

海峡および水道の船舶交通現象に関する研究

B-I 船舶の航行容量の試算

藤井 弥平*

Navigational Traffic Phenomena on Narrow Straits

B-I On the Navigational Traffic Capacity of Fairway

by

Yahei Fujii

Since the speed and other quantities of ship dynamics are closely related to the ship length, L_{pp} , these quantities and the traffic capacity are sought as linear functions of λ ($=\text{Log } L_{pp}$).

Starting from a linear representation of λ for the dimension of the effective area of ships, the maximum density of ship group, ρ_{\max} , is also obtained as a linear function of λ by assuming "solid sphere" potential.

The traffic capacity is equal to the product of the maximum density and the speed, and hence, the basic traffic capacity, C_{basic}° , corresponding to the probable value of the speed, V° , is given as a linear function of λ .

A small deviation of the speed from the probable value, $V-V^{\circ}$, requires a small correction to the function.

1. ま え が き

大量の輸送を安全に行なうことが海運界の課題であり、このために船・人・航路港湾諸施設の三要素を交通工学の立場から考察することが必要である。共通工学部では京浜運河で小型船の閉塞領域の調査¹⁾にひきつづき浦賀水道で大型船を対象に同種の調査²⁾を行なうなど、交通工学で航行量と同程度に重要な航行容量について基本的な調査研究をすすめている。

とおからず高い経済性と安全性をそなえた世界的な航行管制網が海をおおうと考えられるが、このための資料として航行容量の知識はかくことのできないものである。また航行容量は船の運動性能にむすびついていから、日本近海のように混雑している所で高能率

の輸送をするために、どのような性能が必要であるかをあきらかにする点で造船技術にも関連する。航行容量が航路の整備拡充計画のよりどころとなることもあきらかである。

陸上交通においては交通容量の重要性が早くよりみとめられている。乗用車が前車に追従して走行するときの最小車頭間隔を観測し、数千例の値からその平均値 \bar{Y}_{\min} を速さ V の関数として求め、これよりその速さに対する最大交通量すなわち交通容量として V/\bar{Y}_{\min} を得ている。この値は四車線道路では時速40ないし50kmで最大となり、一車線あたり約2,000台/時に達する。日本の容量委員会では交通条件のみならず経済条件も考えにいれて実用交通容量(または設計交通容量)として四車線道路で一車線あたり1,200台/時を採用している。

海上交通においても航行量が増大して高速船が低速船をおいぬくことができなくなり、多くの船がひきつづいてほぼ一定の速さで群をつくって航行するようになったとき、航行量はその速さに対応する航行容量に達したといえよう。航行容量などの定義を報告(1)に

* 共通工学部

- 1) 船舶技術研究所報告, Vol. 3, pp. 1~16 (1966)
 - 2) 船舶技術研究所報告, Vol. 3, pp. 17~26 (1966)
- 報告(1)および(2)のように観測を主体とした報告をAシリーズとし、これに関連する諸問題を主として理論的に考察したものをひきつづいてBシリーズとして発表することとした。

のべたがここに下欄に再録しておく*。航行容量は飽和状態になったときの密度と速さの積であたえられ、密度は主として後方閉塞領域の大きさできまる。

海上交通の特殊性として船の運動諸性能と船の長さ(垂線間長 L_{pp})と密接にむすびついていることがあげられる。このことから船のむれの速さを L_{pp} であらわし、この場合の基本航行容量を観測でえた閉塞領域の大きさをもちいて L_{pp} の関数としてあらわすことを試みた。

なお、運動性能等と L_{pp} の関係、閉塞領域を運動性能より試算したものなどの資料を附録としてあわせて報告する。

2. 基本航行容量の近似式

自動車の長さは 3 m から 12 m と範囲がせまいが、船の長さは数 m から 300 m にもおよぶため、ふつう長さをあらわすのにもちいる垂線間長 L_{pp} をそのまま用いるよりも標準の長さ L_{pp}^{st} との比の対数 $\text{Log}(L_{pp}/L_{pp}^{st})$ をもちい、その他の量も対数をとって相関をもとめる方がよいと考えた。ここに st は“標準”をあらわす添字である。また簡単にするため m を単位として L_{pp} をはかりその数の 10 を底とした対数 $\text{Log} L_{pp}$ を λ とおく。またノット**を単位として速さ V をよみその対数を σ とすると

$$\text{Log}(L_{pp}/L_{pp}^{st}) = \lambda - \lambda^{st}$$

$$\text{Log}(V/V^{st}) = \sigma - \sigma^{st} \quad (1)$$

となる。

基本航行容量 C_{basic} と水路の幅 W の比は L_{pp} と V の関数であり、またこれはその L_{pp} および V に対する船のむれの最大密度 $\rho_{max}(L_{pp}, V)$ と船のむれの速さの積に等しい。したがって

$$C_{basic}/W = V \times \rho_{max}(L_{pp}, V) \quad (2)$$

とかける。これより C_{basic} の一つの近似式として

$$\text{Log} C_{basic} = a_0 + a_1(\lambda - \lambda^{st}) + a_2(\sigma - \sigma^{st}) + \text{Log} W \quad (3)$$

がえられる。もし $L_{pp}^{st} = 40\text{m}$, $V^{st} = 10$ ノットとすると $(\lambda - \lambda^{st})$ は最大で 1 程度、 $(\sigma - \sigma^{st})$ はたかだか 0.3 までとればよいであろう。ここでは (2) 式よりよい近似式をもとめようとしている。

