

# 航跡と海底地形を用いた衝突危険および乗揚危険発生頻度の推定法

海上安全研究領域 旅客安全・バリアフリー研究グループ \* 金湖富士夫

## 1. まえがき

船舶の事故の主要な事故として衝突と乗揚がある。海上技術安全研究所はFSAによる船舶の安全評価を実施中であるが、衝突、乗揚を防止する安全対策の効果の評価には、それらの回避失敗確率を求めることが重要である。衝突、乗揚の数は要救助海難統計等の海難データから得ることができるが、衝突、乗揚回避失敗確率を求めるには、衝突、乗揚危険の発生頻度を求めることが必要となる。ここでは海上技術安全研究所が開発した、任意の海域における衝突、乗揚の発生頻度を同海域の航跡および海底地形より求める方法につき報告する。

なお、ここで使用した明石海峡の航跡(図1)は(社)神戸海難防止研究会所有の平成2年10月31日から11月1日にかけて実施された観測結果である。また、図2に日本水路協会から入手した水深データの各水深計測点より求めた1面が3角形の多面体による明石海峡の海底地形(平面図)を示す。

## 2. 衝突危険発生頻度の導出<sup>1)</sup>

### 2.1 手法の概要

ある領域内の船舶が、大きさ、速度、方向、航行時間のそれぞれの確率分布を持ち、同領域内の航行密度、領域内に入航する船舶数が時間変化を持つ場合の、定められた時間内の同領域内の衝突危険発生回数は式(1)で表わされる。

ここで、

$N_T$  : 総観測時間 (1時間の整数倍)

