

船舶交通流評価としての船の速度分布と通過時間分布 (そのII)

—船舶交通流におけるマン・マシン・システムの—考察—

山田一成*・有村信夫*

The Travelling-Time Distribution of Vessels for Evaluation of Marine Traffic (II)

—A Study on Man-Machine System in Vessel Traffic Flow—

By

Kazunari Yamada and Nobuo Arimura

Abstract

Study on the man-machine system is important for automation of vessel operation. This requires a wide study on the influence of the man-machine effect in ship operation where there are large difference in size, versatile operators and various environment.

The objectives of the study is to estimate the man-machine effect through statistical data in vessel traffic flows placing emphasis on the "pass time", T , through a waterway employing two kinds of traffic simulation. The pass time is represental as the specific pass time, $T/T_0 - 1$, where T_0 is the pass time without evasive action. Factors which give influence to resulting distributions, such as conditions for evasive actions are also investigated.

The man-machine system is inbedded in the dynamic simulation with a computer as :

- (1) information on the movements of vessels is obtained as a birds-eye view where a "man" is fixed to the earth (absolute coordinate).
- (2) information on the movements of vessels is obtained as a birds-eye view where a "man" is fixed to a vessel (relative coordinate).

The result indicates considerably large differences in the specfic pass times for two man-machine systems as follows, where the data are averaged values of about 100 vessels.

* システム技術部

原稿受付 昭和62年 4月28日

ship length (m)	specific pass time in absolute coordinate ($T' - T_0$)/ T_0 (%)	specific pass time in relative coordinate ($T' - T_0$)/ T_0 (%)
22.58	6.08±5.40	4.80±4.92
65.06	11.43±8.40	10.63±8.71
91.44	14.71±8.65	17.94±13.33

Though the pass times distribute comparatively widely, differences in two coordinate systems are clearly observed and indicate the influence of the man-machine effect.

1. まえがき

船舶の運航では、船舶本体の運動機能と操船する人間の操船判断の機能とが密接な関係で結ばれている。この点に着目すれば、前者はマシン系で後者はマン系であることからマン・マシン・システムの存在が考えられる。本研究は、このマン・マシン・システムの面から船舶交通現象の考察を試みたものである。

船舶の運動機能のマシン系は極めて複雑なシステムであり、船体形状、舵、スクリュー等による流体力学系の他に、主機と動力伝達系、その他が含まれている。また、人間系も単に航行状況や計器に対する視覚や聴覚機能だけではなく、総合的な認識・判断機能を含めた複雑なシステムである。従って、ここで言うマン・マシン・システムとはそれぞれが複雑なサブ・システムから構成された大きなシステムを指し、船舶の交通現象をこのような巨視的なマン・マシン系から捉えようとするものである。このマン・マシン・システムの概念は、近年、出入港の自動化システム等で検討されている船舶の安全航行状況や交通管理状態を調べる上で必要であると思われる。

船舶の運動性は小型船から大型船まで多種多様の特性を持ち、また、操船に携わる人々の判断には種々の水路環境で長年にわたり積み重ねられた経験によって個人差が存在する。従って、船舶交通現象をマン・マシン・システムの立場から取り扱う場合、複雑なサブ・システムの内容を詳細に分析する方法ではなく、巨視的な観点からマン系とマシン系間の相互作用要因とその効果を平均的な量として捉えるのが効果的であると考へた。即ち、船舶交通流ではマン系の要素がどのような機構に含まれていて、その影響効果をどのようにして把握したら良いかが問題となる。

一般に、船舶交通流のパラメーターとしてよく用いられているものには、交通量、大小船舶の混合比率、船舶密度、航跡密度、閉塞領域、などがある。以前の船舶交通現象に拘る研究の模擬実験^(2,3,4)によれば、船

船が水路通過に要する時間は、交通量、大小船舶の混合比率、水路形状等の航行環境に依存して異なり、多数の船舶が就航する水路で通過時間を集計すると、この分布は航行環境の条件で変化する。また、実験者が操船を行うときの判断基準に個人差もあるため、マン系の要素による影響も現れた。以上の点から、同一航行環境において操船に携わる人々の判断に必要な情報を各種の方式で与えた場合の通過時間分布を調べれば、マン系の要素に働く機構についての手懸を得る可能性がある。

本報告では、船舶交通現象に拘るマン・マシン・システムの評価項目の一つとして、船舶が水路区間を通過するときの通過時間分布を取り扱うことにした。はじめに、通過時間分布の性質を明らかにする必要がある、前報⁽⁶⁾で報告した基本的性質の概略を述べる。次に、船舶相互の衝突判定条件の問題、避航過程の問題等を数学モデルによって検討した結果を示し、最後にマン・マシン系の効果を検証する模擬実験の結果について述べる。

2. 通過時間分布の性質

通過時間分布は先に述べたように、水路の形状、交通量、大小船舶の混合比率など航行環境で変化するものであるから、次の二前提を基に統計的手法で解析を試みた。即ち、

(イ) 交通流における各船舶の相対位置分布から他船が近付かない閉塞領域が見出される点に着目して、自船が他船などを避航するために針路変更や減速等避航動作を行なう領域 γS_0 を自船の周りに想定する。なお、交通流中で最も多い船種を標準船としてこの占有する面積を S_0 と書く。また、 γ は避航動作の領域 γS_0 を標準船の大ききで正規化した係数である。

(ロ) 他船が多く存在すれば、自船の避航回数は増加し、迂回によって自船の水路方向の速度成分は小さくなる。この点から、自船の水路方向の速度成分を船舶密度 ρ の一次式、即ち、 $V = V_{st}(1 - \alpha\rho)$ で近似す

る。なお、 V_{st} は満載速度であり、 α は避航効果を表わす常数である。

また、水路面の面積、及び、全船舶が水路面を占有する面積を、夫々、 MS_0 、 M_1S_0 と表せば、統計的な領域 γS_0 内に k 隻の他船が出現する確率 P_k は所謂場所ぎめの問題となり、(占有比： $p = M_1/M$ 、 $M_2 = M - M_1$)、直ちに、

$$P_k = \binom{M_1}{k} \binom{M_2}{\gamma - k} / \binom{M}{\gamma} \\ \doteq \binom{\gamma}{k} (M_1/M)^k (M_2/M)^{\gamma - k} \doteq B(\gamma, p) \quad (1)$$

が得られる。実際の交通現象では船舶密度が低いため、 P_k の確率は更に二項分布で近似することができ、 γS_0 内における船舶密度の確率が求められる。

次に、全長 L_0 の水路を N 等分し、 L_0/N の長さを他船などの出現で自船の航行に影響を受ける統計的な領域の直径 $(\gamma S_0)^{1/2}$ 程度に選べば、船が各部分水路区間(区間番号： $i = 1 \dots j$)を通過するときの水路方向の速度成分 $V^{(i)} = V_{st}(1 - \alpha p^{(i)})$ は互いに独立な事象と見なされて、船が全水路区間を通過する時の所要時間、即ち、通過時間 T は近似的に