2.1 船の速さと長さの関係

日本国籍の船舶の満載速度と L_{pp} の関係をまずしらべてみた*。

船舶明細書³⁾より λ の幅 0.05 について約 70 例づつランダムにえらびだしたものに、明細書に記載例の少い総トン数 30,000 トン以上のものを“船舶”⁴⁾からおぎない計 1,510 隻の満載速度と長さの関係をもとめこれを図 1 に示す。用いたデータは総トン数 100 トン以上のもので実線は $\text{Log} V$ の λ の上への回帰直線で点線は標準偏差 σ_r の範囲をあらわしている。

この回帰直線の式は

$$\sigma^{co} = 0.288\lambda + 0.520 \quad (\text{単位ノット}) \quad (4)$$

または

$$\sigma_m^{co} = 0.288\lambda + 0.231 \quad (\text{単位 m/sec}) \quad (4')$$

となる。ここに添字“co”はこの値が回帰直線に対応することを示す。

また鎖線で全船舶の 80% がはいる範囲をしめしてあり L_{pp} の 160 m 位の所にある山は計画造船によるものである。もし各々の λ に対して $\text{Log} V$ が正規分布をすると仮定すると $\pm \sigma$ 以内に全体の 68.3%, $\pm 2\sigma$ 以内に 95.5%, $\pm 3\sigma$ 以内に 99.7% 存在することになるが、実際には $\pm \sigma_r$ 以内に 75.1%, $\pm 2\sigma_r$ 以内に 96.5%, $\pm 3\sigma_r$ 以内に 99.3% あり、回帰直線より $3\sigma_r$ 以上はなれたものはほとんどが高速漁船である。

図 2 に京浜運河¹⁾ および浦賀水道²⁾ での観測値とさきに求めた回帰直線をしめす。上下の鎖線の間に観測値の 80% があり、全体の 92% がさきにもとめた回帰直線の上下 $2\sigma_r$ の範囲内にある。

浦賀水道観音崎前面では船はその満載速度で航行しているとみなしてよいと考えられる。京浜運河では大きい船の速さは V^{co} よりある程度小さく、また性能のおとる木船が多いため全般に σ が小さめである。附録 I の表に観測した σ の回帰直線をしめしてあるが、 σ^{co}

* 基本航行容量：通常の船型をもつほぼ一定の長さの船が通常の航行条件のもとに、おいこしができないほどの密度で航行するときの最大航行量
可能航行容量：そのときその場所の航行条件のもとにその水路を通過できる最大航行量
実用航行容量：可能航行容量に気象海象などの重みをつけた平均や安全係数、経済条件などを考えにいれて定められる水路の航行容量、ここでは研究の対象にいれない。

