

海上ロータリーにおける航行安全性の分析

鳥取大学工学部

正会員 喜多 秀行

中電技術コンサルタント

正会員 ○橋野 智子

1. 研究の背景と目的

幅狭湾域では、多数の船舶が錯綜して航行しているため複雑な見合い関係を伴う遭遇が随所で発生しており、航行安全上問題が大きい。これらの危険性を減少させるための方法の一つとして、交通流の整流が挙げられる。なかでもロータリーの導入は比較的安全な分合流を基本とするため航行安全性を向上させることが期待される。しかし、道路のロータリーに関してはかなりの研究蓄積があるが、道路交通と海上交通の差異故にその研究成果を直接海上交通に適用することは困難である。このような観点から喜多・近藤¹⁾では船舶航行挙動に着目し、安全性評価を試みたが、船舶の大きさが全て一定であるという仮定を設けている点が現実的でなかった。そこで本研究ではこの仮定を緩め、より実際のモデルへと拡張する。

2. モデルの改良

(1) 船形構成分布

先に提案したモデルでは、ロータリー上で生起する種々の交通現象の本質を流入船舶の周回船列への流入待ち現象に求め、これを確率モデルにより記述している。本研究では船型一定という仮定を緩めるため、船型構成分布 $h(l)$ を導入する。 l は船舶の垂線間長である。 $h(l)$ は対数正規分布とよい一致を見せることが藤井²⁾により報告されており、船型ランク別構成比率の形で離散的に取り扱われることも多い。

以下では、周回船列の船首間隔分布と流入船舶の周回船列への流入確率の算定式を、関係する船舶の船型を明示的に考慮して新たに誘導することにより、任意の船型構成分布に従う船舶交通流のロータリー上での航行安全性を評価するモデルを構築する。

(2) 船首間隔分布とギャップ長分布

本モデルで想定しているような幅員の制限された航路上を船舶が航行する場合、相前後する2隻の船舶の船首がある見通し線を横切る時間間隔を“船首間隔”という。船舶は、衝突を避けるために他船との間に前後左右にある一定以上の間隔を確保しながら航行するのが常であり、このうち前後方向の間隔を“最小船首間隔”とよぶ。すなわち各船舶は固有の最小船首間隔を割り込んで先行船に接近しないよう航行しているものとする。また本研究では、船首間隔 g と最小船首間隔 δ の差を“ギャップ” ξ と呼ぶ。



図1 最小船首間隔とギャップ

まず、ある入路接続点における周回航路航行船舶のギャップ長分布 $u(\xi)$ を誘導するため、次のような状況を想定しよう。着目している入路接続点より上流に位置する入路に到着した船舶は他船の存在に関わらず周回航路に進入して航行する。したがって2隻の船が最小船首間隔より接近して航行することもこの状況下では生じてよい。そして、着目している入路接続点の周回航路上流側入り口にゲートを想定し、最小船首間隔より接近して航行している船舶はこのゲートで先行船との間に最小船首間隔を確保するまで待ち、最小船首間隔以上離れて航行している船舶はそのまま通過すると考える。

これは、窓口数を1、到着時間間隔分布を指数分布、船型構成分布に応じた最小船首間隔分布をサービス時間分布とする $M/G/1$ 型待ち行列システムの退去過程に相当する。その退去時間間隔分布として実際の船首間隔分布を近似的に記述する。

まず、ギャップ長分布を求めよう。船舶がゲートを通過し終える瞬間に着目すると、待ち行列の状態は隠れマルコフ連鎖を構成している。ある船舶がゲートを通過する瞬間に系内に後続船舶が存在する場合には両船間のギャップ長は0、存在しない場合には後続船舶が到着するまでの時間間隔となるから、ギャップ長 ξ の分布、 $u(\xi)$ は次式で与えられる。

$$u(\xi) = \begin{cases} 1 - p_0 & \xi = 0 \\ p_0 \lambda e^{-\lambda \xi} & \xi > 0 \end{cases} \quad (1)$$

p_0 は系内に船舶が存在しない確率であり、定常状態では最小船首間隔の平均値 $\bar{\delta}$ と周回航路の単位時間当たり交通量 q_c から $p_0 = 1 - \bar{\delta} q_c$ として求められる。船首間隔分布 $g(T)$ は、最小船首間隔 δ とギャップ長 ξ の和が T となる確率として、次式で与えられる。ただ

