航路設計のための海上交通容量—Ⅲ.

杉 崎 昭 生* 鞠 谷 宏 士*

桑 島 進* 大 津 皓 平*

On the Marine Traffic Capacity available for a Design of Ship Channel—III

Akio M. SUGISAKI, Hiroshi KIKUTANI
Susumu KAWAJIMA, and Kohei OHTSU

Abstract

In the straight channel approaching to port, ships decrease their speeds in order to enter the port. The reduction of set speed is standardized in proportion to ship's length and distance to port.

As the results of simulation using above relation, the traffic capacity is about 40 ships per hour and the mean speed at entrance of port is 40% to the original full speed. This capacity is about one-third to that of straight channel to open sea.

The simulations were performed in the next conditions as follow; the channel width is 700 meters, and ship's size is distributed to the mix mode which is equivalent to the ship of 73 meters in length.

1. は じ め に

直線状の航路の一般的な場合について、前2回の報告で、その容量を見てきたが、それらのときと物理的の形状はほとんど同一であるもので、運航方法が大きく異なる入港航路について今回見ることとする。

広い海域についてのみ扱うのであれば、端末的な存在であるこの入港航路は考慮にいれなくてもよいわけであるが、湾内などの航路を考える場合は入港のための減速による容量への影響を無視できない。

そこで直線状航路と直線状入港航路との違いを中心として、容量を求めることとする。この容量には、その先の港（内）容量はとりあえず考えていない。

一般的に考えると、入港航路の形状はさまざまなものがあげられるが、その代表的なものとして直線状入港航路をとりあげてみた。

2. 運 航 方 法

すでに直線航路のところで述べられた運航方法が基本としてあり、それに加えて入港のための減速方法が考慮されなければならない。簡単にいえば入港地点（港の入口を考えている）までの距離によって、どのような速力を選定したらよいかの問題を解決すればよいので、その決定方法を含めて、以下に運航方法を述べることにする。

2.1 運動方程式

停止のための運動方程式は

$$\begin{aligned} v &= v_0 e^{-\frac{k}{m} t} \\ &= v_0 2^{-\frac{t}{c}} \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

で与えられることが知られている^①。ここで v_0 は初速（ノット）、 t は速力変更時よりの経過時間（分）、 v は

* 正会員，東京商船大学（東京都江東区越中島町2-1-6）

時間 t における速力(ノット), m は質量, k は比例定数, c も排水量により変化する比例定数である。

変針のための運動方程式は

$$T \frac{dr}{dt} + r = K\delta \quad \dots\dots(2)$$

を用いている⁽²⁾。ここで r は船の旋回角速度, δ は舵角, T は旋回の速さをきめる操縦性指数, K は旋回半径を決める操縦性指数, そして t は時間を示している。

入港に関する運動としては, 速力の変化が大きいことと, ある一定の大きさ以上の速力をもつことは, 船舶の運航上から制限をうけることとなる。この点に留意して式(1)を変形および積分して,

$$v = v_1 - (v_0 - v_1) \cdot 2^{-\frac{t}{c}} \quad \dots\dots(3)$$

$$s = \{v_1 t + \frac{v_0 - v_1}{\ln 2} c \cdot (1 - 2^{-\frac{t}{c}})\} / 60 \quad \dots\dots(4)$$

として, 初速 v_0 の船舶が目標速力 v_1 に変更しようとしたときの経過時間 t に対応する 速力 v および進出距離 s (海里) が与えられる。ここで c は減速係数を表わしており, 船舶の大きさ (排水量) によって異なっている。

2.2 速力設定基準

速力を入港地に近づくにつれて速力の上限は一般に漸次低下させていく。このための基準を速力設定基準というが, この基準について述べることとする。

(a) 運航実務からの基準値

速力設定基準は, 船舶運航に不可欠のものであるが, これは船舶の大きさによってかなりの差がでくる。そこで大きさ別に船舶運航者に速力設定基準の概略を聞いて, 船の長さ単位でまとめてみると表 1 のような速力設定基準がえられた。

この表 1 で与えられる数値は, 大きさについての区分けが表のとおりでないところもあって, 一つの目安を与えてくれたものと考えるのが妥当であるといえるものである。そこで若干数値が通常の運航実務から見て, はずれているところも出てきている。