後方閉塞領域：先行船に対する後続船の相対位置の密度分布を求め、この密度極大の点をつらねる線と船首をとおり進行方向に直角な線にかこまれた領域

** 1 ノット = 1,852 m/時 = 0.5144 m/sec = 0.5 m/sec

* 外国籍の船舶も日本近海で多くみられるが、これらは大型の鋼船でおなじ大きさの日本国籍船とほぼ同等の性能をもつと考えられる。

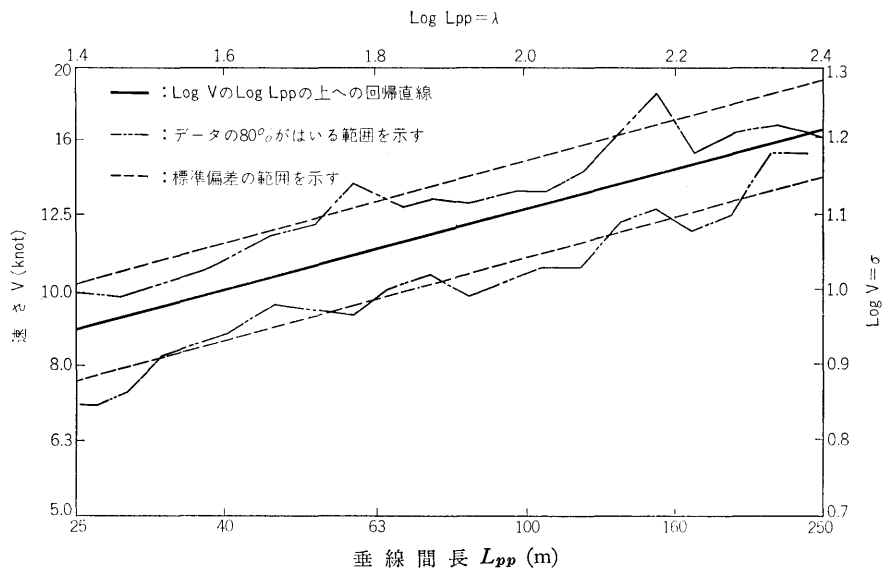


図1 汽船の満載速度と長さの関係

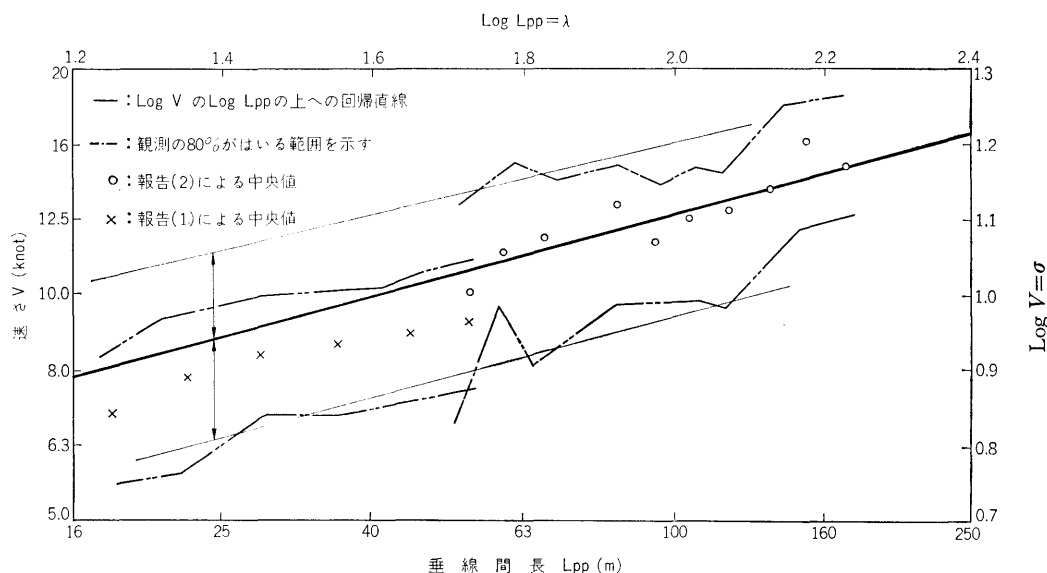


図2 速さの観測値と垂線間長の関係 (矢印は $2\sigma r$ の範囲を示す)

とのちがいが、たかだか 0.03 位であり式(4)をもちいても大きな相違はない。したがって船の速さを V^{co} で近似することとし、通常の船型をもつ船が大きい密度で航行しても $\sigma^{co} \pm 2\sigma r$ の範囲内に船のむれの速さがあると推定できよう。

2.2 船の密度

これまでの観測結果を附録IIのように整理し、これをまとめると後方閉塞領域は図3-aに実線でしめした

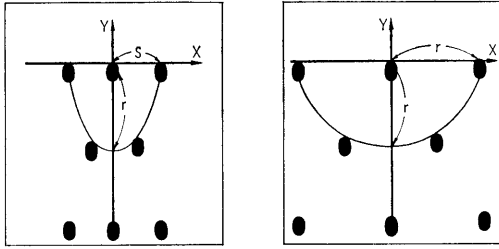
ような半楕円形とみなせる。この進行方向の径 r (長径) と短径 s の比はほぼ一定であり、 V^{co} に対する $\text{Log } r$ すなわち $\text{Log } r^{co}$ を λ の一次近似式としてもとめた。すなわち

$$s/r = 0.55 \tag{5}$$

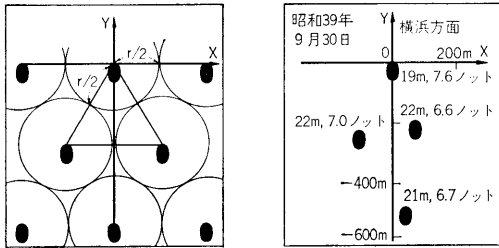
$$\text{および } \text{Log } r^{co} = 0.99 + 0.94 \lambda \pm 0.07 \tag{6}$$

(r の単位: m)

がえられた。



a. 配位図
b. 水路幅を r/s 倍したもの



c. 船を半径 $r/2$ の円でおきかえたもの
d. 観測の一例(京浜運河)

図 3 後方閉塞領域を半楕円形で近似したとき、密度最大となる配位をもとめるための説明図と観測された配位

ここで閉塞領域を進行方向に垂直な X 方向に r/s 倍にひきのばして考えると、閉塞領域は先行船の船首を中心とし半径を r とする半円となり図 3-b に示すものとなる。多くの船が閉塞領域を互におかさないうためには各船首が r だけへだたてていなければならない。いいかえると図 3-c のように船主を中心に半径 $r/2$ の円をぎっしりつめたとき最大の密度 ρ_{max} がえられる。これは図 3-c を参考にしておかんたんに計算でき

$$\rho_{max} = \left(\frac{r}{s}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) / \pi \left(\frac{r}{s}\right)^2 \doteq 1.15/rs \quad (7)$$

となる。なお図 3-d は実際に観測された一例である。また水路巾 W が s にくらべて十分大きくないときは 1.15 という値がかわってくるが、これのもとめ方は附録 II にのべる。

ここで注意しなければならないのは以上の計算が剛体モデルによっていることである。これをかなり厳密にとりあつかうには船首を中心にした心理的ポテンシャルおよび力学的ポテンシャルをあわせた二次元ポテンシャルの場を考えなければならない。たとえ進行方向に直角な方向のスケールを r/s にひきのばしたとしても中心力の場とはかぎらない。一步ゆずって中心力の場と仮定しても図 4-b に示すような形をもっている

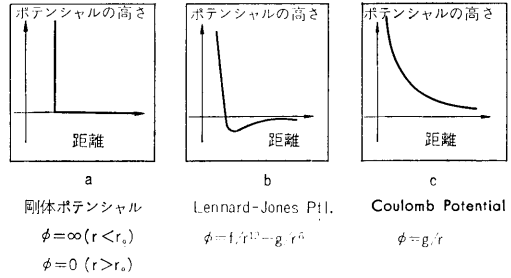


図 4 中心力場のポテンシャルの例

かもしれない。

しかし気体分子運動論においては第一近似として気体分子を剛体球と仮定し、すなわち分子相互間に働く力のポテンシャルを図 4-a と仮定して圧力粘性等の気体の性質がかなりよく定量的に記述できることは周知の事実である。この剛体ポテンシャルを引力による項などを加えて修正した Lennard-Jones 型ポテンシャル(図 4-b)をもちいて衝突断面積をもとめこれより粘性や熱伝導などの輸送現象に関する諸量が一段とよい近似でもとめられる。気体のうちネオン、アルゴン、メタン等は分子間引力が小さいので剛体ポテンシャルをもちいてもかなりの密度までよい近似がえられる。さらに圧縮冷却して結晶としたとき、丁度ボールを箱にぎっしりつめるときのように最も稠密な配位である面心立方格子をつくる。

