

# 47 海底地形モデルによる東京湾の乗揚危険率推定方法について

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. はじめに

どのような港湾においても、陸地の方向に直進すれば必ず乗揚げることになる。通常は乗揚げないように計画航路を設定しその上を航行するが、避航、居眠り等のため、計画航路から逸脱すると乗揚げの危険性が生じる。

ここでは、船舶および海域の乗揚げ危険を定量的に評価する方法を解説し、同方法により求めた東京湾での平均乗揚げ危険率について示す。

## 2. 乗揚げ危険率の推定方法

### 2. 1 定式化

何らかの原因により乗揚げのない計画航路から逸脱し、航行速度  $v$  で気付かないで航行してしまう時間を  $T$  とすると、逸脱方向に逸脱点より半径  $vT$  内に浅瀬、障害物、海岸線が存在する場合に乗揚げることになる(図 1)。したがって、任意の計画航路上の点につき、その点で逸脱した場合に乗揚げに至る確率  $q(x)$  (乗揚げ危険率) は、逸脱する方向の確率密度関数を  $f(\theta | x)$  と表わすと、式(1)のように表現できる。

$$q(x) = \int_{\theta=\theta_{grd}(x)} f(\theta | x) d\theta \quad \dots(1)$$

ただし、

$\theta_{grd}(x)$ : 船位が  $x$  の場合の、乗揚げ至る角度。(以下、乗揚げ角と呼ぶ)

とする。

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の回数  $p_{grd}$  は式(2)のように表わせる。

$$p_{grd} = \int_0^{T_{nav}} p_{out}(x) \cdot \int_{\theta=\theta_{grd}(x)} f(\theta | x) d\theta dt \quad \dots(2)$$

ここで、 $f(\theta | x)$  の形は潮流のない所では進行方

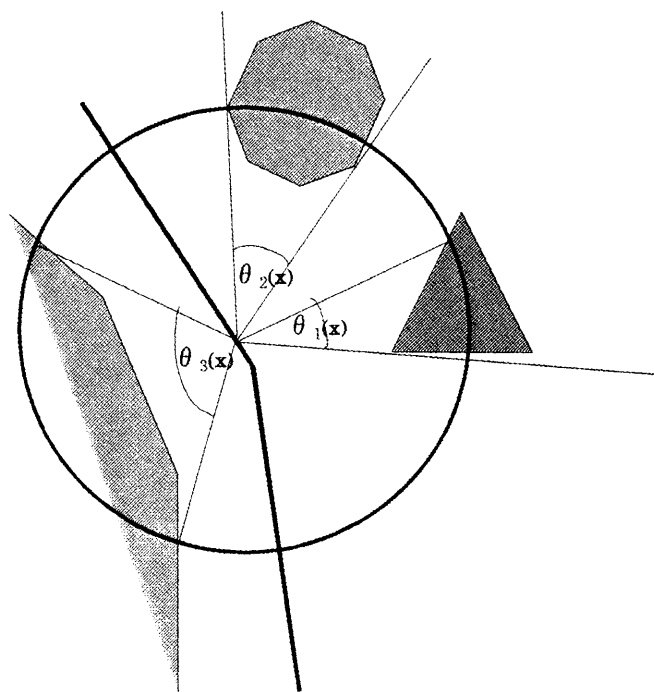


図 1 浅瀬等への乗揚げ危険を伴う逸脱方向

向から左右  $45$  度を  $\pm 3\sigma$  とする正規分布で、潮流のある所では、船舶の速度と潮流の流速との合成速度方向を中心とし、その方向から左右  $45$  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( $T1 \sim T2$ )での乗揚げ総数  $N_{grd}$  は式(3)のように表わせる。

$$N_{grd} = \sum_{i=1}^{N_{ship}} \int_{T_1(i)}^{T_2(i)} p_{out} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta | x) d\theta \right) dt \quad \dots(3)$$