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j L / V^{(i)} \doteq T_0 (1 + \alpha m / (N \gamma S_0)) \quad (2)$$

$$m = \sum_{i=1}^j \gamma S_0 p^{(i)}, \quad T_0 = L_0 / V_{st} \quad (3)$$

と書ける。なお、 m の意味は自船が長さ L_0 の水路を航行するときに、影響を受ける遭遇船の隻数となる。

各水路区間で遭遇する隻数の確率は同じ(1)式の二項分布 $B(\gamma, p)$ に従うから、入航口から出航口までの全水路区間で遭遇する隻数 m の確率は二項分布 $B(N\gamma, p)$ となる。

次に、この分布形状を二項分布 $B(N\gamma, p)$ の積率母関数 Z で調べると、

$$Z = (pe^\theta + q)^{N\gamma} = \exp(N\gamma \log(1 + p(e^\theta - 1))) \quad (4)$$

で表され、 θ は任意の数である。

通常の交通現象では全船舶の航行水面に対する占有比 p が小さいため、 $p \ll 1$ の条件で近似すると、(4)式は

$$Z \doteq \exp(N\gamma p (e^\theta - 1)) \quad (5)$$

に変形でき、ポアソン分布に対する積率母関数となる。また、交通量が多少増えて、占有比 p が $p^3 \ll 1$ の条件

ときは

$$Z \doteq \exp(N\gamma p \theta + N\gamma p q \theta^2), \quad \text{但し、} q = 1 - p \quad (6)$$

となり、正規分布に対する積率母関数に帰着する。

従って、交通量の増加に伴う通過時間分布は全船舶の航行水面に対する占有比 p を確率変数としたポアソン分布から正規分布に変わることが導かれ、船舶交通流の評価値となることが判る。なお、前報で通過時間分布の水路形状による効果も考察している。

以上のように、通過時間分布の形状は γ 、 p の値に依存する。そして、 γ は操船者が他船を避航するために進路変更などを行なう避航領域 γS_0 に関係するし、また、避航領域の大きさは他船を安全に回避するための判断に基づくものであるから、マン系が関係する一つの変数になる。このため、マン系に關係する要因として、操船者の判断系で最も重要な二船間の出合い状態における衝突判断条件を以下に採り上げる。

3. 衝突判定条件の表現

各船舶の位置ベクトル群と速度ベクトル群はそれぞれ共面(*)にあると共に、両ベクトル群の全体でも共面となっている。従って、出合い関係にある船舶の衝突に拘る判定条件は船舶の位置ベクトルの共面上や速度ベクトルの共面上、或いは、両船舶が接近して衝突する迄の余裕時間を示した時間軸上で表すことができる。以下、これらの共面をそれぞれ位置共面、または、速度共面と単に呼ぶことにする。

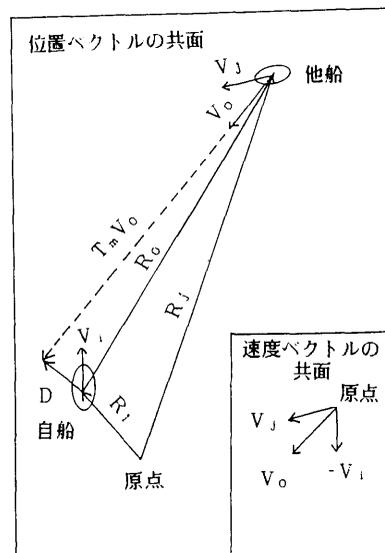


図-1 位置ベクトルと速度ベクトルの記号

先ず、図-1に示す様な出会い状態にある自船及び他船の位置ベクトルと速度ベクトルを、夫々、 R_i, V_i, R_j, V_j と書けば、二船が現在の速度で直進する限り、時間 t 後の相対位置ベクトル R は、

$$R = (R_j - R_i) + (V_j - V_i)t \equiv R_o + V_o t \quad (7)$$

となる。なお、添字 i, j は自船と他船に関するものを表し、 R_o と V_o は現時点の相対位置ベクトルと相対速度ベクトルである。

(7)式で $(V_o \cdot R) = 0$ の直交条件を適用すると最接近距離ベクトル D と最接近時間 T_m は、夫々

$$D = [V_o \times [R_o \times V_o]] / V_o^2 \quad (8)$$

$$T_m = - (R_o \cdot V_o) / V_o^2 \quad (9)$$

で与えられる。

一方、二船間の幾何学的な衝突直径 A は両船の大きさの変数と速度ベクトルの関数になる。例えば船の形状を楕円として、船の長さ L と幅 B をそれぞれ L, B と置くと、この幾何学的な衝突直径 A の最小値は、

$$A(L_i, B_i, L_j, B_j, V_i, V_j) = \sum_{k=i,j} (L_k^2 [V_o \times V_k]^2 + B_k^2 (V_o \cdot V_k)^2)^{1/2} / |V_o| |V_k| \equiv A^{(**)} \quad (10)$$

となり、 V_k は自船、または他船の速度ベクトルの値をとる。

もし、この幾何学的な衝突半径 $A/2$ の最小値が最接近距離よりも大きいときには必ず衝突することになるので、位置共面における衝突の判定条件は、

$$|D| \leq A/2, T_m > 0 \quad (11)$$

となる。なお、最接近時間 T_m は現時点から将来の時間を指すから $T_m > 0$ の条件が附く。

また、最接近距離 $|D|$ と最接近時間 T_m との関係には $D^2 + T_m^2 V_o^2 = R_o^2$ が成り立っているから(11)式の条件を組み合わせると、時間軸上における衝突の判定条件は、

* 互いに平行でないベクトル群があるとき、一点を通りこれらのベクトルに平行に引いた直線がすべて同一の平面上あるとき、これらのベクトルを“共面 (Coplanar Vector)”であると言う。

** $[* \times *]$ と $(* \cdot *)$ の記号は、夫々、ベクトル積とスカラー積を意味する。

$$T_m > (|R_o| / |V_o|) (1 - A^2/4R_o^2)^{1/2} \quad (12)$$

で表される。

更に、図-2は他船の周りに幾何学的な衝突直径 A の領域を想定し、(11, 12)式の衝突条件が充された場合を示す。自船からこの領域に接する二本の相対位置ベクトル、 $Z^{(+)}, Z^{(-)}$ は R_o に対する単位法線ベクトル ϵ を用いると、

$Z^{(+)} = R_o + \epsilon A/2$ と $Z^{(-)} = R_o - \epsilon A/2$ で表せる。そして、自船がこの幾何的な衝突領域に接して航行する様な針路における二つの自船の限界速度ベクトルを $V_i^{(+)}, V_i^{(-)}$ と書けば、 $V_o^{(+)} = V_j - V_i^{(+)}$ 、 $V_o^{(-)} = V_j - V_i^{(-)}$ の相対速度ベクトルが、夫々、 $Z^{(+)}, Z^{(-)}$ と互いに逆向き且つ平行となる条件から、限界速度ベクトル $V_i^{(+)}, V_i^{(-)}$ が求められる。従って、 $V_i^{(+)}$ と $V_i^{(-)}$ の交角の範囲内の方向に自船の現時点の速度ベクトルがあれば衝突を生じる。その結果、速度共面における衝突の判定条件は

$$[V_i^{(+)} \times V_i^{(-)}] [V_i^{(-)} \times V_j] / V_{st}^4 < 0 \quad (13)$$