二隻の船が接近して航行するとき平均速度(ベクトル)をおおのこの速度よりさしひくと、気体分子が接近しておきる現象に似たふるまいが観測されている。したがって気体分子の衝突断面積に対応して閉塞領域(前方後方をふくめて)の知識がえられる。これをまず剛体のポテンシャルをもちいて近似すれば船がぎっしりつまった状態の密度が二次元の稠密格子の密度としてもとめられ、したがって航行容量の近似値がえられる。

すなわちこのポテンシャルの知識を船の密度がある程度高い時の観測から得て、これをもちいて船がぎっしりつまったとき(結晶あるいは固体)の密度を或程度までよく近似できることになる。

もし、二船間に働く力のポテンシャルがかなり大きい遠距離力の項、たとえば図 4-c に示すようなクーロンポテンシャルをふくむとき、二船の相互距離から航行容量をもとめることはかなり困難となる。たとえ Ewald 法をもちいても、よい近似を得るのはむずかしいと考えられる。このことは隣接する船のみならず遠

表 1 巾 1 km の水路の基本航行容量 $C_{\text{basic}}^{\text{co}}$

L_{pp} (m)	12.5	25	50	100	200
V^{co} (ノット)	6.8	8.3	10.2	12.3	15.1
$\text{Log } C_{\text{basic}}^{\text{co}}$	3.24~3.52	2.76~3.04	2.26~2.59	1.81~2.04	1.33~1.61
$C_{\text{basic}}^{\text{co}}$ (隻/時)	約 2,400	約 800	約 270	約 90	約 30

くはなれた船まで考慮しながら操船することに対応する。

ここでは剛体ポテンシャル近似の程度で計算をすすめることとする。これでも水路をかたむけたみぞでおきかえ、船をボールでおきかえて陸岸の影響や流れの中の障害物の影響⁹⁾などもかなり定量的に推察できると考えられこの有用性は小さくない。

さて式(2)(4')(5)(6)および(7)からただちに ρ_{max} が計算できる。すなわち

$$\text{Log } C_{\text{basic}}^{\text{co}} = \text{Log } W + \sigma^{\text{co}} + \text{Log } 1.15 - \text{Log } r - \text{Log } s \quad (8)$$

であるから

$$\text{Log } C_{\text{basic}}^{\text{co}} = \text{Log } W + 1.59 \lambda - 1.43 \pm 0.14 \quad (9)$$

(C の単位: 隻/秒)

がえられ、単位を隻/時にあらためると、

$$\text{Log } C_{\text{basic}}^{\text{co}} = \text{Log } W + 2.13 - 1.59 \lambda \pm 0.14 \quad (10)$$

(C の単位: 隻/時)

となる。これを巾 1 km の水路に適用して計算したものが表 1 である。

なお船の群の速さは V^{co} より或程度遅くなりがちと考えられるが、そのとき $\text{Log } V - \text{Log } V^{\text{co}} (= \sigma - \sigma^{\text{co}})$ は大きくても $2\epsilon_r (= 0.13)$ ぐらいであるから、群の速さが V であるときの容量 C_{basic} の近似式として

$$\text{Log } C_{\text{basic}} = \text{Log } C_{\text{basic}}^{\text{co}} + \left\{ 1 - 2 \frac{\partial(\text{Log } r)}{\partial \sigma} \right\} (\sigma - \sigma^{\text{co}}) \quad (11)$$

を用いればよい。補正項のうち $\partial(\text{Log } r)/\partial \sigma$ については閉塞領域の大きさの速度依存性についての理論計算または今後の観測によって求められる。

水路 W を京浜運河の片側可航巾 250 m にとり、船の長さを 25 m とすると、式(10)より $C_{\text{basic}}^{\text{co}}$ として約 200 隻/時 (誤差を考えると 145~275 隻/時) というかなり大きい値となる。一方これに対応する観測値として 150 隻/時 (5 分間最大航行量を 1 時間にひきなおしたものがえられている。

3. む す び

船の速さなどの運動性能が長さや深い関係をもっていることに注目し、日本の船舶の速さなどを垂線間長であらわすことを試みた。

ついで報告(1)および(2)にのべられた観測値にもとづいて、船の閉塞領域をある大きさの剛体の円板でおきかえて最大密度をもとめた。また船の群の速さを通常の船型をもつ船の速さの平均値 V^{co} に近いと仮定しこのときの基本航行容量 $C_{\text{basic}}^{\text{co}}$ の式をえた。

これを長さ 25 m の船が巾 250 m の水路を航行するときに適用して約 200 隻/時をえたが、これはほぼ同じ条件のときの観測値の最大のもの 156 隻/時に近い。以上の値は常識よりかなり大きいものと考えられるが、船が水路いっぱい平行して航行するなどの多くの仮定があることおよびここで求めたのは基本航行容量であって、実用航行容量を求めるには更に多くの調査研究が必要であるという点に留意していただきたい。

4. 謝 辞

船の運動諸性能のデータを提供していただいた船舶検査官前田至孝氏に深く感謝しまた多くの有用な意見をよせられた海上保安庁佐々木信義氏、第二港湾建設局藤井宏知氏はじめ各位に謝意を表する。

附録 I 船の諸元と長さの関係

本文において船の満載速度と長さの関係についてのべた。

これに前田氏⁹⁾による旋回、停止性能と長さの関係をあわせて表 2 にしめす。旋回性能として旋回縦距(アドバンス) D_A 、旋回横距(トランスフェ) D_t 、旋回径(タクティカルダイアメータ) D_T 、および定常旋回半径 D_p をとったがこれらはほぼ長さに比例する。図 5 に一例として旋回径と長さの関係を示しておく。

