

海峡および水道の船舶交通現象に関する研究

B-II 後方閉塞領域の導出とその例（第一報）

渡 辺 健 次*

Navigational Traffic Phenomena on Narrow Straits

B-II. Theoretical Treatment of the Effective Area (Part 1)

by

Kenji Watanabe

A general representation for the effective area of ships is obtained as a function of the ship length, L , and speed, V , with several parameters. A special case with limited number of the parameters, i.e., with only two parameters is treated analytically by introducing the idea of the lag time, T .

The result shows good agreement with observed values and the limitation of the parameters is turned out to be useful for practical cases.

1. は し が き

後方閉塞領域は海峡や水道など制限水域における船舶の航行容量を定めるために重要な考えであって、ひとつの方法として先行船にたいする後続船の相対位置分布を観測することによって求められた^{1),2)}。これらの観測からの帰納によって求めるものと平行して理論的なりあつかいも必要であるが、それは今までに全くなされていなかった。ここでは理論的にこの後方閉塞領域を、船舶の運動性能、操船者の心理特性などを考えに入れて導出することを試みよう。

後方閉塞領域はその定義¹⁾にもかかわらず実際にはさまざまな閉塞度合をもった拡がりとして考えられるべきで、運動性能や心理特性のばらつきを考えると、その導出には確率論的なりあつかいが要求されるべきである。

したがって、まず先行船がある時刻から時間 t の経過の後に、ある場所に位置する確率をもとめ、次に後続船がはじめの時刻での場所から、先行船との衝突をさけるような運動をおこなうことがどの程度可能であるかしらべることによって、後続船のはじめの位置の閉塞の度合が量的にみちびかれるはずである。この考えによって本報告では閉塞の度合をみちびく方法の基

* 共通工学部

礎を論じ一般的な式をえた。この基礎理論および一般式は後方閉塞領域を理論的にとりあつかう方法の出発点となる妥当なものである。

しかしながら、実用的に閉塞領域をもとめるためには、この式は一般的にすぎて有用な結果を与えることができない。ゆえに先行船および後続船の運動にたいし簡単な仮定をおいて閉塞領域の解析的な表式をうるが必要となる。これにたいしては運動を支配する多くの複雑なパラメーターがあるため、仮定の仕方によって種々の方法、異なった表式が得られることである。

さてここでは例として、先行船が単に回頭を行なう場合と、機関逆転制動を行なう場合のふたつについて簡単な仮定をして解析的表式を得た。これは現在までに得られた実測データと比較すると、その限りでは満足すべき結果であったので報告する。

なお、先行船と後続船は同一方向に同一速度ですすみ、第三の船舶の影響は考えないとした。

2. 基 礎 理 論

2.1 先行船の位置分布

初速 V で先行する船舶は加速あるいは旋回をおこなって、時間 t の後にはある位置に達する。はじめの位置を原点とし、進行方向に Y 軸、それに直角方向に

X 軸をとると、時間 t の後の先行船の位置は汎関数形式で

$$\begin{cases} x = F[\theta(\tau), \alpha(\tau), V, t] \\ y = G[\theta(\tau), \alpha(\tau), V, t] \end{cases} \quad (1)$$

とあらわされる。 $\theta(\tau)$ は進行方向がはじめの進行方向となす角、 $\alpha(\tau)$ は加速度でともに時間の関数である。

ここで $\theta(\tau)$ 、 $\alpha(\tau)$ が、ある関数 $\theta_0(\tau)$ 、 $\alpha_0(\tau)$ の近傍にある確率を指定して、先行船がある場所 (x, y) にくるところの確率をもとめるものであるが、それは一般に複雑であるし、実際の船舶の運動は限られた時間内では割合に簡単で、数個のパラメーター a, b, c, \dots を用いてあらわし得ることが多い。ゆえに (1) 式は関数形となり

$$\begin{cases} x = f(V, t, a, b, c, \dots) \\ y = g(V, t, a, b, c, \dots) \end{cases} \quad (2)$$

である。

パラメーター a, b, c, \dots の数は n 個とする。先行船が位置 (x, y) にくる確率をもとめるのに上式を逆に解くと $(n-2)$ 個のもう一組のパラメーター l, m, n, \dots を用いて

$$\begin{cases} a = a(x, y, l, m, n, \dots, V, t) \\ b = b(x, y, l, m, n, \dots, V, t) \\ \dots \\ \dots \end{cases}$$