これはまとめ方の問題であり, これについては後述するように修正を試みている。

(b) 計算より求めた速力設定基準

運動方程式によって表現される船舶の動きをもとにし, これに適当な条件を入れて計算し, 速力設定基準を求めることとした。

まず速力設定基準のもっとも簡単なものでかつ基本的なものは, Full で航走していて, Stop を令し, ちょうど目的地にきたとき, 2 ノット以下となるようなものといえる。これを基本速力設定基準と名づけ, 表 2 に示してある。

この基本基準はおそらくまったく他船や危険の存在がないときに採用されるものと考えられるもので, 実際的ではない。そこで機関を順次 1 段階ずつおとしていくものを考えるわけであるが, 機関の使用の順序については容易にきまる反面, どの程度それぞれの機関状態を持続させるかでいかようにでも変化してしまう。そこでの条件を各機関状態に相当する速力の手前 0.5 ノットになったときにつぎの機関状態となるように発令するようにとれば, 表 3 に示す速力設定基準がえられる。これを順次速力設定基準ということにする。各速力基準を比較すると, 順次速力設定基準は大きく, 基本速力設定基準は小さい。そして実務の基準はそれらの間にあることになる。

(c) 実用の基準値

実務の基準を十分考慮し, しかも順次基準もある程度考慮して, きめたものが, 表 4 に示す実用速力設定基準である。この実用というのは, 実務のものを前提として, 理論値を加味し, 通常の運航に十分適用できると

表 1 運航実務からの速力設定基準

船舶の大きさ	速力設定基準			
	HALF 発令	SLOW 発令	DEAD SLOW 発令	STOP 発令
180,000 ~ 250,000 ^{DW}	81	52	27	-
130,000 ~ 150,000 ^{DW}	80	49	31	-
90,000 ~ 100,000 ^{DW}	66	49	35	-
10,000 ^{GT}	35	23	-	-
~ 1,000 ^{GT}	53	-	-	-

注: 表値は船の長さ単位となっている

表2 基本速力設定基準

船舶の大きさ (長さ:メートル)	目的地からの 距離 (単位:船の長さ)	船舶の大きさ (長さ:メートル)	目的地からの 距離 (単位:船の長さ)
~ 50	3.6	215	9.1
67	5.3	228	9.4
89	6.0	241	9.6
110	6.5	254	9.8
130	6.9	268	10.0
157	6.9	277	10.3
179	7.0	288	10.5
185	7.7	300	10.7
190	8.4	311	10.9
202	8.4	322	11.1

注: 船の大きさにより, 代表的な船種をきめて計算

運航実務者から同意をえていることからきている。
表値の間は適当な内挿法にて処理をすることで値を
うるようにすればよい。

この値を計算には用いることとなるが, これらの
表値はあくまでも他の船舶がいることが前提となっ
ており, 若干運航がすっきりしすぎる点が見られ
る。しかし十分運航に役立つものである。

2.3 運航基準 (方法)

直線状航路の運航基準^④に加えて, つぎのような
運航を直線状入港航路での船舶はとることとしてい
る。

- (i) 目的地までの距離により, 速力設定の基本値
を表4にてうる。
- (ii) 他船を考慮したときの安全運航をするために
きまってくる速力設定値および針路設定値を定め
る。
- (iii) (i)の値を上限として, (ii)により速力設定および針路設定を行なう。
- (iv) 目的地に到達した船舶は消滅させる。
- (v) (iii)によって定められた速力設定で, 航行するとき, 目的地付近では大型船以上は2ノット以下に速力
がなるが, 1ノット以下とはしないように Dead Slow の状態の機関使用をする。そのとき1ノットを越え
れば, また Stop の状態とする。

なお小型船などはあまり速力を低下させないで, 入港している現状を考慮しているので, かなりの速力

表3 順次速力設定基準

船舶の大きさ (長さ:メートル)	目的地からの 距離 (単位:船の長さ)	船舶の大きさ (長さ:メートル)	目的地からの 距離 (単位:船の長さ)
50	42.8	215	109.5
67	63.9	228	112.7
89	72.2	241	115.5
110	77.9	254	118.0
130	82.3	268	119.8
157	81.8	277	123.7
179	83.7	288	126.4
185	92.6	300	128.5
190	101.4	311	130.8
202	106.0	322	133.0

注: 船の大きさにより 代表的な船種をきめて計算。

表4 実用速力設定基準

船舶の大きさ (長さ:メートル)	目的地までの距離と速力設定			
	HALF 発令	SLOW 発令	DEAD SLOW 発令	STOP 発令
8	30	20	10	0
130	40	30	18	7
190	50	35	25	9
240	65	40	30	10
280	80	50	35	11
310	80	50	35	11
350	80	50	35	11