となる。(13)式の分母 V_{st}^4 は正規化のために挿入したものである。そして、これら限界方向における速度ベクトル解の形は、

$$V_i^{(+)} = V_j - \chi^{(+)} Z^{(+)} \text{と} V_i^{(-)} = V_j - \chi^{(-)} Z^{(-)} \quad (14)$$

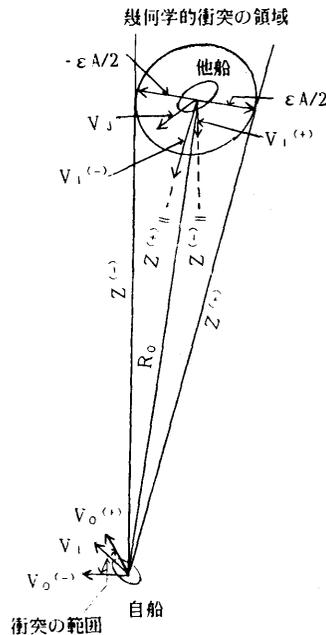


図-2 速度ベクトルの共面における衝突条件

であり、(14)式中の未知数 $\chi^{(+)}$ と $\chi^{(-)}$ は

$$V_i^{(+2)} = V_i^{(-2)} = V_i^2 \quad (14')$$

(14)式と(14')式の連立方程式から次の様に求められる。即ち、

$$\chi^{(+)} = [(\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{Z}^{(+)}) \pm \{(\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{Z}^{(+)})^2 - \mathbf{Z}^{(+2)} (\mathbf{V}_j^2 - V_i^2)\}^{1/2}] / \mathbf{Z}^{(+2)} \quad (15)$$

$$\chi^{(-)} = [(\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{Z}^{(-)}) \pm \{(\mathbf{V}_j \cdot \mathbf{Z}^{(-)})^2 - \mathbf{Z}^{(-2)} (\mathbf{V}_j^2 - V_i^2)\}^{1/2}] / \mathbf{Z}^{(-2)} \quad (15')$$

更に、(15)式中の χ 符号は時間軸上で未来の時間を考えているから、

$((\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i^{(+)}) \cdot \mathbf{Z}^{(+)}) < 0$ か $((\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i^{(-)}) \cdot \mathbf{Z}^{(-)}) < 0$ の条件で決められる。従って、 χ には \mathbf{V}_j と $\mathbf{Z}^{(+/-)}$ の関係で一つないし二つの値を持つことが判る。

以上で、二船間の衝突条件を位置共面、時間軸、速度共面で求めてきたが、これら表示式の意味はすべて等価である。

さて、この衝突条件の解除では自船の運動特性を基に、他船との相対距離と相対速度力から衝突迄の余裕時間を推定して、避航開始時期と自船の針路変更量を定めることである。従って、操船に関係する人には時間軸、速度共面の衝突判定条件が重要な意味を持つことになる。しかし、操船者の実感的に把握し易い判断条件は位置座標の情報であるので、次に、この点についてマン・マシン系の立場から検討する。

4. 衝突判定条件の解釈

はじめに、最も実感的に把握できる情報としては位置共面の相対距離で他船を捉えることである。しかし、その船が自船の航行に対して影響するかしないかは自・他船の速度に依存するから、その影響が及ぶ範囲を位置座標平面で調べる。以下、この範囲を視野範囲と呼ぶことにする。

まず、(15)式の判別式で自船と他船のインデックス i と j を入れ替えて1/2乗項の中が正となる条件より、

$$V_j^2 \geq [\mathbf{V}_i \times \mathbf{Z}^{(+/-)}]^2 / \mathbf{Z}^{(+/-2)} \quad (16)$$

の関係が得られ、直ちに、自・他船の速力と視野範囲 ψ は(16)式より求められる。

即ち、 $|\mathbf{V}_i| > |\mathbf{V}_j|$ の場合の前方位における視野範囲 ψ は

$$|\psi| < \text{Sin}^{-1}(|\mathbf{V}_j| / |\mathbf{V}_i|) \quad (17)$$

となる。なお、この場合、自船の針路はこの視野内に一隻の他船があるとしても、インデックス i と j を入れ替えた(15)式に相当する判別式が常に正となるため、二方向で衝突する範囲を持つ。そして、

$$\begin{aligned} |\mathbf{V}_i| = |\mathbf{V}_j| \text{ の場合の視野範囲 } \psi & \text{ は前方位} \\ -\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2 \\ |\mathbf{V}_i| < |\mathbf{V}_j| \text{ の場合の視野範囲 } \psi & \text{ は全方位} \\ -\pi \leq \psi \leq \pi \end{aligned}$$

となり、視野内に一隻の他船があるときは自船の針路方向に一つの衝突する範囲を持つ。従って、自船の速力が他船のそれよりも速いときには、自船の進行方向を基準とした視野範囲の関係でどの方向にある船が衝突する可能性をもつかを簡単に分類できる。

しかし、船上で収集される情報の形式は二船の出合い状態を第三者的に地図上で捉えるのではなく、出合い状況に関する諸量を自船の進行方向成分とこれの直角方向成分に分解して把握することである。例えば、相対位置ベクトル \mathbf{R}_o は自船の進行方向成分 $\mathbf{R}_{o\parallel}$ とこれの直角方向成分 $\mathbf{R}_{o\perp}$ に分解して、夫々、

$$\mathbf{R}_{o\parallel} = \mathbf{V}_i(\mathbf{R}_o \cdot \mathbf{V}_i) / V_i^2, \quad \mathbf{R}_{o\perp} = [\mathbf{V}_i \times [\mathbf{R}_o \times \mathbf{V}_i]] / V_i^2 \quad (19)$$

を得る。同様に、相対速度ベクトル \mathbf{V}_o や(8)式の最接近距離ベクトル \mathbf{D} も、夫々、各成分の値として、

$$\mathbf{V}_{o\parallel} = \mathbf{V}_i(\mathbf{V}_o \cdot \mathbf{V}_i) / V_i^2, \quad \mathbf{V}_{o\perp} = [\mathbf{V}_i \times [\mathbf{V}_o \times \mathbf{V}_i]] / V_i^2 \quad (20)$$

$$\mathbf{D}_{\parallel} = \mathbf{V}_i(\mathbf{D} \cdot \mathbf{V}_i) / V_i^2, \quad \mathbf{D}_{\perp} = [\mathbf{V}_i \times [\mathbf{D} \times \mathbf{V}_i]] / V_i^2 \quad (21)$$

となる。

これらは、マン系の入力情報に対して大きな意味を持つ値である。

即ち、船上のレーダー等の電子機器で航行環境の状態を得るときの情報は自船の進行方向を基準した相対極座標系による(19, 20, 21)式の形式で収集されるが、光学系の機器や目視からの情報収集では、更に、この相対極座標系の上に遠近法などの変換が加わり、実距離に比例しない変量の情報を得ることになる。

このため、操船時の人間の判断機構には、各種の認識情報から相対位置ベクトル \mathbf{R}_o や相対速度ベクトル \mathbf{V}_o 及び二船間の幾何学的な衝突直径 A 等を捉えるときに、これら相対系情報から絶対系情報に変換する機能と、認識情報に含まれている曖昧な値を補正する機能を持っていて、更に、航行の状況の時間的変化から次の状態を予測する機能もあると考えられる。