一方停止距離 D_{stop} は長さのほぼ 1.4 乗に比例して

表 2 船の諸性能および大きさとの関係 ($\lambda = \text{Log } L_{pp}$)

要 目	近 似 式	標準偏差 %	データ数	対 象 船 λ		
満載速度 V (ノット)	$\text{Log } V = 0.288 \lambda + 0.520$	0.063	16	1510	1.4~2.4	I
観測速度 V (ノット)	$\text{Log } V = 0.205 \lambda + 0.607$	0.094	24	120	1.7~2.3	IV
観測速度 V (ノット)	$\text{Log } V = 0.271 \lambda + 0.505$	0.085	22	513	1.0~1.6	V
総トン数 GT (トン)	$\text{Log } GT = 2.65 \lambda - 1.70$	0.080	20	167	1.2~2.4	II
総トン数 GT (トン)	$\text{Log } GT = 2.73 \lambda - 1.85$	0.057	14	92	1.6~2.4	I
型 幅 B (m)	$\text{Log } B = 0.751 \lambda - 0.274$	0.18	51	167	1.2~2.4	II
型 幅 B (m)	$\text{Log } B = 0.855 \lambda - 0.532$	0.14	38	92	1.6~2.4	I
型 深 D (m)	$\text{Log } D = 0.844 \lambda - 0.767$	0.19	55	167	1.2~2.4	II
型 深 D (m)	$\text{Log } D = 0.928 \lambda - 0.930$	0.15	41	92	1.6~2.4	I
旋回縦距 D_A (m)	$\text{Log } D_A = 0.98 \lambda + 0.56$	0.11	29	100	1.2~2.4	III
旋回横距 D_t (m)	$\text{Log } D_t = 1.11 \lambda - 0.04$	0.15	41	91	1.2~2.4	III
旋 回 径 D_T (m)	$\text{Log } D_T = 0.99 \lambda + 0.52$	0.12	29	54	1.2~2.4	III
定常旋回半径 D_p (m)	$\text{Log } D_p = 1.03 \lambda + 0.23$	0.18	51	49	1.2~2.4	III
停止距離 D_{stop} (m)	$\text{Log } D_{stop} = 1.39 \lambda + 0.04$	0.17	48	28	1.2~2.4	III

I: 船舶明細書および船舶より II: Iのデータに田口氏ら⁷⁾のものを加えたもの
 III: 前田氏⁶⁾による VI: 報告(2)による
 V: 報告(1)による, ひきぶねをのぞく。

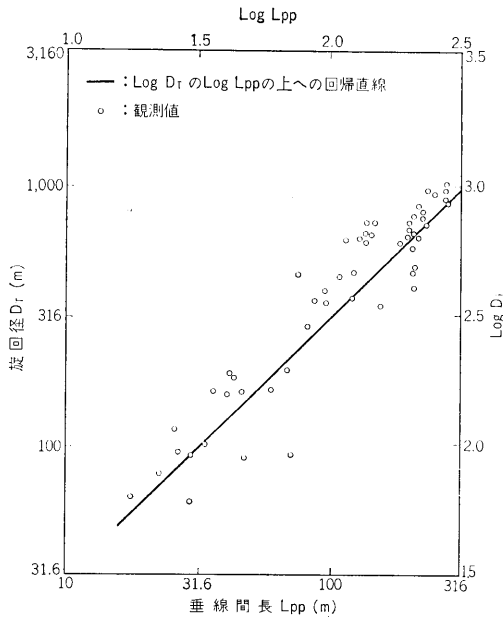


図 5 旋回径 (タクティカル ダイアメータ) の垂線間長の関係

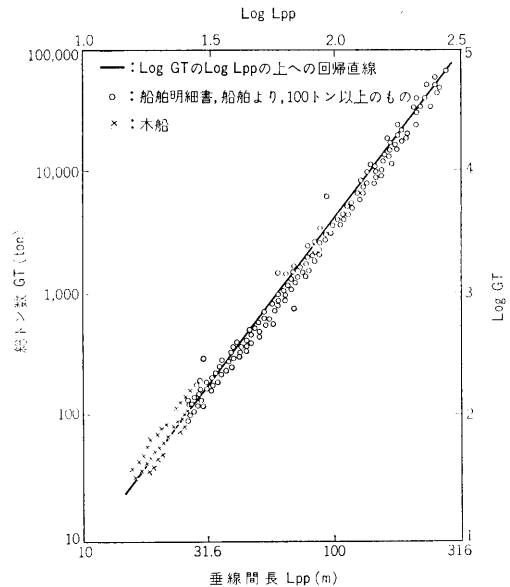


図 6 総トン数と垂線間長の関係

いる。

なお、統計資料では船の大きさを総トン数 GT であらわすのが通例であるから木船⁷⁾もふくめてこの関係を図6にしめす。また報告(1)においては全長を観測しているので表3に与えた係数をかけることにより垂線間長に換算した。この係数は日本船舶明細書から求めたものである。

附録 II 閉塞領域の大きさ

報告(1)および(2)に小型船および大型船の閉塞領域の大きさがのべられている。(1)のデータは全長を観測したものであるから表3をもちいて垂線間長に換算し、さらに長さの範囲を10mないし50mから12.5mないし50mにかえて閉塞領域をもとめたが、これは大きさも形も(1)および(2)に報告されたものとほとんど変わりがなかった。これらの数値をまとめて表4に(イ)および(ロ)として示す。ここに r は閉塞領域の進行方向の大きさで、 s はそれに直角な方向の大きさである。なおこのときの対象となった船の長さおよび速さのひろがりを見せ、図7に示す。図7の中の数字は頻度をあらわしている。