計画航路上の平均乗揚げ危険率を  $F$  とすると、

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

であるため、 $F$  は以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned}
 N_{grd} &= \sum_{i=1}^{N_{ship}} \int_{T_1(i)}^{T_2(i)} p_{out} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta | x) d\theta \right) dt \\
 &= p_{out} \sum_{i=1}^{N_{ship}} \Delta T \sum_{j=1}^{M(i)} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta | T(j|i)) d\theta \right) \\
 N_{grd} &= \sum_{i=1}^{N_{ship}} \int_{T_1(i)}^{T_2(i)} p_{out} \cdot F dt \\
 &= p_{out} \cdot F \cdot \sum_{i=1}^{N_{ship}} (T_2(i) - T_1(i)) \\
 F &= \frac{\sum_{i=1}^{N_{ship}} \Delta T \sum_{j=1}^{M(i)} \left( \int_{\theta_{grd}} f(\theta | T(j|i)) d\theta \right)}{\sum_{i=1}^{N_{ship}} (T_2(i) - T_1(i))} \dots (4)
 \end{aligned}$$

## 2. 2 乗揚角の求め方

乗揚角を求めるためには、ある水深の海底地形を得ることが必要となる。図2に、海底の三次元地形から、ある水深の乗揚危険が発生する平面地形を得る方法を示す。

まず、水深計測点から海面に対して垂線を立て、

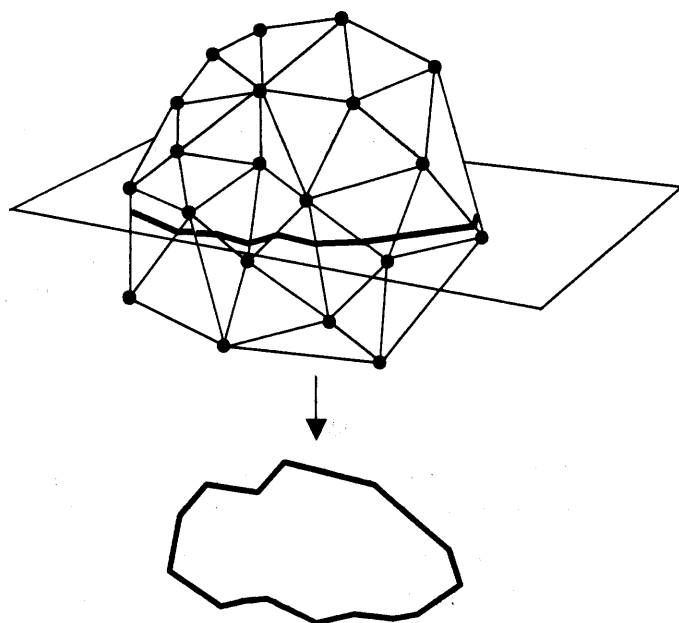


図2 乗揚危険等深線

それと海面との交点を求め、それらから互いに近い3点を選び三角形を構成する。その際に生じる三角形の内角の大きさができるだけ均等になるようにする。次に、海面上の点と対応する水深点を海面上の点の結合と同様な関係で結合させ、水深点による立体を形成する。さらに、乗揚解析を実施する船舶の喫水の水深でその立体を切ってできる等深線を作成する。乗揚角はこのようにして作