5. 避航過程における余裕時間

衝突の条件は自船の進路変更や減速によって解除する訳であるが、先に述べた様に、船舶の運行には航行の安全面から時間的な余裕、即ち、避航開始時点の最接近時間 T_m の値をどの位に選ぶかが問題となる。この最接近時間 T_m の決定には単に相対位置や相対速度だけでなく、自、他船の大きさ、増減速特性や旋回特性等に関する船舶諸元の情報も必要になる。

はじめに、自船の旋回特性のみで他船を避航するときに必要な最小限の余裕時間を取り扱う。ここでは、船が回頭を開始したならば、直ちに、旋回半径 x_i で円軌道の航跡を描き、旋回中でも速力変化しないようなモデルを仮定する。

このモデルから、自船が直進しているときに、衝突条件が成り立つ遠方にある他船を避航旋回するときの最小検知距離 δ の概略値は、自船の前方に現われる幾何学的な衝突領域（直径： A ）と自船の旋回円とが接する条件から求めることができる。

$$\text{即ち、 } \delta^2 + x_i^2 = (A/2 + x_i)^2 \quad (22)$$

$$\text{の関係から } \delta = (A^2/4 + x_i A)^{1/2} \quad (23)$$

を得る。そして、この避航過程における最小限の余裕時間 T_c は

$$T_c = \delta / |V_i| \quad (24)$$

となる。

しかし、普通の旋回避航過程では上で述べたような限界的な操船が行われないから、常に、(12)式と(24)式より、

$$|R_o| / |V_o| > T_m > T_c \quad (25)$$

を成立するような安全性の高い操船が行われると思われる。

次に、自船の避航開始時点の最接近時間 T_m と避航終了時点の最接近時間 T_{ms} の関係について取り扱う。

即ち、自船が避航旋回して元針路から ϕ 度回転したとき、この変針の前後で速度ベクトルが V_i から V_s に変るとすれば、避航旋回に要した時間 t_s と、これに伴う相対位置変化ベクトル ΔR は、夫々、

$$\begin{aligned} t_s &= x_i \phi / |V_i| \quad (x_i \text{は } \phi \text{の符号と同じ。)} \quad (26) \\ \Delta R &= x_i (\phi / |V_i|) V_j \\ &\quad - x_i (T_{an}(\phi/2) / |V_i|) (V_i + V_s) \quad (27) \end{aligned}$$

(420)

となる。

そして、(8)式と(9)式を(27)式で補正すれば、自船が変針後再び直進するときの最接近距離ベクトル D_s と最接近時間 T_{ms} は、夫々、

$$D_s = [V_s \times [(R_o + \Delta R) \times V_s]] / V_s^2 \quad (28)$$

$$T_{ms} = -((R_o + \Delta R) \cdot V_s) / V_s^2 \quad (29)$$

で表せる。(28)式から、位置の座標平面における衝突の解除の十分条件は

$$D_s > A(L_i, B_i, L_j, B_j, V_s, V_j) / 2 \equiv A_s / 2 \quad (30)$$

となり、また、最接近時間の時間軸での解除条件は、

$$\begin{aligned} 0 < T_{ms} < (|R_o + \Delta R| / |V_s|) \\ &\quad (1 - A_s^2 / 4(R_o + \Delta R)^2)^{1/2} \quad (31) \end{aligned}$$

を満足することである。このため、避航旋回過程における時間的な拘束条件は

$$T_m > t_s + T_{ms} > T_c \quad (32)$$

の成り立つことである。

6. 避航過程における旋回の限界

自船が旋回して衝突条件にある他船を避航するときの旋回限界について取り扱う。

即ち、自・他船が共に直進している場合、相対速度ベクトル V_o を相対位置ベクトル R_o の方向成分とその垂直成分で分解すると、

$$V_o = R_o (V_o \cdot R_o) / R_o^2 + [R_o \times [V_o \times R_o]] / R_o^2 \quad (33)$$

のように変形されるので、(33)式から他船の自船に対する相対角速度 ω_o と他船に衝突するまでの時間 τ_c は、夫々、

$$\omega_o = [V_o \times R_o] / R_o^2, \quad 1/\tau_c = -(V_o \cdot R_o) / R_o^2 \quad (34)$$

で表すことができる。

一方、自船から幾何学的な二船間の衝突直径 A を見透したときの瞳角（立体角） Ω は、

$$\Omega = 2 \text{Sin}^{-1}(A/2 |R_o|) \approx A / |R_o| \quad (35)$$

となる。

そこで、自船が回頭するときの角速度を ω_i と置けば、自船の針路が幾何学的な衝突直径 A を横切るとき最大の所要時間 μ は、略、

$$\mu = \Omega / |\omega_o - \omega_i| \quad (36)$$

である。

また、自船が旋回避航を行なったときに両船が衝突しないための条件は

$$\tau_c > \mu \text{であるから, } |\omega_o - \omega_i| > \Omega / \tau_c \quad (37)$$

の関係が得られて、 ω_i に関する解は

$$\omega_i < \omega_o - k\Omega / \tau_c \text{または, } \omega_i > \omega_o + k\Omega / \tau_c \quad (38)$$

となる。但し、 $\omega_i > 0$ の場合を右旋回とし、 k は位置共面に対する単位垂直ベクトルである。

以上の考察より、(38)式で避航過程における自船の旋回角速度の限界条件が求められる。しかし、船舶の最小旋回半径 κ_i は船固有の値であるため、旋回角速度の上限の値が存在する。従って、 $|\omega_i| = |V_i| / \kappa_i$ の関係と(38)式の条件式から、その時点で船舶の出合い状況における旋回避航の可能性を判定することになる。

しかし、(38)式の条件だけでは、左右いずれの旋回方向に対しても解が存在することもあって、船舶の運行上での旋回方向の選択は水路の拘束条件や航法等によって定めるものと考えられる。もしも、自船が他船に近すぎて自船の旋回半径 κ_i で(38)式の条件式を満足できないときは、自船は減速による避航操作を必要とする。

7. 旋回避航による損失と水路の拘束条件

ここでは、海上交通工学の立場から船舶が水路を航行するときの運行効率に関して、一回の避航による損失を図-3の様な避航モデルで算出する。この避航モデルの過程では、自船は等角速度で始めに右旋回して他船を避航した後、左旋回を行なって他船進路の後方を横切り、更に、左旋回と右旋回で自船の目的航路に復帰する。この間の各過程における自船の航跡は円弧の軌道を描き、各過程の所要時間は τ に等しいとして、全避航過程の所要時間を 4τ とする。

