水路の基本航行容量の一試算

藤井弥平* 渡辺健次* 田中健一*
山田一成* 沢井秀之*

Basic Traffic Capacity of a Fairway

Y. Fujii, K. Watanabe, K. Tanaka,
K. Yamada and H. Sawai

Abstract

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 $\lambda (= \text{Log} L_{pp})$.

Starting from a linear representation of λ for the dimension of the effective area of ships, the maximum density of ship group, $\rho_{\max}$ 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, $C_{\text{basic}}^{\text{co}}$, corresponding to the probable values of the speed, V^{co} , is given as a linear function of λ .

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

1. ま え が き

今日交通工学といえは陸上のそれをさすものと考えられているが、近來の船舶交通量の増大にともない海上交通工学の開拓が要請されている。交通工学は交通の性格の分析と交通容量（航行容量）の問題をふくみ、水路や港湾諸施設設計の資料を得、また効果的に交通を規制して高度の航行量を確保し、しかも海難を減少させることを目的とするものである。海上交通の性格の分析および航行量について報告は少なくないが、筆者らは特に航行容量の問題について調査研究を進めてきた。*

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} ）と密接にむすびについていることがあげられる。このことから船の速さを 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} の関係などの資料を附録としてあわせて報告する。

*船舶技術研究所（三鷹市新川700）

**藤井，田中，渡辺，山田，関，日本航海学会誌，35（1966）P71

2. 基本航行容量の近似式

自動車の長さは3mから12mと範囲がせまいが船の長さは数mから300m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つ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

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

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

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

$$C_{basic}/W = V \cdot \rho_{max}$$

とかける。これより $\text{Log } C_{basic}$ を一次の近似式として

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

であらわす。もし $L_{pp}^{st} = 40\text{m}$, $V^{st} = 10\text{ノット}$ 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。

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* より λ の幅0.05について約70例ずつランダムにえらびだしたものに、明細書に記載例の少ない総トン数30,000トン以上のものを“船舶”**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_v の範囲をあらわしている。

この回帰直線の式は

$$\sigma^{co} = 0.288\lambda + 0.520$$

$$(\text{単位ノット}) \dots\dots (4)$$

または

$$\sigma_m^{co} = 0.288\lambda + 0.231$$

$$(\text{単位m/sec}) \dots\dots (4')$$

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し鎖線は全船舶の80%がはいる範囲を示す。

図2に京浜運河および浦賀水道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

図1 汽船の満載速度と長さの関係

* : 日本船舶明細書, 日本海運集会所, 昭和38年

** : 船舶, 天然社, 昭和38, 39年度のもの

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 $2\varepsilon_v$ 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。

図2 速さの観測値と垂線間長の関係

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} 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 $\sigma^{co} \pm 2\varepsilon_v$ 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る。また V^{co} に対する $\text{Log } r$ すなわち $\text{Log } r^{co}$ を λ の一次近似式であらわす。すなわち

$$s/r \approx 0.55 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Log } r^{co} = 0.99 + 0.94\lambda \pm 0.07 \quad (r \text{ の単位: m}) \dots\dots\dots (6)$$

がえられた。

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ためには各船首が r だけへだたてていればよい。いいかえると図3-cのように船首を中心半径 $r/2$ の円をぎつ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

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 後方閉そく領域を半楕円形で近似したとき、密度最大となる配位をまとめるための説明図と観測された配位

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

となる。なお図3-bは実際に観測された一例である。

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ポテンシャルによつて行われていることである。今後調査観測がすすめばさらにより近似のポテンシャルを用いることになるだろうが、このモデル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水路の障害物の影響などもかなり定量時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 $C_{\text{basic}}^{\text{co}}$ が計算できる。すなわち

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

であるから

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

(Cの単位：隻/秒)

がえられ、単位を隻/時にあらためると

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

(Cの単位：隻/時)

となる。これを幅1kmの水路に適用して計算したものが表1である。

表1 幅1km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	2.29~2.56	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

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、その時 $\text{Log } V - \text{Log } V^{\text{co}}$ ($=\sigma - \sigma^{\text{co}}$) は大きくても $2\varepsilon_v$ ($\doteq 0.13$) 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

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

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つて求められる。

水路 W を京浜運河の片側可航幅250mにとり、船の長さを25m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156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^{∞} 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25mの船が幅250m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つばいに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つて、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す。

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(トランスファ) D_t 、旋回径(タクティカルダイアメータ) D_T 、および定帯旋回半径 D_p をとつたがこれはほぼ長さに比例する。

一方停止距離 D_{stop} は長さのほぼ1.4乗に比例している。

附録Ⅱ 閉塞領域の大きさ

前報告のデータを再整理して r および s をもとめた結果を表3に示す。

この結果より $\text{Log } r^{\infty}$ の λ についての一次近似式

$$\text{Log } r^{\infty} = 0.99 + 0.94\lambda \pm 0.07 \dots\dots\dots (12)$$

をもとめた。

附録Ⅲ 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3.5~4mとき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つて山口氏*ら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なくとも L_{pp} ははなれていなければならないと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} や旋回縦距 D_A (アドバンス) 型幅 B は表2の近似によつてもとめる。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いためには

*山口篤利他16氏、瀬戸内海の余裕水深と航路幅員に関する調査報告書、昭和39年3月

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

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	1,510	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	1.7~3	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_ρ (m) $\text{Log } D_\rho = 1.03\lambda + 0.23$	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* のものを加えたもの

III : 前田氏**による

IV : 浦賀水道観測値より

V : 京浜運河観測値より

* 田口賢士, 外山嵩, 造船協会論文集, No. 116 P190 (1965)

**前田至孝, 未発表

$$D_A^{\min} - B^{\max}/2 + D_s > D_{st} \dots\dots\dots (13)$$

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

$$D_{st}^{\min} - L + D_s > D_{st} \dots\dots\dots (14)$$

が成立しなければならない。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ない。すなわち旋回の場合は

$$D_{stop} - D_A^{\min} + B^{\max}/2 = 1.1L_{pp}^{1.39} - 2.2L_{pp}^{0.98} + 0.6L_{pp}^{0.75} \dots\dots\dots (15)$$

また停止のときは

$$D_{stop} - D_{stop}^{\min} + 1.1L_{pp} = 1.1L_{pp}^{1.39} - 0.5L_{pp}^{1.39} + 1.1L_{pp} \dots\dots\dots (16)$$

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(13)および(14)を L_{pp} の値28mおよび112mについて計算すると旋回の場合はそれぞれ62mと580m, 停止のときはそれぞれ92mと550mとなり D_s は28mには92m以上, 112mには580m以上でなければならない。この D_s の下限を図4に示す, なお $D_A^{\min}$ および $D_{st}^{\min}$ は図の破線および一点鎖線

にそれぞれ平行でそれより標準偏差の2倍だけ小さいと仮定してある。一方観測にもとずいてえた表3に示された値は図4の丸印のように D_s より大きく、 L_{pp} の値28mに対しては180m、112mに対しては900m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。

理論的に閉そく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つ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力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つ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

図4 船間距離の試算値

表3 閉塞領域の長径 r と短径 s

記号	イ	ロ		ニ		ホ		ハ		ヘ	
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 ~11.3	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 ~1.0	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	
$\cdot \text{Log } r$	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

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なくなつたときに非常に多くの船が先行船の後方 r のところに集まることがあるのは注目してよいと思う。これは船線をきめて一次元的のとりあつかいをすることにかかなりの妥当性をあたえるものであろう。