$t_N$  : 観測時間

$M$  : 船舶の大きさの種類総数

$s$  : 船舶の大きさの種類

$t$  : 滞在時間

$g(t)$  : 滞在時間の確率密度関数

$\theta$  : 航行方向

$f(\theta)$  : 航行方向の確率密度関数

$\rho(t_N)$  :  $t_N$ における航行密度

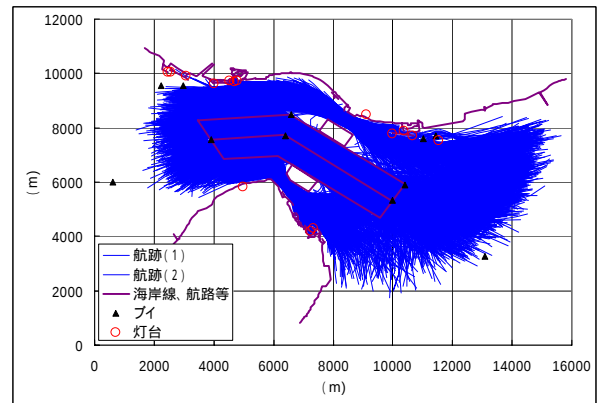


図1 明石海峡航跡(平成2年10月30日～11月1日)  
(社)神戸海難防止研究会

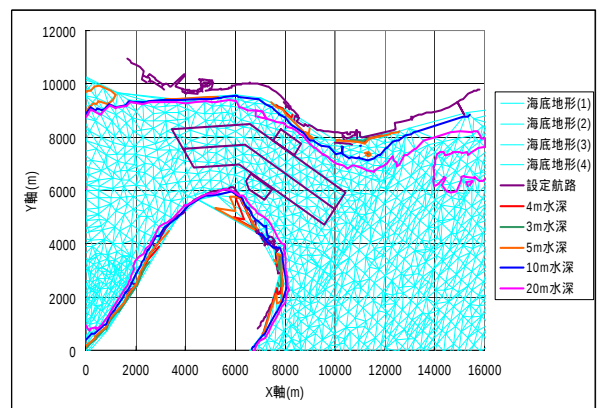


図2 明石海峡海底地形および等深線

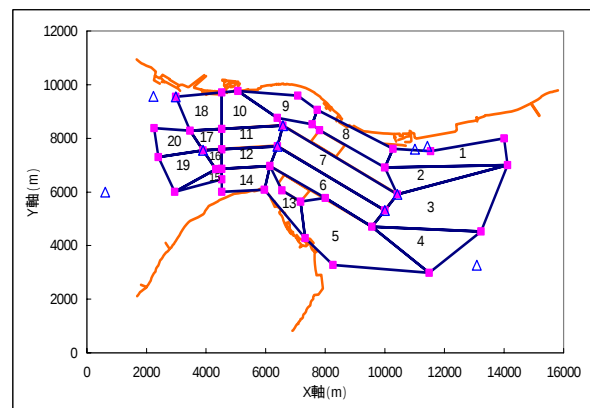


図3 明石海峡領域分割

$$N_{area} = \frac{1}{2} \sum_{t_N=1}^{N_T} \sum_{s_0=1}^M \sum_{s_1=1}^M \int_{V_{min}}^{V_{max}} \int_{V_{min}}^{V_{max}} \int_0^T \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \rho(t_N) p_{t_N}(s_0) N(t_N) p_{t_N}(s_1) D_{co} t \sqrt{v_t^2 + v_0^2 - 2v_t v_0 \cos(\theta_t - \theta_0)} f(\theta_t) f(\theta_0) g(t) h(v_t) h(v_0) d\theta_t d\theta_0 dt dv_t dv_0 \dots (1)$$

$N(t_N)$  :  $t_N$  における領域内入航船舶数

$p_{t_N}(s)$  :  $t_N$  における種類  $s$  の船舶の構成比率

$v$  : 速度、 $V_{\max}$  : 最大速度、 $V_{\min}$  : 最小速度

$h(v)$  : 速度の確率密度関数

$a$  : 船長、 $b$  : 船幅

添字 0 : 自船、添字  $t$  : 他船

$$D_{col} = h_1 + 2h_2$$

$$= b_0 |\cos(\theta_{V-V_0})| + a_0 |\sin(\theta_{V-V_0})| + 2 \cdot \frac{\sqrt{a_t^2 + b_t^2}}{2} |\sin(\theta_t + \theta_{V_t})|$$

である。

したがって以下の方法により、任意の海域の衝突危険発生頻度を求めることができる。

- 1) 海域を複数の航行状況がほぼ一定の領域に分割し、領域毎に 2 船間の DCPA (TCPA がある時間以内) が 2 船間の衝突距離以内に入る組合せの数を求める。この場合は、最接近点が位置する部分領域に衝突危険を算入する。
- 2) 1)と同じ領域毎に、航行方向、航行速度、領域内滞在時間の確率分布を航跡データから求め、式(1)より、領域内の衝突危険の発生数を求める。このようにして求めた確率分布は各領域に固有な量であり、その特徴を示すものである。

航跡、船舶の観測データがあれば、1)を実施できるため、2)で衝突危険発生頻度を再計算する必要はないが、新たな航路を設計する場合は、2)を実施することにより、その安全性を定量的に予測することができる。

## 2.2 明石海峡への適用

図 3 に今回使用した明石海峡の領域分割を示す。明石海峡航行船舶の船幅、船長は、2000 年の日本船舶明細書のデータを用いて GT と Loa および GT と B との回帰式を求めて計算により得ることにした。

1) による場合

表 2 に各領域の衝突危険発生回数を示す。なお、計算に使用した航跡は、1 日目 11:00 から、3 日目 12 時までの 49 時間である。

南航路から出航する船舶と北航路に入航する船舶が交差する No.3 の領域の衝突危険発生頻度が他に比べかなり高いことが分かる。2 日間の航跡から求められた衝突危険発生頻度から他の日も同

様の交通状況と仮定して求めた明石海峡全体の年間の衝突危険発生頻度と、表 1 に示す平成元年から 8 年にかけての衝突回数<sup>2)</sup>の平均から求めた衝突回避失敗確率を表 1 に示す。なお、要救助海難統計には明石海峡における不要救助と要救助の船舶の合計数が載っていないため、瀬戸内海全域での要救助と要救助 + 不要救助の船舶の比を明石海

表 1 明石海峡内衝突事故数(要救助海難統計より)

| 年  | 明石海峡     |                               | 瀬戸内海     |                 | B2/A2 |
|----|----------|-------------------------------|----------|-----------------|-------|
|    | 要救助 (A1) | 要救助 + 不要救助 (推定 B1 = A1*B2/A2) | 要救助 (A2) | 要救助 + 不要救助 (B2) |       |
| H1 | 4        | 14.41                         | 103      | 371             | 3.60  |
| H2 | 8        | 25.29                         | 130      | 411             | 3.16  |
| H3 | 4        | 13.13                         | 135      | 443             | 3.28  |
| H4 | 2        | 6.24                          | 116      | 362             | 3.12  |
| H5 | 6        | 22.70                         | 88       | 333             | 3.78  |
| H6 | 4        | 10.41                         | 113      | 294             | 2.60  |
| H7 | 5        | 14.72                         | 126      | 371             | 2.94  |
| H8 | 6        | 16.48                         | 146      | 401             | 2.75  |
| 合計 | 39       | 123.38                        | 957      | 2986            | 3.12  |
| 平均 | 4.88     | 15.42                         | 119.63   | 373.25          |       |