とあらわし得るから、パラメーター a, b, c, \dots の確率分布関数 $\Phi(a, b, c, \dots) da db dc \dots$ があたえられ、かつ a, b, c, \dots の組と x, y, l, m, n, \dots の組が一對一に対応するならば、先行船が位置 (x, y) にくる確率は

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) dx dy \\ = dx dy \int \Phi(a, b, c, \dots) \frac{\partial(a, b, c, \dots)}{\partial(x, y, l, m, n, \dots)} dl dm dn \end{aligned} \quad (3)$$

であたえられる。

とくに簡単のためパラメーター a, b の二個のみを残し他は定数とすれば (3) 式は

$$\Psi(x, y) dx dy = \Phi(a(x, y), b(x, y)) \frac{\partial(a, b)}{\partial(x, y)} dx dy \quad (4)$$

となる。

2.2 後続船の位置の閉塞度合

以上の先行船の運動にたいし、時々刻々に後続船は衝突をさけるように運動を行なうはずであるが、そのさいの心理的反応を時々刻々にあつづけてゆくことは不可能であり、またそのときの運動の過程はいまのところ明らかにされていない。ゆえにここでは、後続船の運動にたいし、操船者の心理的むだ時間や船が運動をおこすまでに要する時間おくれなどのすべてをくり

こんだ実効時間おくれ T を定めることとする。このことは、この時間 T 内では後続船は直進しその後はいかなる退避運動も可能であるとするに等価である。この値 T は船舶の運動性能により、また速さ V 、船の長さ L 、船種、さらにはじめの位置の関数であり、心理特性のばらつきによって確率分布をなし、先行船と後続船の相互作用を考えた人間工学的動力学的な方程式をとくことによって得られるであろう。

この T をもちいて後続船の位置の閉塞度合を定めるには、 T より小さい時間 t のときの先行船の位置分布を Y の負の方向に Vt だけずらし、それを時間 0 より T まで平均すればよい。さらに出現確率や、他の船の影響などを考えに入れたとき実際の先行船にたいする後続船の相対位置分布が得られる。

3. 例：先行船の簡単な運動による後方閉塞領域

先行船にたいし簡単な運動を仮定し、それによって後方閉塞領域がどのようになるかをしらべよう。簡単のため閉塞度合がゼロでないような領域をもとめる。また T の値は前述のように場合によって異なるが、全体の平均をとっても十分と思われるから、ここでは定数とする。運動に二個のパラメーターによってあらわされるようにした。

3.1 単純回頭によるもの

先行船がある方向に針路を突然変えるような場合で、近似的に次の仮定ができる。

[過渡現象は考えず、ただちに定常円旋回にはいり、希望する方向でふたたび直進する。定常円旋回において速度は一般に小さくなる。]

したがって先行船の運動を決定するパラメーターとして回頭角 $\theta (0 \leq \theta \leq \pi/2)$ と回転半径 $D_\rho (D_{\rho_0} \leq D_\rho \leq \infty)$ をえらぶ。これはともに操船者によって定められる比重が大きく、確率分布 $\Phi(\theta, D_\rho) d\theta dD_\rho$ によってあたえられるからである。一方旋回のときの速度 V_{D_ρ} は D_ρ の関数であり、最小回転半径 D_{ρ_0} は船の長さによりほぼきまっている。ゆえに (4) によって先行船の位置分布の確率がきまる。

時間 t 後の先行船の位置にたいする表式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} t_1 &\equiv \frac{D_\rho \theta}{V_{D_\rho}} > t \quad \text{のとき} \\ \begin{cases} x = D_\rho(1 - \cos \theta) + V(t - t_1) \sin \theta \\ y = D_\rho \sin \theta + V(t - t_1) \cos \theta \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$t_1 \equiv \frac{D_\rho \theta}{V_{D_\rho}} < t$ のとき

$$\begin{cases} x = D_\rho \left(1 - \cos \frac{V_{D_\rho} t}{D_\rho} \right) \\ y = D_\rho \sin \frac{V_{D_\rho} t}{D_\rho} \end{cases} \quad (5)$$

図1の上側の図形は先行船の時間 t および時間 T の後の確率ゼロでない位置分布を示し、これらをそれぞれ Vt, VT だけ Y の負の方向にずらしたものが下側の図形で、時間 0 から T までこれらをすべて重ね

