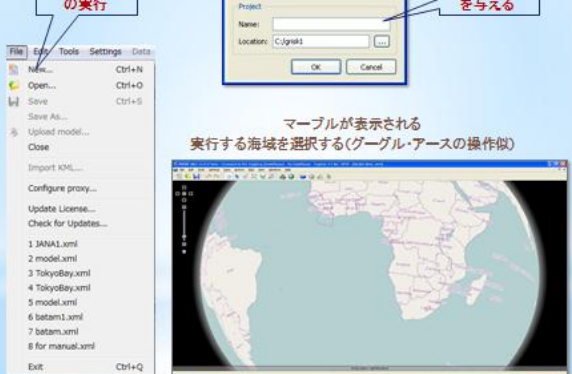
Job View Window

過去に実行したジョブの一覧

ジョブの実行結果

22

新たなジョブの実行



ジョブの名称を与える

マップが表示される
実行する海域を選択する(グーグル・アースの操作似)

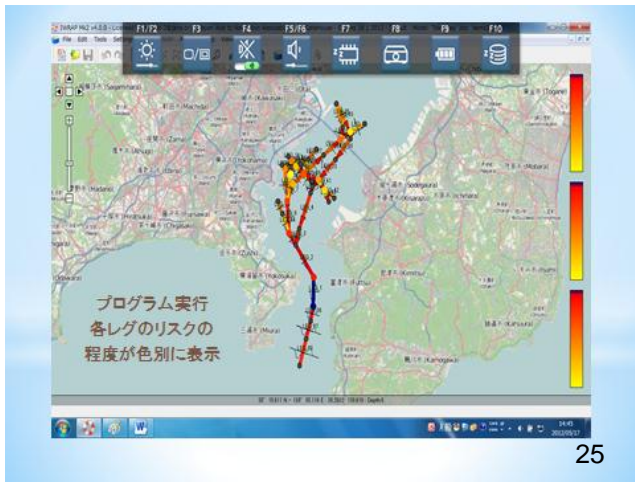
23

AISデータのインポート 3か月データを年間交通に換算

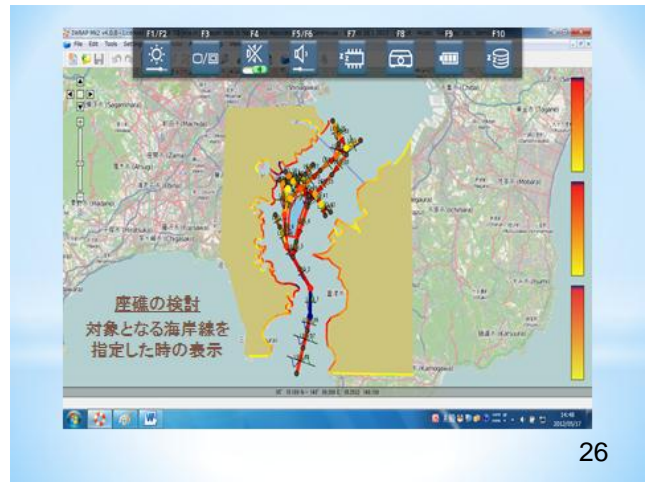
レグ(航路中心線)の入力 船舶通航量と分布の入力



24



25



26



27

ご清聴ありがとうございました

IWRAP Mk II

日本航路標識協会 *JANA*

28



一般財団法人 日本航路標識協会



財団法人 日本航路標識協会財団法人

〒102-0083 東京都千代田区麹町 4-5

海事センタービル 3F

電話：03-3230-1470

Fax：03-3230-1050

<http://www.jana.or.jp/>