表 2 衝突危険発生回数および衝突回避失敗確率

| Area No. | 面積 (km <sup>2</sup> ) | 遭遇回数 (航跡データより) A | 遭遇回数 (推定値) B | B/A  |
|----------|-----------------------|------------------|--------------|------|
| 1        | 2.90                  | 12               | 8.1          | 0.68 |
| 2        | 2.09                  | 1                | 1.7          | 1.68 |
| 3        | 6.39                  | 163              | 59.8         | 0.37 |
| 4        | 2.97                  | 7                | 2.1          | 0.30 |
| 5        | 5.91                  | 4                | 2.1          | 0.51 |
| 6        | 3.10                  | 90               | 58.3         | 0.65 |
| 7        | 3.30                  | 133              | 52.4         | 0.39 |
| 8        | 1.95                  | 65               | 32.1         | 0.49 |
| 9        | 1.68                  | 21               | 13.6         | 0.65 |
| 10       | 1.89                  | 30               | 16.0         | 0.53 |
| 11       | 1.50                  | 55               | 34.1         | 0.62 |
| 12       | 1.26                  | 42               | 30.3         | 0.72 |
| 13       | 1.16                  | 59               | 20.6         | 0.35 |
| 14       | 1.32                  | 16               | 8.8          | 0.55 |
| 15       | 0.38                  | 0                | 2.2          |      |
| 16       | 0.30                  | 0                | 2.8          |      |
| 17       | 0.64                  | 1                | 4.9          | 4.93 |
| 18       | 1.74                  | 2                | 2.4          | 1.20 |
| 19       | 1.25                  | 0                | 2.4          |      |
| 20       | 1.72                  | 6                | 9.2          |      |
| 合計       | 43.44                 | 707              | 363.9        | 0.51 |
| 1日当たり    |                       | 346.29           | 178.22       |      |
| 1年当たり    |                       | 126394.3         | 65051.6      |      |
| 衝突回避失敗確率 |                       | 1.220E-04        | 2.370E-04    | 1.94 |

峡での要救助の値に乗じて明石海峡の要救助 + 不要救助の船舶数とした。

表 2 より、全体の衝突回避失敗確率はおよそ 1 万回に 1 回と、文献 3)、および東京湾浦賀水道航路における同航船の衝突回避失敗確率<sup>4)</sup>とほぼ一致していることがわかる。

## 2) による場合

航跡より求めた航行方向、航行速度、領域内滞在時間の確率密度関数分布、さらに、領域内入航船舶数の時系列、領域内船舶の航行密度より式(1)に従い衝突危険発生頻度を求めた(表 2)。

衝突危険発生回数が少ない領域は実現値が 0 である領域があり、この場合は比をとることには意味がない。ある程度実現値が大きい領域では、表 2 より、1) で求めた数値と 0.35 から 0.75 倍程度の違いが存在することがわかる。総じて確率密度関数より求めた数値の方が小さい。この違いの原因としては、航行密度は領域内で一様ではないこと、領域内船舶の航行方向、滞在時間、速度は独立ではないこと等が考えられる。それらは、衝突危険発生数を小さく見積もる方に寄与するため、ここでの結果は妥当といえる。今後は、さらにその差を縮めるため、航行密度を確率密度関数の形にする、航行方向等を独立としない確率密度関数を用いる等を実施する必要がある。

## 3. 乗揚危険発生頻度の導出<sup>1)</sup>

### 3.1 手法の概要

図 3 に示す日本水路協会から導入した水深データの各水深計測点より求めた 1 面が 3 角形の多面体による明石海峡の海底地形(平面図)、海岸線と図 2 の航跡データより、下記に示す方法で明石海峡における平均乗揚危険率(ある海域内の船舶が、1 回の航路逸脱につきある時間何もしないでいると乗揚に至る確率の平均)を、何もしないでいる時間(無操作時間)をパラメータとして求める。

ここで、

$v$ : 航行速度

$x$ : 計画航路上の点の初期位置からの距離

$T$ : 何らかの原因により乗揚のない計画航路から

逸脱し、気付かないで航行してしまう時間

$q(x)$ : 点  $x$  で逸脱した場合に乗揚に至る確率 (乗

揚危険率と呼ぶ)