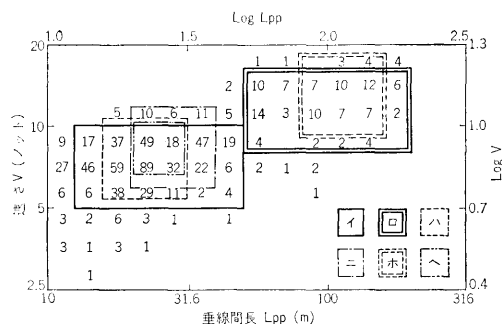


図7 対象船の速さと長さの分布

基本航行容量を求めるとき、できるだけ小さい $\Delta\lambda$ と $\Delta\sigma$ に対する r と s を求めたいのである。しかし表4に示すように $\Delta\lambda$, $\Delta\sigma$ を小さくすると急激にデータ数が減って r および s を求めるのがむずかしくなる。

$\Delta\lambda$ および $\Delta\sigma$ をともに0.3として r と s を求めてこれも表4に示す。このとき先行船に対する後続船の分布図のうち三例を図8に示してある。ここに前報告とおなじ検定を行なった結果を角印(異常に少い)および丸印(異常に多い)をもってあらわす。図8-aではデータ数が少なすぎて有意に閉塞領域の大きさをも

表3 全長より垂線間長をもとめるための換算係数

全長 (m)	10~20	20~40	40~80	80~160	160~320
換算係数	0.90	0.90	0.92	0.93	0.95

表4 閉塞領域の長径 r と短径 s

記号	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ケ	コ	サ	セ	ソ	
観測場所*	京	浦	京	京	京+浦	浦	浦	京	京+浦	京	浦
L_{pp} (m)	12.5~50	50~200	10~20	20~40	40~80	80~160	160~320	15~30	30~60	20~32	80~125
λ	1.1~1.7	1.7~2.3	1.0~1.3	1.3~1.6	1.6~1.9	1.9~2.2	2.2~2.5	1.18 ~1.48	1.48 ~1.78	1.3~1.5	1.9~2.1
V (ノット)	5~10	8~16	5~10	6.1 ~12.2	7.5 ~15.0	9.1 ~18.2	11.2 ~22.3	5.7 ~11.3	6.9 ~13.8	6.6 ~10.5	12~19
σ	0.7~1.0	0.9~1.2	0.7~1.7	0.79 ~1.19	0.88 ~1.18	0.96 ~1.26	1.05 ~1.35	0.75 ~1.05	0.84 ~1.14	0.91 ~1.11	1.08 ~1.28
データ数	500	300	48	127	34	81	2	166	23	85	15
r (m)	200±20	700±50	**	180±20		900±100		200±20		180±40	
s (m)	120±20	350±50		100±20		500±100		100±20		100±40	
s/r	0.6	0.5		0.56		0.56		0.5		0.56	
$\text{Log } r$	2.3	2.85		2.25		2.95		2.3		2.25	

* 浦は浦賀水道, 京は京浜運河の略

** 空欄はデータ数が不足で r および s がもとめられなかったため

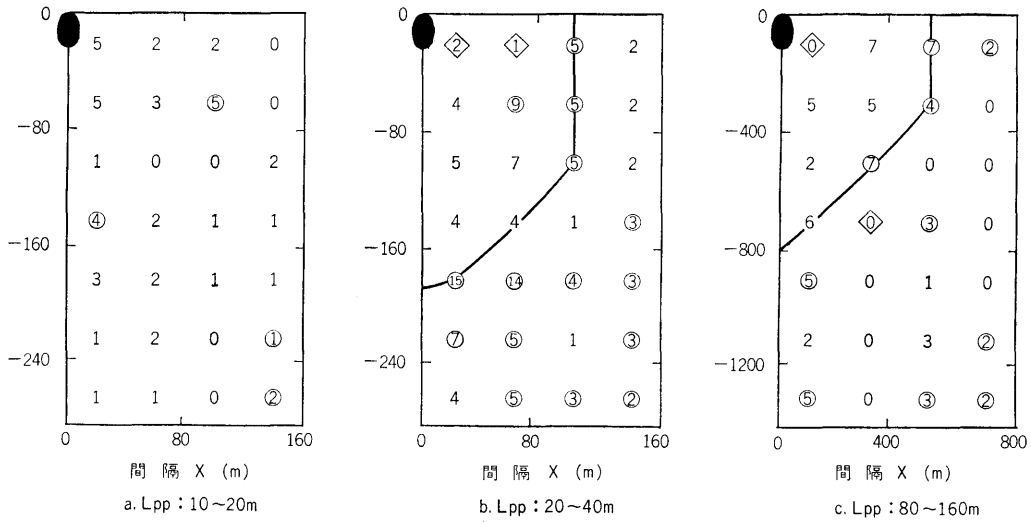


図 8 先行船に対する後続船の相対位置の分布図

角印は異常に頻度の少いことを、丸印は異常に多いことをしめし
 実線は後方閉そく領域の右半分をしめす

とめることができない。

このように適当な大きさ、たとえば後方約 $20 L_{pp}$ 左右約 $10 L_{pp}$ 位の大きさの平面上にあるデータ数がほぼ 100 以上あると有意義に閉塞領域が求められ、50 位では求めるのが困難であることが経験的にわかった。

さらに一段と $\Delta\lambda$ および $\Delta\sigma$ を小さくしたものについて求めた r と s も表 4 に示す。

ここで (1), (2), (3) と $\Delta\lambda$, $\Delta\sigma$ を順に小さくしていても r および s の値はあまり変化しない。すなわち

$$\lim_{\substack{\Delta\lambda \rightarrow 0 \\ \Delta\sigma \rightarrow 0}} r \quad \text{および} \quad \lim_{\substack{\Delta\lambda \rightarrow 0 \\ \Delta\sigma \rightarrow 0}} s$$