自船の全避航過程の移動航跡の長さ S は

$$S = 4\tau |V_i| \quad (39)$$

であるに対して、本船が避航を行わないときの航跡の長さ S_o は

$$S_o = 4\kappa_i \text{Sin}(|V_i| \tau / \kappa_i) \quad (40)$$

となる。

従って、一回の避航による距離損失率 η_s は、

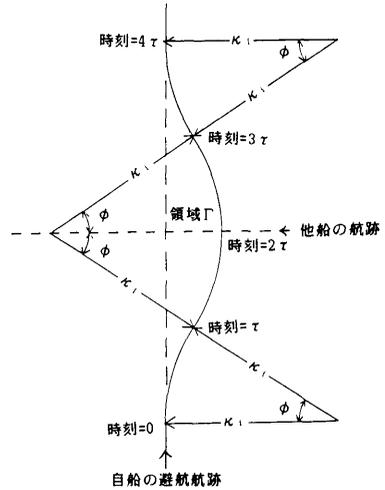


図-3 避航航跡のモデル

$$\eta_s = S/S_o = (|V_i| \tau / \kappa_i) / \text{Sin}(|V_i| \tau / \kappa_i) \quad (41)$$

で与えられる。また、避航時間についての損失率 η_t は

$$\eta_t = (S / |V_i|) / (S_o / |V_i|) \quad (42)$$

であるから、時間損失率も距離損失率と同じ値となる。これは旋回避航中も等速運動を行なうことと同意であり、このようなモデルでも損失率の推定が可能である。

更に、自船の避航による曲線航跡と避航としないとした直線航跡とで囲まれた領域の面積 Γ (図-3)は

$$\Gamma = 4\kappa_i^2 (1 - \text{Cos}(|V_i| \tau / \kappa_i)) \text{Sin}(|V_i| \tau / \kappa_i) = 16\kappa_i^2 \text{Sin}^3(\phi/2) \text{Cos}(\phi/2) \approx 2\kappa_i^2 \phi^3 \quad (43)$$

となる。なお、 $\phi = |V_i| \tau / \kappa_i < 1$ であり、 ϕ は避航による針路の変進角である。

もし、この領域 Γ 内に相手船以外の他船が存在したとすれば、極めて危険な複雑な避航過程となる。このような状況は船舶の航行安全の立場から望ましいことではないから、この現象の起こる確率をなるべく抑える必要がある。

即ち、船舶密度 ρ は交通量 Q と船舶交通流の平均速度 V_{mean} に関して、近似的に、 $\rho = Q / V_{mean}$ が成り立つので、避航動作の領域 Γ で仮に一隻現われるとする確率的な条件は、

$$2\kappa_i^2 \phi^3 \times \rho \approx 1 \quad (44)$$

である。このため船舶密度 ρ が一定のところを航行す (421)

る船舶は、(旋回半径 κ_i)²と(変進角 ϕ)³が逆比例の関係を保つ必要があることが導かれる。従って、旋回半径の短い小型船の避航過程では大きな変進角の値を選択できるが、旋回半径の長い大型船は遠方で他船を避航して、小さい変進角を採ることが望ましく、大型船になる程交通量の影響が顕れ易いと考えられる。

他方、船は水路区間を最小時間で航行することが運行効率の面で望ましい。そこで、最短時間の航行の評価関数は航路の単位ベクトルを s とし、その地点の位置ベクトルを U_s と置くとき、

$$|V_i \times s| + \xi |s \times [(R_i - U_s) \times s]| = \min \quad (45)$$

である。第1項は水路方向に対し、第2項は推奨航路からの外れに対する評価関数となる。但し、 $\xi = 1/\text{旋回半径}$ で、避航船の大きさにより正規化を行う為の常数とする。

評価関数を満足するための自船の速度ベクトル V_i の補正は、

$$s - \xi [s \times [(R_i - U_s) \times s]] \equiv s_o \quad (46)$$

となる補正用の目的ベクトル s_o を作って、現在の速度ベクトル V_i を次の様に、変換すればよい。

$$V_s = [s_o \times [V_i \times s_o]] / s_o^2 \quad (47)$$

補正後の速度ベクトル V_s は(45)式の条件を満たすから水路による船の速度補正が可能になる。

8. 交通流におけるマン・マシン効果の検討

前節までに通過時間分布と二船間の衝突回避条件や水路の拘束条件等を取り扱ってきたが、ここでは、はじめに2節で説明した通過時間分布の変数にもなる避航得動作領域 γS_o の大きさと、形状についての実測例を述べる。船形の諸元が $L \times B \times D = 105\text{m} \times 16\text{m} \times 8\text{m}$ である実船の観測結果⁽⁷⁾によれば、避航開始時における他船との相対航跡密度分布図には他船の少ない領域が存在することが示されている。そして、この領域の形状は自船の位置を焦点とした楕円形であり、その大きさは前方700m、後方200m、左右200mであった。この領域は相対閉塞領域とも言えるもので、船の操船上で避航時における一つの判定基準になる。また、この結果は船舶交通流における各船が避航領域を持つとの2節の概念を肯定しているものと考えられる。

次に、通過時間分布の変数 γS_o と最接近時間 T_m 、進路変更角 ϕ との関係について取り扱う。

即ち、通過時間分布の変数である避航領域 γS_o は旋回開始時の相対位置 $|R_o|$ に関して

$$R_o \doteq (\gamma S_o)^{1/2} \quad (48)$$

であり、特に、相手船が停止しているときの幾何学的な衝突直径 A は、

$$A \doteq (\gamma S_o / \pi)^{1/2} \quad (49)$$

となって、最接近時間 T_m 、進路変更角 ϕ の夫々は

$$T_m > \{2\kappa_i (\gamma S_o / \pi)^{1/2} + \gamma S_o / \pi\}^{1/2} / |V_i| \quad (50)$$

$$|\phi| > 0.5 \times \text{Cos}^{-1}[\kappa_i / \{(\gamma S_o / \pi)^{1/2} + \kappa_i\}] \quad (51)$$

で得られて、最接近時間 T_m 、進路変更角 ϕ はマン系の判断に関係する避航動作領域 γS_o と自船の旋回半径 κ_i とに関連することが判る。

これらの結果をまとめると、船舶の避航過程では(30)式、または、(31と32)式の不等式を満足する最適な最接近時間 T_m と進路変更角 ϕ を求めて、変更後の速度 V_s ベクトルを最終的に得ることである。しかし、幅狭海域等で複数の船舶を対象とするときは、衝突の解除条件に関する不等式と評価式がともに増加し、しかも、 γ の値には既に述べたようにマン系によって分布を持っており、一元的な解析方法で対象船の全部に対して変更後の速度 V_s を定めるのは現状では難しい。このため、 T_m 、 ϕ の値を選定するには、問題の目的に応じた近似解を得る方法の開発が必要である。

以上の解析と考察より、船舶交通流におけるマン・マシン系の巨視的な関係を調べるに当たっては、航行中の他船を避航操船するときの衝突条件と水路の拘束条件に対する操船者の判断様式を旋回前後の(8, 28)式、及び、(9, 31)式との比較から、次の様な逐次近似型のモデル機構を想定した。

- (1) 航行状況で進路の変針角 ϕ をきめ、(V_s は ϕ の関数であるから即知。)進路変更前後について(27)式の相対位置変化 $|\Delta R|$ を推定する。
- (2) 幾何学的な衝突直径 A の代わりに、 $|\Delta R| + A = A_o$ なる危険円 A_o を予測する。
- (3) 進路の変針角 ϕ は、この A_o で A_s を書換えた(28~31)式の不等式条件を満足するか確認する。