$f(\theta|x)$ : 点  $x$  での逸脱する方向の確率密度関数

$\theta_{grd}(x)$ : 船位が  $x$  の場合の、乗揚げ至る角度

とすると、 $q(x)$ は式(2)のように表現できる。

$$q(x) = \int_{\theta=\theta_{grd}(x)} f(\theta|x) d\theta \quad \dots(2)$$

ここで、点  $x$  において、 $dt$  時間内に航路から逸脱する頻度を  $p_{out}(x)$  とすると、計画航路を航行する時間内に乗揚げ回数  $p_{grd}$  は式(3)のように表わせる。

$$p_{grd} = \int_0^{T_{NAV}} p_{out}(x) \cdot \int_{\theta=\theta_{grd}(x)} f(\theta|x) d\theta dt \quad \dots(3)$$

ここで、 $f(\theta|x)$ の形は潮流のない所では進行方向から左右 45 度を  $\pm 3\sigma$  とする正規分布で近似する。

次に、想定海域においてすべての船舶の計画航路上のすべての点において  $p_{out}(x)$  が同じであると仮定すると、想定海域内の所定の時間内( $T1 \sim T2$ )での乗揚総数  $N_{grd}$  は式 (4)のように表わせる。

$$N_{grd} = \sum_{i=1}^{N_{ship}} \int_{T_1(i)}^{T_2(i)} p_{out} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta|x) d\theta \right) dt \quad \dots(4)$$

計画航路上の平均乗揚危険率を  $F$  とすると、

$$N_{grd} = \sum_{i=1}^{N_{ship}} \int_{T_1(i)}^{T_2(i)} p_{out} \cdot F dt \quad \dots(5)$$

であるため、 $F$  は(6)式のように求めることができる。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ship}} \Delta T \sum_{j=1}^{M(i)} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta|T(j|i)) d\theta \right)}{\sum_{i=1}^{N_{ship}} (T_2(i) - T_1(i))} \quad \dots(6)$$

### 3.2 明石海峡への適用

ここでは、100 - 500GT の船舶の平均乗揚危険率を求めた。2000 年の日本船舶明細書データの解析によると、それらの船舶の水深は大体 3m ~ 4m である。それで、4m と 3m の等深線による平均

乗揚危険率を求めた。結果を表 3 および図 4 に示す。なお、水深 3m の場合は海岸線を含む場合のみである。図 4 より明らかなように、それらの等深線と海岸線とは接近しているため、乗揚危険率導出の際には海岸線を考慮する必要がある。図 4 より、4m の場合と 3m の場合では平均乗揚危険率はほとんど変化しない。これは図 3 より 3m と 4m の等深線の位置がほとんど離れていないことから当然の結果と言える。なお、無操作の場合、速度は 10 ノットとしている。

表 4 に、平成元年から 8 年にかけての明石海峡における乗揚事故数を示す。なお、不要救助の乗揚事故数を推定するため、衝突の解析の場合と同様の処理を施した。表 2 の A の合計数と図 3 の領域内の航行船舶数(3114 隻)から、1 隻の船舶の明石海峡の 1 航海当たりの衝突危険発生頻度(0.445)を求め、衝突危険が生じる度に衝突回避のため航路を逸脱するとし、その数値に平均乗揚危険率および年間の航海数を乗じて求めた年間の平均乗揚危険発生数の推定値と、表 4 から得られる乗揚事故数より、明石海峡での乗揚回避失敗確率を、無操作時間をパラメータとして求めた。結果を表 3 に示す。衝突回避失敗確率と同等の確率で乗揚回避が失敗すると仮定すると、無操作時間はおよそ 5 分となる。この場合、明石海峡を航行する船舶は、航路を逸脱した場合、速度 10 ノットで航行している場合、平均的に 5 分以内に乗揚回避行動を開始していると考えられる。

#### 4. まとめ

対象海域の航跡の観測データおよび水深データより、衝突危険発生頻度および乗揚危険発生頻度を求める方法が開発された。これらと対象海域における衝突および乗揚事故数より衝突危険および乗揚危険回避失敗確率を求めることができる。また、この方法を明石海峡に適用し妥当な結果を得た。まだ改良すべき点が残っておりそれらの解決が必要である。しかし、それほど困難ではないと考えられる。ここで開発した手法はFSAによる船舶の安全評価に非常に有効であり、種々の安全対策の効果の推定に寄与し、安全かつ経済的な船舶の設計に役立つと期待される。