が存在すると考えてよい。

また s と r の比はかなり一定値に近く 0.5 と 0.6 の

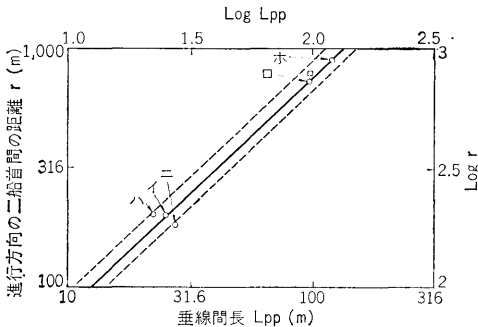


図 9 閉塞領域の進行方向の大きさ r と L_{pp} の関係

間にある。よってこの比を 0.55 で近似しておく。また図 7 で示したように対象船の λ - σ 平面上での拡がりの重心は回帰直線 σ^{∞} の上にあるとみなせる。そこで σ^{∞} に対する $\text{Log } r^{\infty}$ の値を求めるために (1)(2)(3)(4)(5) の 5 つのデータを示したのが図 9 である。これから σ^{∞} に対応する $\text{Log } r^{\infty}$ の λ についての一次近似式

$$\text{Log } r^{\infty} = 0.99 + 0.94 \lambda \pm 0.07 \quad (6)$$

がえられる。

附録 III 水路の巾が十分大きくないときの密度のもとめかた

船を半径 $r/2$ の円板、たとえば一円アルミ貨でおきかえ、ついで水路幅を r/s 倍に換算し陸岸を板であらわす。板の間水路にあたる部分にアルミ貨をぎっしりならべることにより最大の密度がかんたんにもとめられる。陸岸と船の接近できる最短距離が $s/2$ とことなるときはその分をあらかじめ補正しておく。

附録 IV 一隻あたりの航路幅員を与えた場合の航行容量

陸上交通では車線の幅が 3.5~4 m と定められていて理論的に最小車頭間隔をみつめることができる。これは前車が急停止するときの最短距離と前車の長さおよび最小車頭間隔の和が、後車の停止距離と前車の赤ランプをみて後の操縦者が反応をしめすまでの間に、

後車のすすむ距離の和よりも大きいとしてもとめられる。

海上交通においては車線幅にあたる船線幅を研究している段階であって、山口氏⁹⁾は二船が平行してすすむときにおこる水力学にもとづく吸引力より二船は少くとも L_{pp} ははなれていなければならない、またこれに蛇行運動の幅を加えねばならないことを示した。

しかし前報告によると船線幅は s となりこれは約 4 L_{pp} で上記の値よりかなり大きい。かりに船線幅を s とし船頭間隔を r として前節のように長さを制限した場合の航行容量をもとめると、簡単な計算によりさきにもとめた値に $\sqrt{3}/2$ を乗じたものすなわち約 14% へらした値となる。

ここでは車頭間隔を計算でもとめるときのように、先行船が右、左折または停止の信号*をしたとき後続船が停止して衝突をさけると仮定して前後の距離 D_s をもとめてみよう。また後続船の操縦者の反応時間や信号音の伝播時間は船の運動の時間より十分小さいのでこれを無視する。また船の停止距離 D_{stop} 、旋回縦距 D_A および型幅は表 2 の近似式によってもとめる。なおこれらの量のうち最大 (添字 max) および最小 (添字 min) のものは標準偏差の 2 倍 2σ だけ中央値よりはなれているものとする。

おなじ船線をゆく後続船が旋回しようとする先行船にあたらなためには

$$D_A^{\min} - B^{\max}/2 + D_s > D_{stop} \quad (12)$$

が必要条件である。また停止しようとする先行船に衝突しないためには

$$D_{st}^{\min} - L + D_s > D_{stop} \quad (13)$$

が成立しなければならぬ。式(12)および(13)と表 2 の近似式を用いると D_s が次のいずれよりも大きくなければならぬ。すなわち旋回の場合は

$$D_{stop} - D_A^{\min} + B^{\max}/2 = 1.1L_{pp}^{1.39} - 2.2L_{pp}^{0.98} + 0.6L_{pp}^{0.75} \quad (14)$$

また停止のときは

$$D_{stop} - D_{stop}^{\min} + 1.1L_{pp} = 1.1L_{pp}^{1.39} - 0.5L_{pp}^{1.36} + 1.1L_{pp} \quad (15)$$