この様なモデルに従うとすれば、操船者が選択した変針角 ϕ と $|\Delta R|$ の推定値によって、船舶が水路を航行する時の航跡の長さは変わるため、船舶が水路の航行に要した時間の分布は変化し、交通流におけるマ

ン・マシンの影響が表れることになる。

そこで、実験装置としては主機をパーソナル コンピュータとし、以前、船舶交通流現象の研究で開発したシミュレーション法⁽¹⁾とシミュレータ方式⁽²⁾のソフトウェアを改造して組合せ、マン系の介在する図-4の

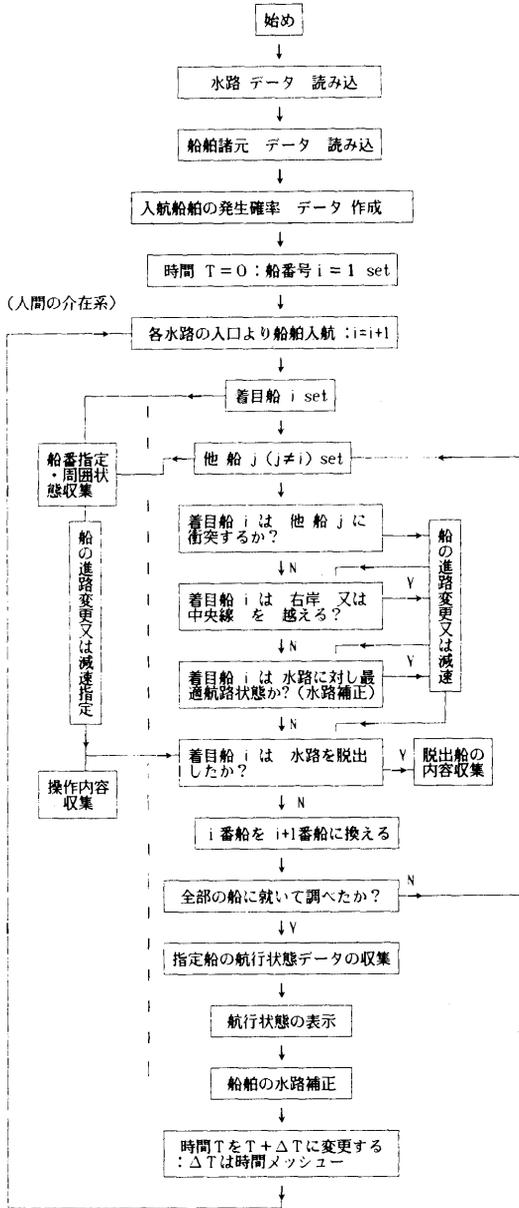


図-4 マン系の介在する船舶交通流発生装置のフロー

様な簡易型の船舶交通流発生装置を作成した。

交通流発生機構では背景となる交通の船舶はマン系の介在する船の運航と独立な機構となっており、自動的に目的地へ移動するものである。この装置では実験者の割り込み操作で交通流中の任意の一船を指定してマン系の介在する船とし、これが水路へ入航してから出航するまでの航行環境の状態を随時ディスプレイに出力するようになっている。そして、出力方式は、(イ)広域的な絶対座標系と(ロ)指定船の進行方向を基準にした相対座標系の何れの俯瞰画像でも可能であり、実験者は俯瞰画像情報で指定船を操船し、その間、指定船が水路の通過に要した時間や操船内容等のデータ等を収集する。

ここで、装置のディスプレイから実験者の判断に与えられる俯瞰画像情報(イ)と(ロ)の意味について述べる。(イ)は交通流の外側から見た場合であり広域的な水路形状や数多くの他船動向の情報が得られ、例えば、管制センターの情報に相当するものと考えられる。一方、(ロ)は交通流の内側から把握するものである。即ち、指定船の近傍領域の航行環境情報であり、例えば、指定船のレーダー情報とも見なされて直接操船の判断情報になり得る。

従って、同一の交通流パターンにおける模擬実験を(イ)と(ロ)の条件で実施し、通過時間分布を調べれば、船舶交通流におけるマン・マシン系の影響を知る手懸となる。

今回は通過時間分布を測定するために、東京港の水路でマン系が介在する船を含む船舶交通流について模擬実験を実施した。

9. 実験の条件と実験方法

実験に用いた水路は図-5Aの東京港における第一航路と第二航路の合流付近の水路を図-5Bの様にモデル化したものである。水路モデルには5箇所の入出航口をもち、総延長と幅員は夫々約8km, 350mであり、3箇所の三叉路と2箇所の屈曲部がある。そして、5箇所の入出航口へは表-1のO-D分布表に従い、表-2の大小5種類の船が入航するもので、船舶交通の流れは往復で20通りある。また、表-2の各種船の諸元と諸性能は、船の長さを変数とした統計的な関数⁽⁵⁾でモデル化を行ったものである。

交通流全体の様子は水路中に在る船の混合割合隻数を二分毎にサンプリングして、3時間44分間の時間経過について図-6で示した。なお、交通流の模擬時間

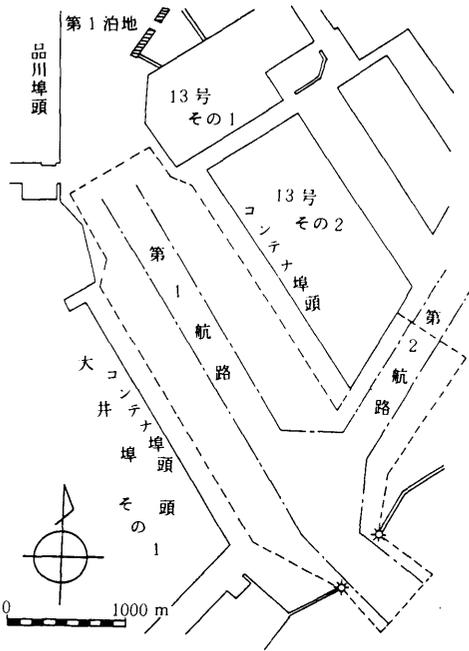


図-5A 東京港における第一航路と第二航路の位置

の値を3時間44分としたのは一回の実験を1日で終了するためである。

この間の船の大きさに対する表-2の船タイプ1, 2, 3, 4, 5別の平均存在隻数とその標準偏差は、夫々、 7.30 ± 0.12 , 8.50 ± 0.24 , 3.80 ± 0.08 , 2.68 ± 0.06 , 1.67 ± 0.16 隻である。また、船舶交通流の状態評価量としては、水路中の全船舶について、現在速力の満載速力に対する比と、現在速度の水路方向への余弦の平

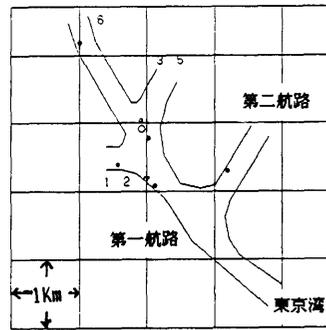


図-5B 東京港におけるモデル水路

表-1 船の大きさ別、行き先別のO-D分布 (3時間44分間で387隻)

入航口	1					2					3					4					5				
出航口	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
タイプ1	0	5	2	5	5	3	0	4	2	6	4	0	0	3	1	6	1	1	0	3	3	3	2	1	0
タイプ2	0	6	1	14	8	11	0	5	5	7	5	13	0	6	8	14	13	8	0	5	4	5	10	13	0
タイプ3	0	3	6	3	3	4	0	0	4	2	0	1	0	4	11	7	3	0	0	1	7	3	5	3	0
タイプ4	0	4	0	3	3	0	0	2	2	6	1	6	0	1	0	1	2	2	0	3	3	3	4	1	0
タイプ5	0	5	1	3	1	2	0	2	3	1	0	3	0	1	0	3	5	5	0	3	4	2	0	2	0

表-2 船の種類別 諸元と諸特性 (モデル)

タイプ	長さ(m)	幅員(m)	満載速力(m/S)	旋回半径(m)	停止距離(m)
1	9.85	2.90	3.26	17.4	25.5
2	18.58	4.81	3.94	34.8	64.7
3	22.58	5.68	4.18	42.4	84.5
4	65.06	12.2	5.65	124.	361.
5	91.44	15.8	6.25	177.	584.