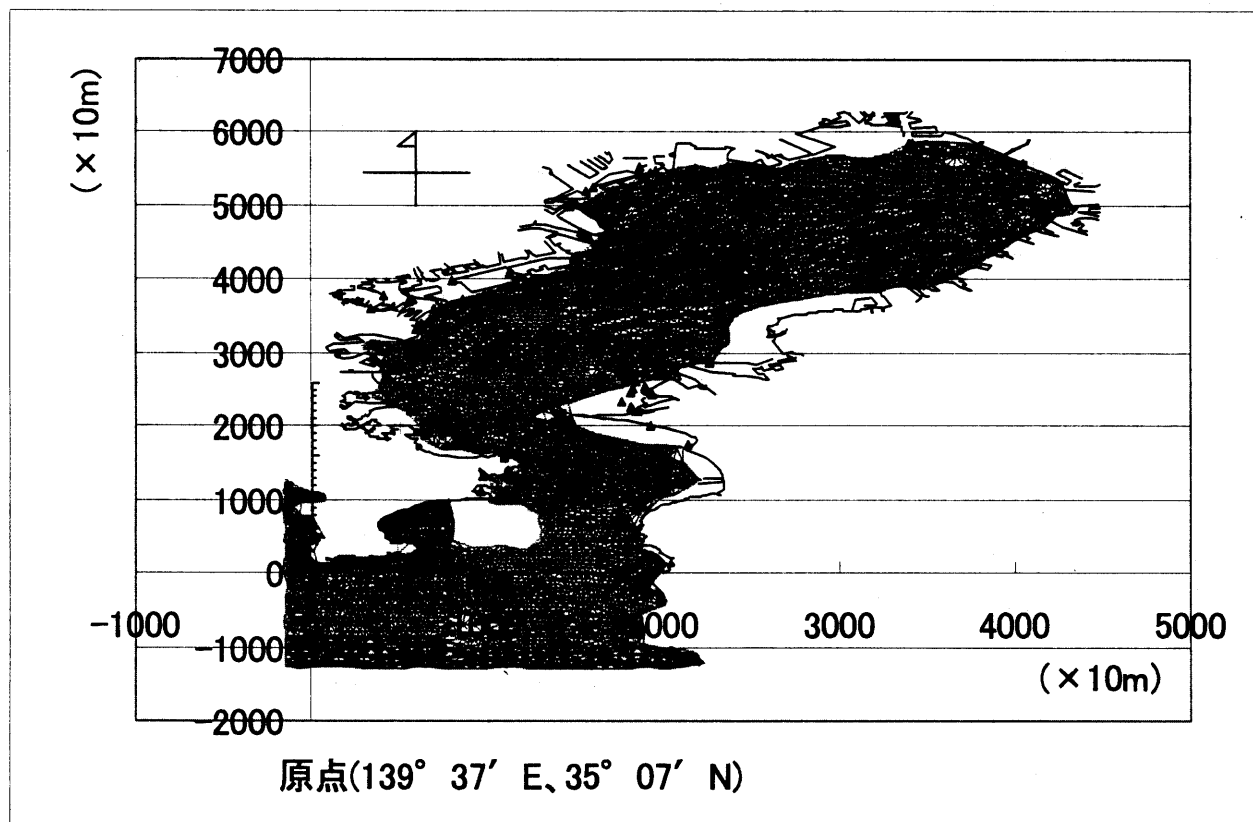


図3 東京湾海底地形

成された等深線をある設定された時間で到達する距離を半径とする円を描き、それと等深線との交点を求めることにより得られる。

3. 東京湾の平均乗揚危険率

3. 1 東京湾海底地形

得られた水深データから2章の方法に従って作成した東京湾の海底地形の真上から見た図を図3に示す。次に東京湾の海底地形(図3の薄い線)から、499GTの船舶の喫水に相当する等深線(4m:図3の太実線)を求め、499GTの船舶の喫水は、日本海運集会所の船舶データ(2000年)<sup>2)</sup>を用いて求めた(図4)。

図3の座標軸はx軸が経度方向、y軸が緯度方向であり、単位長さが10mである。また、三角の印はブイである。なお、航跡データは平成元年10月30日から11月1日にかけて関東地方整備局(当時、第二港湾建設局)が(株)日本海洋科学に依頼して実施した観測に基づくものである。

3. 2 平均乗揚危険率の推定

東京湾の航跡データを用いて、100-500GTの船舶の乗揚危険率を求めた。この大きさの船舶の数は二日間で3662隻(1日当り1831隻)である。ただし、速度はすべての船舶で10ノットとした。ここで使用した航跡の分析による結果<sup>2)</sup>、東京湾の大部分では航行速度の平均がほぼ10ノットであることが明らかになっており、この仮定は実情を反映していると思われる。得られた東京湾の平均乗揚危険率を表1および図5に示す。海岸線を含む場合は2時間以上直進するとの仮定では、平均乗揚危険率が1に近づく。

4. 考察

計画航路から逸脱してどれほどの時間気付かないでいると乗揚に至るのかについては海域、計画航路、逸脱地点等で変化するが、文献3)からは、逸脱時点から数分で乗揚げられる場合があることが分かる。一航海当たり、何回逸脱する場合があるかについて、文献4)の調査では、航行中針路を変更する必要がある場合が1航海中、湾内では2.52回、狭水道では、2.32回、沿岸では3.6回あるとの結果を得ている。東京湾の船舶が狭水道(浦賀航路)ー湾内というように航行すると仮定した場合、逸脱後の経過時間により、乗揚回避失敗確率がどのように変化するかを計算する。