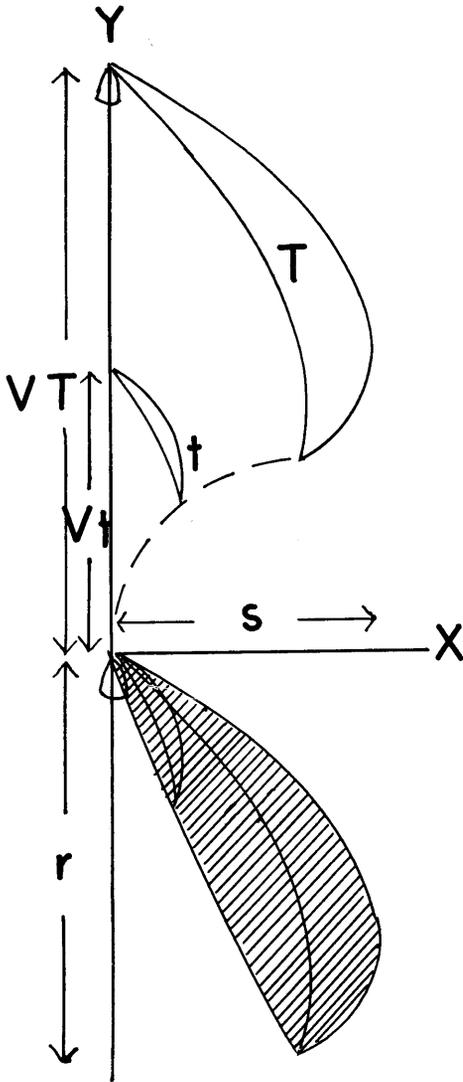


図1 単純回頭による先行船の位置分布および後方閉塞領域

あわせると、図の斜線の部分となる。この領域が閉塞の度がゼロでないような領域である。

ただし r, s はこの領域の最大長さおよび最大巾の半分を示し、これと Y 軸について対称な図形をあわせたものが後方閉塞領域である。

3.2 機関逆転制動によるもの

図2は機関逆転制動時の長さ200mぐらいの大型船の停止に至るまでの航跡である³⁾。これから運動のまよいは内側にまきこむような曲線であることがわかる。このとき速度はほぼ一様に減速することがわかっている。しかも針路は多くの場合、その一部分が円弧に近いなめらかな曲線をえがいている。ゆえに次の仮定をする。

[速さは一定の加速度 a で減じ、同時に進行方向は一定の角速度 φ で変化する。]

このとき、運動方程式をとくことによってその解は図2とほぼ同じ曲線になり、よい近似として採用できることがわかる。

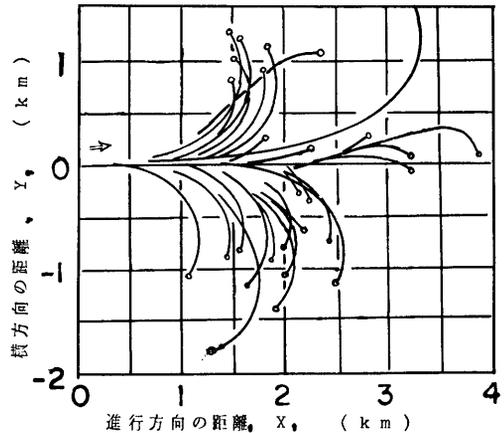


図2 機関逆転制動時の停止までの航跡

時間 t 後の先行船の位置にたいする表式は次のとおりである。

$$\begin{cases} x = \frac{V}{\varphi} (1 - \cos \varphi t) + \frac{\alpha}{\varphi^2} (\varphi t \cos \varphi t - \sin \varphi t) \\ y = \frac{V}{\varphi} \sin \varphi t + \frac{\alpha}{\varphi^2} (1 - \cos \varphi t - \varphi t \sin \varphi t) \end{cases} \quad (6)$$

図3の上側の図形は α を一定としパラメーター φ を $0 < \varphi < \varphi_{\max}$ の範囲で変えたときの先行船の位置分布をえがいたもので、四つの曲線はそれぞれ一つの時刻に対応している。これらを Vt だけ Y の負の方向にずらしたものが下の図形で、斜線の領域が閉塞の度がゼロでない領域である。これにさらに α の変化によ