し、 $\delta = \gamma l$ としている。

$$g(T) = \begin{cases} 0 & T < \delta \\ \int_0^T h(\delta/\gamma) u(\xi = T - \delta) d\delta & T \geq \delta \end{cases} \quad (2)$$

(3) 周回船列への流入確率

流入船舶は、入路接続点に到着した時点で前方に当該船舶の最小船首間隔 γ より長いギャップ ξ が存在すれば流入し、存在しなければ周回航路に沿って併走しながら流入可能なギャップとの遭遇を待つ。隣接出路に到達するまでに n 隻の周回船舶と遭遇する場合、最小船首間隔より長いギャップ ξ が存在しない確率 $p_{fn}(l)$ は、

$$P_{fn}(l) = \left\{ \int_0^\delta u(\xi) d\xi \right\}^n \quad (3)$$

となり、船型 l の船舶が隣接出路までに流入できない確率 $p_r(l, q_c, L)$ は、

$$P_f(l, q_c, L) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{fn} \cdot P_n(n | q_c, L) \quad (4)$$

となる。ここに、 $p_n(n | q_c, L)$ は隣接出路までの距離が L 、周回航路の交通量が q_c の時に、 n 隻の周回船舶と遭遇する確率である。

着目している流入船舶の後方に後続流入船舶が存在する場合には、この後続船舶による流入機会の減少効果を考慮しなければならない。後続流入船舶の船型が l' 、流入交通量が q_m の時に、着目する流入船舶の流入不能確率が $r(l', l | q_m, q_c, L)$ の割合で低下するならば、船型構成分布 $h(\cdot)$ に従う流入船舶の流入不能確率 P_F は次式で与えられる。

$$P_F = \int_0^\infty \int_0^\infty r(l', l | q_m, q_c, L) \cdot P_f(l, q_c, L) h(l') h(l) dl' dl \quad (5)$$

この P_F をもってロータリーの航行安全性を評価する。

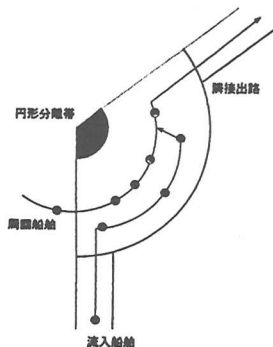


図2 流入船舶の周回船列への流入

3. 数値実験

船型構成分布の違いが流入不能確率にどの程度の影響を及ぼしているかを検討するため、簡単な数値実験を行った。交通量は周回船舶、流入船舶ともそれぞれ一定値に固定し、船型構成のみを変化させた。検討に用いた船型構成比率は表1に示すAからEの5種類であり、周回船舶と流入船舶は同じ船型構成分布を有するものとした。

得られた結果を図1に示す。航行船舶の船型構成に応じて流入不能確率は30%程度変化しており、船型構成分布を考慮することの必要性が理解される。検討した範囲では、船型構成がばらつくほど流入不能確率が低下するという傾向がみられる。

表1 検討した船型構成分布

タイプ	A	B	C	D	E
小型船舶	—	0.65	0.35	0.60	0.40
中型船舶	1.00	—	0.50	0.10	0.40
大型船舶	—	0.35	0.15	0.30	0.20

小型船舶： ～ 500 G.T.
 中型船舶： 500 G.T. ～ 3000 G.T.
 大型船舶： 3000 G.T. ～ (単位：G.T.=噸トン)

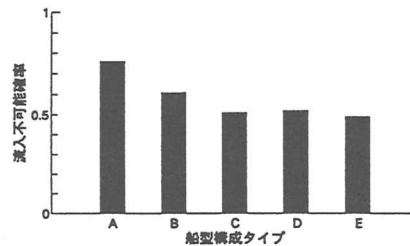


図3 船型構成が流入不能確率に及ぼす影響

4. まとめ

本研究では、先に提案したモデルにおける船型一定の仮定を緩め、船型構成分布を考慮した上で、隣接出路までに進入船舶が流入できない確率を算定するモデルへと拡張した。その結果、船型構成が流入不能確率に少なからぬ影響を及ぼしていることが確認できた。今後は、このモデルを援用してロータリー上での期待遭遇回数の推定等を行い、ロータリー設置の妥当性評価へと検討を進めたい。

参考文献

- 1) 喜多・近藤：海上ロータリーにおける船舶航行挙動のモデル分析，日本航海学会論文集，No.89，pp.227-236，1993。
- 2) 藤井：序説 海上交通工学，海文堂出版，p.89，1971。