表2の乗揚回数は平成元年から8年にかけての要救

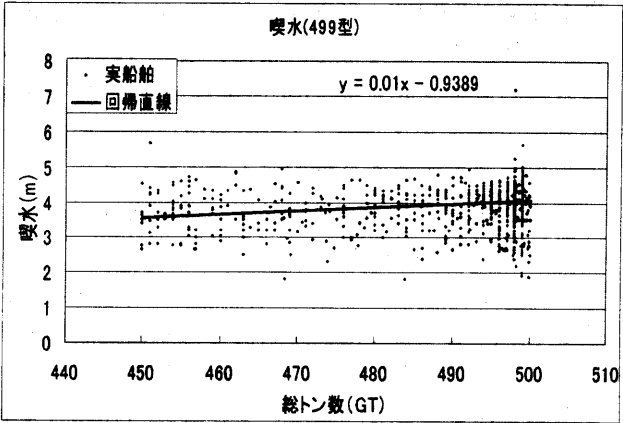


図4 499型船舶喫水

表1 東京湾乗揚危険率

| 経過時間<br>(分) | 4m等深線     | 4m等深線+<br>海岸線 |
|-------------|-----------|---------------|
| 0.1         | 7.134E-05 | 9.380E-05     |
| 0.2         | 2.973E-04 | 5.497E-04     |
| 0.3         | 5.786E-04 | 8.938E-04     |
| 0.4         | 1.119E-03 | 1.543E-03     |
| 0.5         | 1.483E-03 | 1.993E-03     |
| 1           | 4.021E-03 | 5.412E-03     |
| 2           | 7.476E-03 | 1.413E-02     |
| 3           | 1.160E-02 | 3.616E-02     |
| 4           | 1.602E-02 | 5.699E-02     |
| 5           | 1.897E-02 | 7.510E-02     |
| 10          | 4.539E-02 | 2.232E-01     |
| 20          | 1.064E-01 | 4.643E-01     |
| 30          | 1.528E-01 | 6.601E-01     |
| 60          | 2.631E-01 | 9.084E-01     |
| 90          | 3.738E-01 | 9.446E-01     |
| 120         | 4.136E-01 | 9.470E-01     |
| 150         | 4.272E-01 | 9.475E-01     |
| 180         | 4.391E-01 | 9.475E-01     |

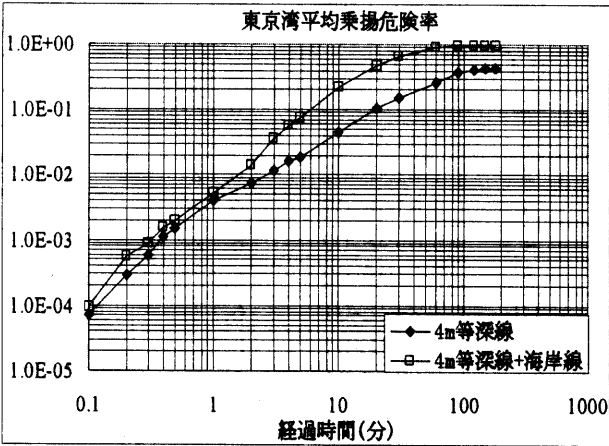


図5 東京湾平均乗揚危険率

助海難統計<sup>4)</sup>の100－500GTの船舶の東京湾（港内および港外）での値である。また、表3では1年当たりの乗揚回数を平成元年～8年の平均値として、逸脱後の経過時間を変化させて1回の乗揚危険発生あたりの乗揚回避失敗確率の推定値を示している。

衝突回避の失敗確率<sup>5)</sup>とほぼ同様の確率（およそ1万分の1）で乗揚回避が失敗すると仮定すると、経過時間が3分前後とした場合の計算結果がそれに近い値を示す。このことは、東京湾では航路逸脱開始時点から平均的に3分以内に乗揚対処を実施していると推測されることを示している。表3から、3分未満の場合でも、時間が短くなるにつれ乗揚危険の数は減少するものの多く存在し、30秒(0.5分)でやっと年間千のオーダーとなる。このことは、100-500GTの船舶は乗揚ぎりぎりの航行をする場合があるが、非常に注意深く操船していることを示していると思われる。しかし、判断時間を長くとも必要がある場合