なお、本研究は、日本財団の助成事業として(社)日本造船研究協会のRR-S702で、また、同協会と海上技術安全研究所との共同研究で実施されたものである。

#### 参考文献

- 1) RR-S7 船舶の総合的安全評価に関する調査研究、(社)日本造船研究協会、2003/3
- 2) 海上保安庁：要救助海難統計(H1-H8)
- 3) 藤井,巻島,原：海上交通工学, 海文堂, 1981
- 4) 金湖：浦賀水道航路における分離航行の効果の推定, 日本航海学会論文集, Vol.108, 2003/3

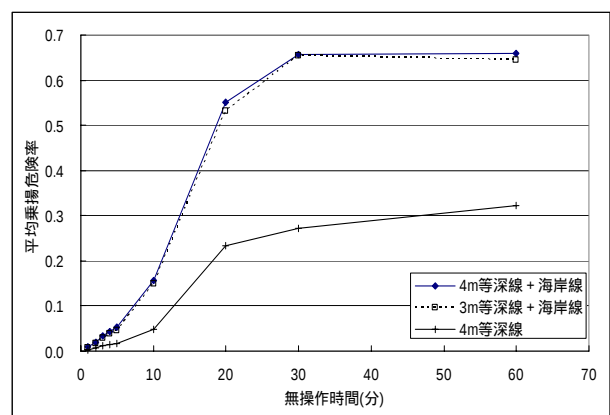


図 4 平均乗揚危険率

表 3 乗揚回避失敗確率

| 無操作時間<br>(分) | 平均乗揚<br>危険率<br>(4m等深<br>線 + 海岸<br>線) | 遭遇回数<br>/航海 | 航行隻数<br>(1日当<br>り) | 稼働日数 | 乗揚危険<br>発生回数 | 乗揚隻数<br>(年平均) | 推定失敗<br>確率 |
|--------------|--------------------------------------|-------------|--------------------|------|--------------|---------------|------------|
| 1            | 8.97E-03                             | 0.445       | 1557               | 365  | 2.27E+03     | 1.91          | 8.44E-04   |
| 2            | 1.88E-02                             | 0.445       | 1557               | 365  | 4.76E+03     | 1.91          | 4.02E-04   |
| 3            | 3.41E-02                             | 0.445       | 1557               | 365  | 8.63E+03     | 1.91          | 2.22E-04   |
| 4            | 4.29E-02                             | 0.445       | 1557               | 365  | 1.08E+04     | 1.91          | 1.76E-04   |
| 5            | 5.24E-02                             | 0.445       | 1557               | 365  | 1.32E+04     | 1.91          | 1.45E-04   |
| 10           | 1.57E-01                             | 0.445       | 1557               | 365  | 3.96E+04     | 1.91          | 4.84E-05   |
| 20           | 5.51E-01                             | 0.445       | 1557               | 365  | 1.39E+05     | 1.91          | 1.37E-05   |
| 30           | 6.57E-01                             | 0.445       | 1557               | 365  | 1.66E+05     | 1.91          | 1.15E-05   |
| 60           | 6.59E-01                             | 0.445       | 1557               | 365  | 1.66E+05     | 1.91          | 1.15E-05   |

表 4 明石海峡内衝突事故数(要救助海難統計より)

| 年  | 明石海峡        |                                        | 瀬戸内海        |                       | B2/A2 |
|----|-------------|----------------------------------------|-------------|-----------------------|-------|
|    | 要救助<br>(A1) | 要救助 + 不<br>要救助(推<br>定 B1=<br>A1*B2/A2) | 要救助<br>(A2) | 要救助 +<br>不要救助<br>(B2) |       |
| H1 | 4           | 14.41                                  | 103         | 371                   | 3.60  |
| H2 | 8           | 25.29                                  | 130         | 411                   | 3.16  |
| H3 | 4           | 13.13                                  | 135         | 443                   | 3.28  |
| H4 | 2           | 6.24                                   | 116         | 362                   | 3.12  |
| H5 | 6           | 22.70                                  | 88          | 333                   | 3.78  |
| H6 | 4           | 10.41                                  | 113         | 294                   | 2.60  |
| H7 | 5           | 14.72                                  | 126         | 371                   | 2.94  |
| H8 | 6           | 16.48                                  | 146         | 401                   | 2.75  |
| 合計 | 39          | 123.38                                 | 957         | 2986                  | 3.12  |
| 平均 | 4.88        | 15.42                                  | 119.63      | 373.25                |       |