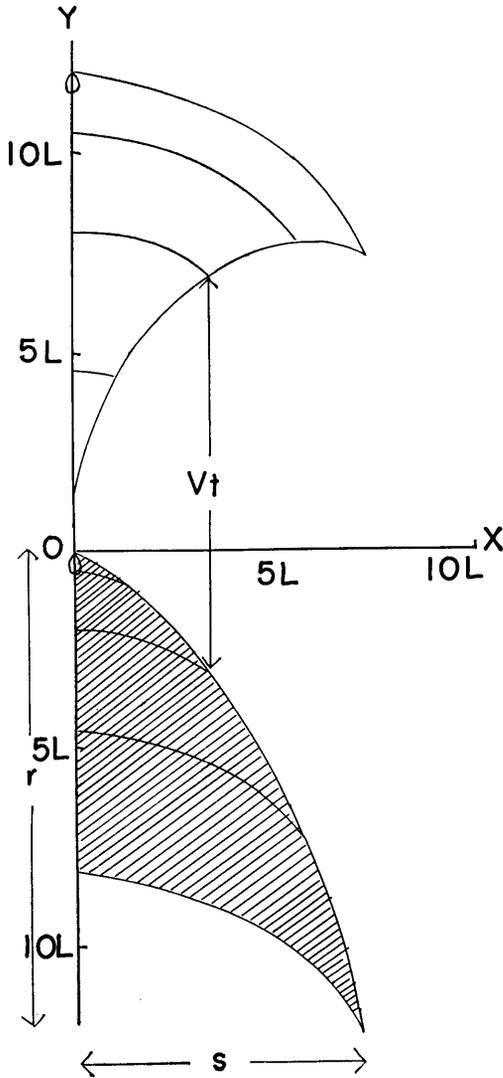


図3 機関逆転制動による先行船の位置分布および後方閉塞領域

るものを重ね合わせるべきであるが簡単のため α を一定とした。

ただし距離はすべて船の長さ L を単位としてあらわしてある。

4. 実測との比較

現在までにえられた実測データは閉塞の度合をしめす確率分布を得るためには、まだ量的に不十分である。ここでは確率ゼロでない領域の最大長さ r 、最大巾の半分 s を実測と比べることによって第3節でえた

(400)

表式の適用の可能性をしらべることにした。式中のパラメーターないし定数のうち $T, \alpha, \varphi_{\max}$ などを小型船にたいする実測データから逆にもとめ、 $D_{\rho 0}$ などは一般に知られている適当な値をつかってこれらを大型船の場合にも拡張し、得られた値を大型船の実測データと比較するという方法をとった。

いま、船舶はある大きさをもち点でないから、 r, s を算出するときその拡がりをつけ加えねばならない。先行船の姿勢が進路に直角になることがあるから、この付加項をそれぞれ船の長さ L にとる。また船舶の諸性能は一般に船の長さ L に密接に関係するから⁴⁾、式中のパラメーターないし定数も L の関数となる。他の文献⁴⁾でも行なわれているようにこれらを L^n に比例するとし、第一近似として $D_{\rho 0}, T, r, s$ は L に α 、 φ_{\max} は L^{-1} に比例するとする。このことからこれらのパラメーターないし定数の単位は次のようになる。

- $D_{\rho 0}, r$, および s 単位 L/m 無次元
- T 単位 $L \cdot \text{秒}/m$ 時間/長さ
- α 単位 $m^2/L \cdot \text{秒}^2$ (長さ)²/(時間)²
- φ 単位 $m/L \cdot \text{秒}$ 長さ/時間

(5), (6) 式より

$$r = \begin{cases} VT - D_{\rho 0} \sin \frac{kVT}{D_{\rho 0}} + 1 & V < \frac{\pi D_{\rho 0}}{2kT} \\ VT - D_{\rho 0} + 1 & V > \frac{\pi D_{\rho 0}}{2kT} \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} D_{\rho 0}(1 - \cos \theta) + V \left(T - \frac{\theta D_{\rho 0}}{kV} \right) \sin \theta + 1 \\ VT - \frac{\pi D_{\rho 0}}{2k} + D_{\rho 0} + 1 \end{cases} \quad (7)$$

ただし条件

$$\begin{cases} D_{\rho 0} \sin \theta + VT \cos \theta - \frac{\theta D_{\rho 0}}{k} \cos \theta - \frac{D_{\rho 0}}{k} \sin \theta = 0 \\ D_{\rho 0} \cos \theta + VT(1 - \sin \theta) - \frac{D_{\rho 0}}{k} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \sin \theta \right) \leq 0 \end{cases}$$

$V D_{\rho 0} \equiv kV$ とおいた。

$$r = V \left(T - \frac{1}{\varphi_{\max}} \sin \varphi_{\max} t \right) - \frac{\alpha}{\varphi_{\max}^2} (1 - \cos \varphi_{\max} t - \varphi_{\max} t \sin \varphi_{\max} t) + 1$$

$$s = \frac{V}{\varphi_{\max}} (1 - \cos \varphi_{\max} t) + \frac{\alpha}{\varphi_{\max}^2} (\varphi_{\max} t \cos \varphi_{\max} t - \sin \varphi_{\max} t) + 1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V < \alpha T \quad \text{のとき} \quad t &= \frac{V}{\alpha} \\ V > \alpha T \quad \quad \quad t &= T \end{aligned}$$