は当然のこととして速度を落とすことが最善である。

5. おわりに

東京湾の航跡および水深データから平均乗揚危険率を求めた。失敗確率を考慮すると東京湾では平均的に、航路逸脱がある場合3分以内にその修正を図っていることが推測された。本報告の手法は、海域の乗揚危険性を定量的に示すための指標を提示するとともに、乗揚回避のためには迅速な判断を支援する安全対策が必要であることを示している。

謝辞

本研究は日本財団の助成事業の1つである(財)日本造船研究協会の船舶の総合的安全評価に関する調査研究の一環として、第7基準研究部会(当時：第49基準研究部会)との共同研究の一部として行われたものである。また、使用した航跡データは関東地方整備局から、水深データは(財)日本水路協会から提供を受けたものである。貴重なデータの使用を許可して下さった両団体に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本海運集会所：日本船舶明細書、2000
- 2) 第49基準研究部会：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、2002/3
- 3) 海難審判庁：乗揚海難の実態、1999/3
- 4) 海上保安庁：要救助海難統計(H1-H8)
- 5) 金湖：浦賀航路における避航失敗確率について、信学技法SSS2001-34、2002/3

表 2 東京湾乗揚事故隻数(要救助)

| 年(平成) | 港内    | 港外    | 合計  |
|-------|-------|-------|-----|
| 1     | 3     | 2     | 5   |
| 2     | 14    | 3     | 17  |
| 3     | 3     | 2     | 5   |
| 4     | 0     | 4     | 4   |
| 5     | 6     | 2     | 8   |
| 6     | 10    | 0     | 10  |
| 7     | 7     | 2     | 9   |
| 8     | 8     | 2     | 10  |
| 合計    | 51    | 17    | 68  |
| 年平均   | 6.375 | 2.125 | 8.5 |

表 3 経過時間と乗揚回避失敗確率

| 経過時間<br>(分) | 平均乗揚危<br>険率 | 針路変更回数<br>(アンケート<br>結果) | 隻数   | 稼動日数 | 乗揚危険発<br>生回数 | 乗揚隻数<br>(年平均) | 推定失敗確率    |
|-------------|-------------|-------------------------|------|------|--------------|---------------|-----------|
| 0.1         | 9.380E-05   | 6.12                    | 1831 | 365  | 3.836E+02    | 12.75         | 3.323E-02 |
| 0.2         | 5.497E-04   | 6.12                    | 1831 | 365  | 2.248E+03    | 12.75         | 5.671E-03 |
| 0.3         | 8.938E-04   | 6.12                    | 1831 | 365  | 3.656E+03    | 12.75         | 3.488E-03 |
| 0.4         | 1.543E-03   | 6.12                    | 1831 | 365  | 6.312E+03    | 12.75         | 2.020E-03 |
| 0.5         | 1.993E-03   | 6.12                    | 1831 | 365  | 8.151E+03    | 12.75         | 1.564E-03 |
| 1           | 5.412E-03   | 6.12                    | 1831 | 365  | 2.214E+04    | 12.75         | 5.760E-04 |
| 2           | 1.413E-02   | 6.12                    | 1831 | 365  | 5.780E+04    | 12.75         | 2.206E-04 |
| 3           | 3.616E-02   | 6.12                    | 1831 | 365  | 1.479E+05    | 12.75         | 8.620E-05 |
| 4           | 5.699E-02   | 6.12                    | 1831 | 365  | 2.331E+05    | 12.75         | 5.470E-05 |
| 5           | 7.510E-02   | 6.12                    | 1831 | 365  | 3.071E+05    | 12.75         | 4.151E-05 |
| 10          | 2.232E-01   | 6.12                    | 1831 | 365  | 9.128E+05    | 12.75         | 1.397E-05 |
| 20          | 4.643E-01   | 6.12                    | 1831 | 365  | 1.899E+06    | 12.75         | 6.714E-06 |
| 30          | 6.601E-01   | 6.12                    | 1831 | 365  | 2.700E+06    | 12.75         | 4.722E-06 |
| 60          | 9.084E-01   | 6.12                    | 1831 | 365  | 3.716E+06    | 12.75         | 3.432E-06 |