注: 表値は船の長さ単位となっている。

(6ノット近くまでなることがある)で目的地を通過させている。

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション・エリア

シミュレーション・エリアは図1に示されるようなものであり、全長29,632メートル(16海里)、幅700メートル、有効長さ18,520メートル(10海里)となっている。このような航路のなかに六つのゲートラインを設け、それらによってできる五つの小区域(エリアという)があり、それぞれシミュレーションの結果の統計に便ならしめている。

航路の両端は船舶発生地点と船舶消滅地点となっており、船舶消滅地点はゲートライン6と重なっている。なおゲートライン1と船舶発生地点の間はバッファ・ゾーンであり、シミュレーションにおいて、船舶交通流が定常になるようにするため設けられた区域である。

3.2 シミュレーション内容と結果

使用した船型分布は昭和48年度に第二港湾建設局で予測した昭和60年のものを用い、船舶の発生隻数は表5に示される5種類のものを使用した。

(a) 交通容量

シミュレーションに行なって、目的地を通過する船舶の隻数を1時間分集計し、大きさに対する考慮をするために $t^{-1.76}$ 換算を行なって、平均発生隻数ごとにプロットしてえられた図が図2である。この図のもつ意味は直線状航路のときと同様で、曲線部のところではシミュレーションを続けることで、しだいに通過隻数がおちてくる場所である。この図と密度などから、ほぼ40隻/時(ほぼ73メートル船基準)として、交通容量がえられる。この40隻/時という値は同じ航路幅での直線状航路の容量のほぼ3分の1の値となっている。このことは速力比などからも逆に推算できるので、当然といえば当然であるが、オーダとしてはまちがいない値といえる。

(b) 速力比と速力変化

直線状入港航路の船舶の運航で、他のときとの相異は、速力の上限が安全運航の面からきめられていることであろう。そこで、このシミュレーション内で船舶がどのような速力を保持していたかをマクロ的とミクロ的の両面から見ることにする。

まず船舶が各ゲートラインを通過するときの速力と原速との比(速力比という)がどのように変化するかを示したのが、図3である。図3では1時間に通過した船舶の速力比の平均が各ゲートラインごとに示されており、これによると、ゲートライン1から5まではほぼ同じような値をとっているのに対し、ゲートライン6は大幅におちこんでいる。このことは入港のための速力低下によるものと考えられる(速力低下による密度の増大による副次的速力低下も考えられる)。このときの速力比の値がほぼ0.4程度であるので、状態としては Dead Slow の状態と Stop の状態が全体的に見れば繰返されており、いくぶ

図1 シミュレーション・エリア

表5 シミュレーション・ケース

種 類	船舶発生隻数
1	15 隻/時
2	20
3	30
4	40
5	50

図2 発生隻数と通過隻数との関係

ん Dead Slow の状態に近いところで入港していることがわかる。これはあくまでもマクロ的に見たときのもので、ある船は Stop 状態に近いものも当然のこととしてありうる。

つぎに入港するまえにどのような速力ヒストリーであったかを時間ベースで見ると、図4および図5に示すとおりとなる。これらの図では、7.5分ごとの速力が入港時よりさかのぼって図示されており、つづいて2点以上が同じ値をとっているのは原速で航行していることを示している。図4は平均発生隻数が15隻/時のときのものであり、図5は平均発生隻数が40隻/時のときのものである。両図を比較してみると、図4のが時間的に見て目的地点に近いところで減速を行なっているのに対して、図5のはかなり遠いところから、減速していることがまず目につく。このことの理由としては、前者の状態では、船舶相互の影響がさほどなく、ほとんど入港のための減速であったと推察でき、後者については、入港のための減速もあったが、目的地付近で他船の影響で減速せざるをえない状態であることも推察できる。なお船舶A、BおよびCの原速は12.0ノット、Dは図4のが11.5ノット、図5のが10.0ノット、Eは図4のが8.5ノット、図5のが10.0ノットである。

(c) 航跡図

図6および図7に交通流流線図および時間断面図の例を示している。図6の流線図は航路全体の1時間の船舶の航跡図であり、図7の時間断面図はそのうちのある瞬間の船舶の所在を示したものである。このときの船舶発生隻数(平均)は40隻/時のものである。