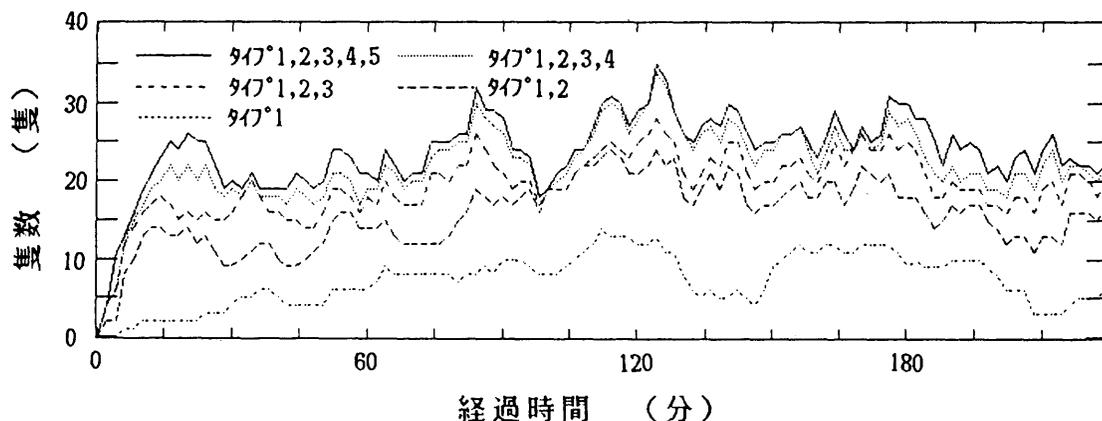


図-6 モデル水路における船の大きさ別割合

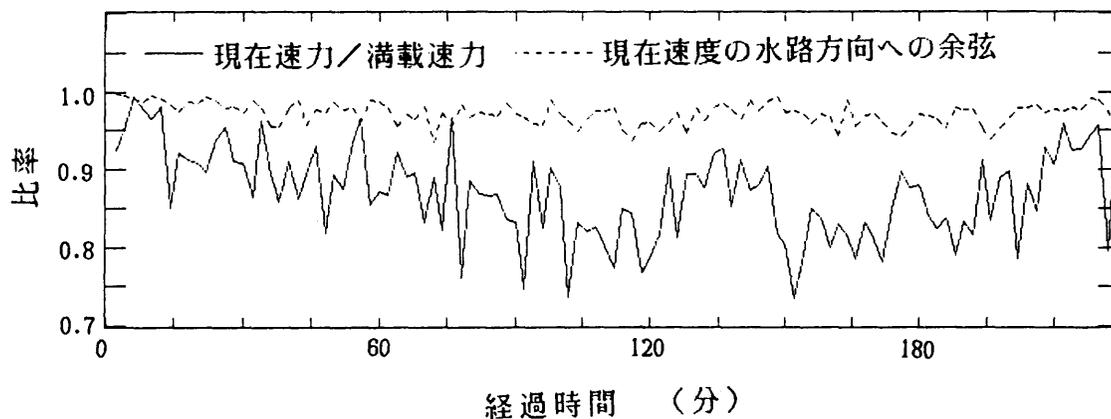


図-7 交通流の状態評価量

均値を取り扱い、水路中の隻数と同様、二分間隔毎のこれらの値を図-7に示した。そして、模擬時間、即ち、3時間44分間において、全船舶における速力の総平均と標準偏差は満載速力の $86.6 \pm 24.5\%$ となり、また、水路方向成分を速力で割った余弦の総平均と標準偏差は 0.970 ± 0.06 であった。従って、各船舶の進行方向は水路方向に対して \pm 約 15.4 度の変動範囲になっていることが判る。

実験者はディスプレイに描かれている船舶の交通状況より操船情報を収集するものであるが、模擬実験ではこの交通状況を陸岸地点から第三者的な立場で見たもの(図-8A)と船上から見たもの(図-8B)の二通りを取り扱うことにした。即ち、前者は船舶交通流を外側から捉えるものであり、後者は船舶交通流を内側から捉えることになる。以下、俯瞰画像情報の捉え方

から夫々を簡単に絶対系と相対系と呼ぶことにする。

今回の被検者は一般の大学生2名であり、実験者が操船する船舶は表-2のタイプ3、4、5に限定した。実験者はこれら三種類の内で任意の船を指定して、指定船がモデル水路へ入航してから出航までに要する時間、即ち、通過時間を測定する。この実験では被検者の個人差の影響を考慮して相対系と絶対系の双方の測定に参加することにした。実験回数は同一の船舶交通流パターンで絶対系と相対系について、夫々、11回、10回実施した。なお、1回の実験では任意の20~30隻についてのデータを収集している。

実験者の操作内容は指定船の速力を該当船の満載速度に対する割合(10~100%)と指定船の針路の目的方向(角度 $-90 \sim 90$)の値を必要に応じて入力する。以後、指定船は入力された操作内容とその船の長さに対応

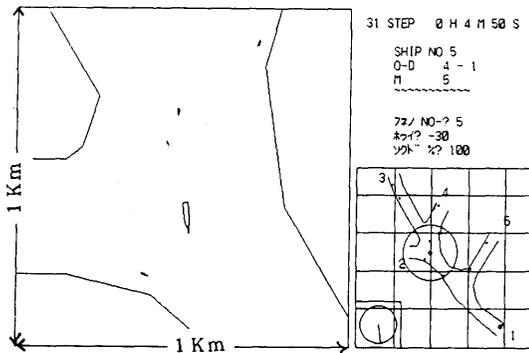


図-8A ディスプレイの表示方式 (絶対系)
「水路中の船舶が移動する」

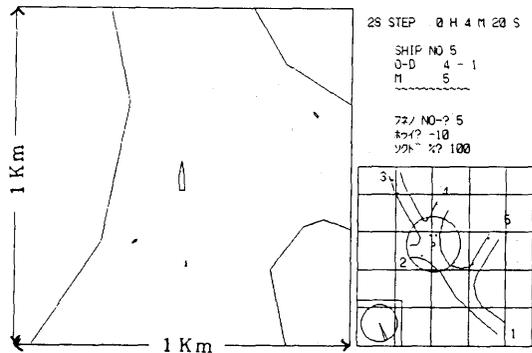


図-8B ディスプレイの表示方式 (相対系)
「船舶の周囲が移動する」

じた統計的な諸性能で自動的に航行する。この場合、実験者の操船基準は指定船を速やかに目的地に向かわせることと、航法等の規定から右側交通と左側の追い越しを原則とした。そして、大型船は水路の中心よりの推奨航路を航行する様に、船の大きさに重み付けを行った。