より大きくなければならない。ここに $1.1L_{pp}$ は全長をあらわす。

式(12)および(13)を L_{pp} の値 28 m および 112 m について計算すると旋回の場合はそれぞれ 62 m と 580

* 海上衝突予防法第28条によると針路を右転するときは短音 1 回、左転には二回、後進には三回の信号をしなければならない。

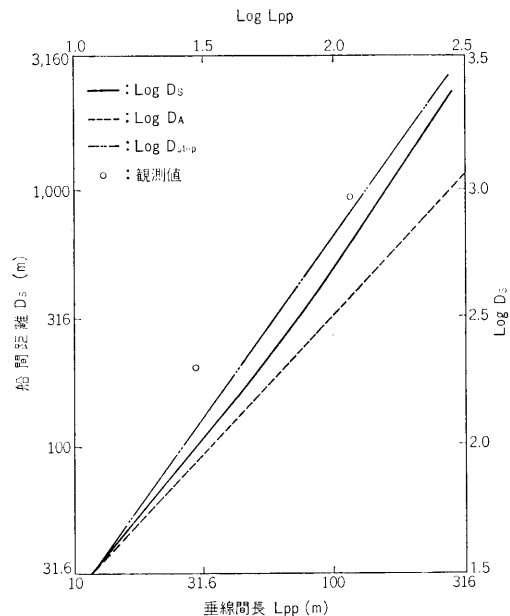


図 10 船間距離の試算値

m, 停止のときはそれぞれ 92 m と 550 m となり D_s は 28 m には 92 m 以上, 112 m には 580 m 以上でなければならない。この D_s の下限を図 10 にしめす。なお D_A^{\min} および D_{stop}^{\min} は図の破線および一点鎖線にそれぞれ平行でそれらより標準偏差の二倍だけ小さいと仮定してある。一方観測にもとづいてえた表 4 に示された値は図 7 の丸印のように D_s より大きく、 L_{pp} の値 28 m に対しては 1.80 m, 112 m に対しては 900 m と約 2 倍近い大きさをもつ。これは後続船が後進をかけて急停止して衝突をさけるという仮定がきびしすぎることもおよび心理的要因を考えにいれないことによると考えられる。

理論的に閉塞領域の大きさおよび航行容量をもとめるためには、船の運動諸性能およびそのちらばりを考えて、先行船の変針、減速、および停止のときの位置をたとえば電子計算機によってシミュレートして時間の関数としてもとめ、これに衝突あるいは水学的に大きい吸引力の働く範囲にはいることを変針、減速または停止によってさけられるような後続船の相対位置をやはり運動性能とそのちらばりを考慮してシミュレートしてもとめるべきであろう。なお操船者の心理およびその分布をアンケート等よりもとめて計算にいれねばならないと考える。

なお蛇足かもしれないが、長さを制限し速さに差が

少くなったとき図9にみられるように非常に多くの船が先行船の後方 r ところに集まることのあるのは注目してよいと思う。これは船線をきめて一次的のとりあつかいをするに、かなりの妥当性をあたえるものである。

附録 V 観測に必要な日数の推定

先行船に対する後続船の相対位置を適当な大きさ、たとえば先行の船首の後方 $15 \sim 20 L_{pp}$ 、左右に $7 \sim 10 L_{pp}$ 位の大きさの範囲にプロットして閉塞領域をもとめたが、このときデータ数が100程度ないと有意に領域がもとめられないこと、および300~500位あるとほぼ十分であるらしいことを経験的に知ることができた。基本航行容量をもとめるとき、長さが L_{pp} と $L_{pp} + \Delta L_{pp}$ 、速さが V と $V + \Delta V$ の間にありしかも相互の距離間隔が前述の範囲にある二船の組を100以上観測することが要求される。長さおよび速さが上述の範囲にある船の出現確率を $p(L, V) \Delta L_{pp} \Delta V$ とすると ΔV および ΔL_{pp} がある程度小さいときもとめている二船の組の出現確率は、ほぼ $p^2(\Delta L_{pp})^2(\Delta V)^2$ に比例

し非常に小さいものになりやすく、したがってかなりの日数が必要となるこのありさまを表からもうかがえる。

出現確率 p を $p_1(L_{pp})p_2(V)$ とかきあらためてみると、 p_1 は表5にみられるように日本国籍の鋼船と木船の隻数の和にかなりの相関をもつ。一方 p_2 は図2からうかがえるようにほぼ満載速度を中心にガウス分布に近い形をもつ。

これらのことから大型船の基本航行容量およびその速度依存性を求めるためには、半年から一年におよぶ観測を要するのではなからうか。なお、10~50mの小型船の組は京浜運河において三日間で約500例。50~200mの大型船の組は浦賀水道で15日間で約80例観測されている。

また、一方向に航行する場合について両方向にすすむ場合、前方閉塞領域の概念が重要なものとなる。浦賀水道において前方閉塞領域をもとめるため、船の行きちがう場合の観測もこころみだが15日間で10例あるかどうかという位例数が少なかったことからこのための観測が一層長い期間を必要とすると考えられる。

表5 日本国籍船舶および観測船舶の長さに対する分布

総トン数	5	10	20	50	100	200	300	500	1000	2000	5000	1万	2万	5万	10万
垂線間長 (m)	8	11	14	20	26	33	38	45	60	80	110	140	180	250	
全船舶	23,139 46.7%		18,319 36.9%		6,395 12.9%		50.3	348	339	402	95	72	1		
漁船	8,127	7,112	4,786	3,510	672	805	112	72	31	39	10				
鋼船	673		1,558		2,066		874	391	276	308	373	85	72	1	
木船	7,227		8,645		1,957		21								
鋼+木船	7,900 32.4%		10,023 41.7%		4,023 16.6%		895 3.7%	391	276	308	373	85	72	1	
報告(1)	121 15.2%		301 37.9%		214 26.9%		110 14.1%	26	8	6	1				
報告(2)								46	35	37	36	32	8		
								23.9%	18.1%	19.2%	18.7%	16.6%	0.4%		

- (a) 水産庁漁船統計表, No. 17, 昭和39年11月
- (b) 海事統計月報, 運輸省, 昭和39年別冊, 昭和39年7月の数字。
- (c) 報告(1), 京浜運河, ひきぶねをのぞく。全長 L_{pp} に換算。
- (d) 報告(2), 浦賀水道, 50m以上のものを観測。

参考文献

- 1) 船舶技術研究所報告, 3, 1~16 (1966)
- 2) 船舶技術研究所報告, 3, 17~26 (1966)
- 3) 日本船舶明細書, 日本海運集会所(神戸市生田区明石町) 昭和38年
- 4) 船舶, 天然社, 37, 38, 39 (1963~1965)
- 5) 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 他16氏, 運輸省第三港湾建設局, 昭和39年3月
- 6) 前田至孝, 未発表
- 7) 田口賢士, 外山 嵩, 造船協会論文集, No. 116 p. 190 (1965)