図3 ゲートラインごとの速力比

図4 入港直前の速力変化

図5 入港直前の速力変化

図6 交通流々線図

図7 時間断面図

4. 考察と結論

つぎのようなことが結論として出すことができた。

- (i) 700メートルの航路幅の直線状入港航路の容量はほぼ40隻/時（昭和60年の平均船型基準）である。

このことについては、密度の変化具合および速力の変化具合から見ても、妥当と考えられるので、実用に供してもよいだろう。

- (ii) 付随的ではあるが、実務者も納得しうるもので、しかもシミュレーションにも用いられる速力設定基準を船の長さを変数として求めることができた。今回の大きさに対して十分考慮したものを考えたが、離散的モデルとしても使えるものは、これらの結果を若干修正することでえられる。

- (iii) シミュレーション結果の一つである容量と目的地点の通過隻数の関係を見ると、速力設定基準の関係で、小型船の速力低下が大型船のそれに比べて小さいことから、ただ単に小型船の隻数分布が多いことのほかに、大型船より大きな速力で目的地付近を航行するので、必然的に小型船の方が多いことが見られる。しかし容量として見るときには、それを換算しているので、容量を引き上げるのにあまり効いていないので、とりたてて問題としなくてよいと考えられる。つまり大型船などにより混んでくれば、大型船などが入港できずに、小型船のみが入港できるということがシミュレーションにおいても見られる。

- (iv) 入港時の平均速力はほぼ原速の40パーセントとなっている。

- (v) 混んでくると、大型船の速力が停止に近い状態まで低下し、目的地付近がいつその混み状態となり、高密度化してくる。

5. む す び

直線状入港航路の容量は、実際的な速力設定基準によって定められる速力によって、定まってくることを示してきた。このことは在来容量について考えるとき、あまり考慮されてきていないことであったが、かなり精度の高い数値が今回えられたと思う。最後にこの研究には日本海難防止協会の東京湾航路体系調査委員会委員ならびに事務局の援助が多くあったので、ここに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) Honourable Company of Master Mariners: Stopping Distance of Ship, 1966 June
- (2) 藤井齊, 野本謙作: 操縦性試験法 第2回シンポジウム 日本造船学会 Nov. 1960
- (3) 杉崎昭生他 航路設計のための海上交通容量一Ⅱ 日本航海学会論文集 昭和49年7月

質 疑 応 答

藤井弥平 速度の分布をもとめられたがこれが実際観測された実態とどの程度一致しているかが重要な問題である。横浜港口付近における観測結果等とつきあわせた検討を行なわれましたか。

桑島 進 このシミュレーションは航路の一要素としての計算でありその意味で減速度分布もモデル的なものです。航路の出口の Speed は各種の船がこれから本格的な berthing 態勢にうつる時の speed を実務的に考慮して設定しており港内での状態は考慮していません。したがって多くの要素が混入している実際の観測値と比較するには困難があると思います。

松本吉春 減速の状態は船の載貨状態によって変わるのではないかと思われるがその点はどのように考えておられますか。

桑島 進 その通りだと思います。計算上は各船の満載排水量と軽荷排水量との間を乱数で適当に散らばせた結果による係数C（本文(1)式）を使用しました。

川本文彦 1) 速力低減に伴って閉塞領域を変化させた Simulation か。

2) 変化させているとすればどのような基準に基づいて変化させたか。

3) 変化のさせ方の如何によっては容量に大きな差違が生じよう。

藤井弥平 速力がおちたときの閉塞領域については「航海」に発表してありますので御利用ねがいたいと存じます。

桑島 進 閉塞領域は船舶交通流の結果としてとらえられる概念であろうと考えます。運航者は閉塞領域を含んだ避航領域を念頭に置いているはずでこのシミュレーションも避航領域を変化させております。閉塞領域はその結果として変化したことになります。変化の基準は前方相手船との相対速力を用い、相対速力の対数的関数によって重みづけた係数を乗じることにより避航領域を変化させました。この重みづけについては実務者の意見を十分取り入れており得られた結果からみても実際の運航状態に近い状況でシミュレーションされたと考えています。なお前報（論文集51号）で述べたイメージによっても閉塞領域（避航領域に包括される）を変化させています。

久々宮久 Simulation の中で減速が行なわれるときの減速係数の出典は何ですか。

大津皓平 本文の参考文献(1)です。

榊 正三 このシミュレーションには何K使いましたか。

桑島 進 384K使用しました。