はじめに述べた方針にしたがって小型船の実測データから $r=5(L)$, $s=8/3(L)$ を採用し $D_{\rho_0}=10/3(L)$ をえらんで(7)に代入すると

$$T=1.8 \text{ sec/m } (L)$$

$$k=0.42$$

を得る。ただし $L=30\text{m}$, $V=3.5\text{m/sec}$ 。

この T と r, s を (8) に代入すると

$$\alpha=1.9 \text{ m}^2/\text{sec}^2 \text{ (1/L)}$$

$$\varphi_{\max}=1 \text{ m/sec (1/L)}$$

を得る。

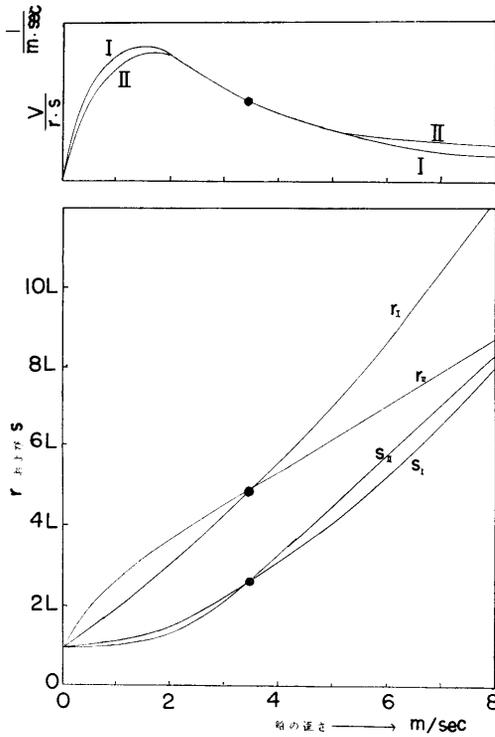


図4 閉塞領域と航行容量の速度依存性

この数値を用いたところの速さにたいする r, s および航行容量に比例する量 $V/r \cdot s$ の曲線を図4にしめす。添字 I は (7) 式, II は (8) 式にたいするものである。縦軸は船の長さ L を単位にとってある。航行容量に比例する量はその速度依存性の概要を知るためにえがいたので大きさを目盛らなかつた。

以上のパラメーターないし諸定数は小型船にたいする実測より得られた数値であるが、これをそのまま大型船に拡張する。このさい L および $1/L$ の因子だけ

異なってくる。

$$\begin{cases} L=100 \text{ m} \\ V=6 \text{ m/sec} \end{cases}$$

なる大型船にたいしては(7), (8)より

$$\begin{cases} r_I=860 \text{ m} \\ s_I=510 \text{ m} \\ r_{II}=710 \text{ m} \\ s_{II}=570 \text{ m} \end{cases}$$

を得る。これは実測よりもとめた大型船の閉塞領域とくらべれば、かなりよくあっていることがわかる。

逆に大型船のデータから諸定数をもとめ、小型船の結果と比較するのもよいが、大型船の実測データは小型船のそれに比して少なすぎるので行なわなかつた。

5. む す び

後方閉塞領域を、船の長さ L , 速さ V の関数として確率的にあらわすことを目的としてその基礎的考え方と一般式を論じた。これは普偏妥当なものと思われるが実用的でないので、運動に簡単な仮定をおいたふたつの場合にたいして解析的な表式を得た。これは現在までに得られた実測の範囲内ではよい一致をみた。ゆえにこの例において得られた式は第一近似として実用的であると思われる。

今後なすべきこととしては

- (1) 後続船が先行船をさけるための運動を解析して、実効時間おくれ T をあらわす式を求め、理論にこみ入れること。
- (2) 先行船の運動について、さらに他の型を考え、パラメーターの個数を増加すること。
- (3) 閉塞の度合を等高線の分布によってあらわすこと。

などが必要であると思われるので、さらに研究をすすめる予定である。

参 考 文 献

- 1) 船舶技研報告, Vol. 3, No. 2, p. 43~58 (1966)
- 2) 船舶技研報告, Vol. 3, No. 2, p. 59~68 (1966)
- 3) 瀬戸内海の余裕水深と航路幅員に関する調査報告書, 山口篤利 外 16 氏, 運輸省第三港湾建設局, 昭和39年 3 月
- 4) 船舶技研報告, 未刊