10. 実験結果と考察

一連の模擬実験では人間操船した船舶の隻数は絶対系と相対系について、夫々、326隻と239隻のデータを収集することができた。通過時間 T のデータは報告⁽⁶⁾に従い船の大きさ別の満載速力とO-D分布に関する推奨航路の長さで正規化して整理することにした。即ち、

$$(T' - T_0) / T_0 \equiv T_s \quad \text{但し、} \\ T_0 = \text{推奨航路長} / \text{当該船の満載速力} \quad (52)$$

と置く。 T_0 の意味は全く他船の影響を受けないで推奨航路を航行したときの通過時間である。

通過時間分布の結果は絶対系と相対系に分けて、各船舶のタイプ別と全体について、夫々、図-9と図-10に示した。なお、縦軸は頻度で、横軸は T_s (%)であり、分布は船の隻数で正規化している。また、これらの図中で零よりも小さい通過時間 T_s が僅かに見出されているが、これは実験者の操船が水路の屈曲部等で短絡経路を採ったものと思われる。

次に、絶対系と相対系について船のタイプ別と全体で通過時間分布の平均と標準偏差を求めると表-3の様になり、この表からは平均の値と標準偏差値とが接近しているために、両系の通過時間分布はポアソン分布に近いことが判る。

(426)

更に、表-3の両系で通過時間分布を比較すると極僅かであるが、小型船(タイプ3, 4)では相対系の方の平均値と標準偏差値が絶対系のそれらの値よりも小さくなっている。しかし、タイプ5の大型船では逆に相対系の方が大きくなっている。

また、絶対系(図-9)及び相対系(図-10)でも、船が大きいくほど通過時間 T_s の分布は広がる傾向にある。このことは実験水路の片側幅員が約175mであるのに対して、大型船(タイプ5)の旋回径 x が177mで、停止距離が584mであるため、水路における船の位置や水路方向と船の針路の交角 ψ の値によっては船の運航上の自由度に影響するものと考えられる。

即ち、避航旋回の場合、船から水路の右岸(中央線)への法線距離 D_w が旋回半径 x よりも大きいときには水路の影響が殆どないが、逆に小さいときは、水路から離脱や乗上げ防止のため、 $D_w > x(1 - \cos(\psi))$ の条件を保つと共に、旋回の移動距離 $x \sin(2\psi)$ 以内で水路屈曲部の右岸や中央線と交わらない条件が必要である。また、避航停止の場合、船の速度は指数的な減速が行われるので、停止距離(進行方向) d は近似的に、 $d > (\text{現在速力} / \text{満載速力})^2 \times (\text{満載速力から減速して停止する迄の距離})$ で表されるので、水路の離脱しないためにはこの停止距離 d を確保しなければならない。

従って、大型船は小型船よりも水路による拘束条件が強くなるから、今回の実験で確認した様に、大型船になる程通過時間分布が遅くなる方へ広がる現象を説明することができる。

一方、他船や水路の状況を捉えるとき、絶対系による把握は相対系のよりも確度の点で優れている。このため、操船上の時間余裕の点から見れば、他船や水路の拘束条件による影響が多いタイプ5の大型船は、相

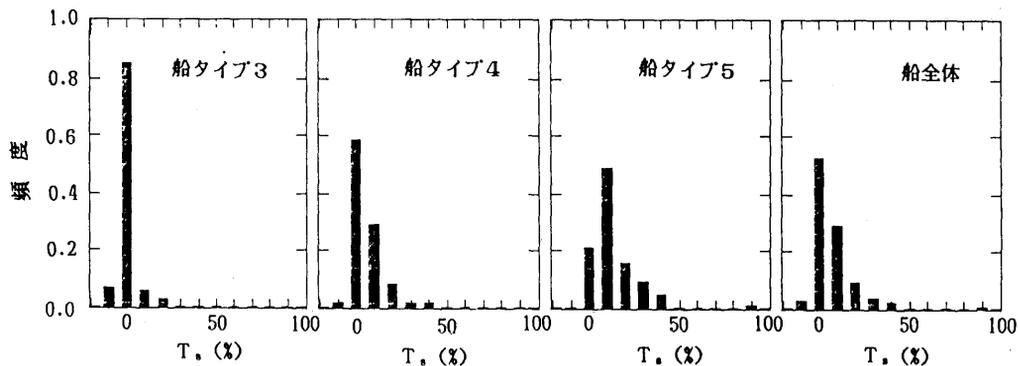


図-9 絶対系における通過時間分布

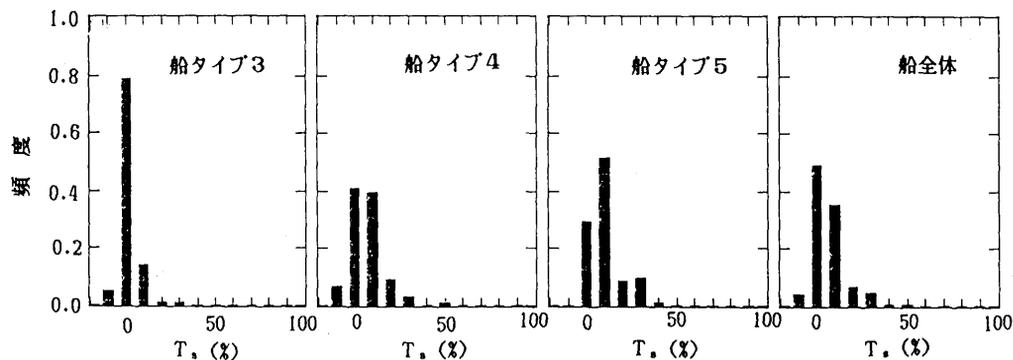


図-10 相対系における通過時間分布

表-3 船のタイプ別 隻数とT₀の平均値及び標準偏差

	絶対系				相対系			
	タイプ3	タイプ4	タイプ5	全体	タイプ3	タイプ4	タイプ5	全体
隻数	99	122	105	326	74	75	90	239
平均値	6.08	11.43	14.71	10.86	4.80	10.63	17.94	11.58
標準偏差	5.40	8.40	8.65	8.50	4.92	8.71	13.33	11.31

対系の通過時間分布が絶対系の分布よりも拡がり、小型船の傾向と逆転することが判る。

以上の点から、船舶交通流におけるマン・マシンの影響効果は小型船よりも大型船に多く現れる。そして、通過時間分布は同一船舶交通流パターンでも交通状況の情報を船上(相対系)、或いは、交通流の外側の地点(絶対系)から得て操船するとき、両系の通過時間分布が異なるから、この分布の差よりマン・マシンの影響効果を捉えたと考えられる。

11. むすび

はじめに、船舶交通現象をマン・マシン・システムの立場から取り扱う場合の交通流評価パラメーターとしては、船が水路を航行する時の通過時間分布を選び、通過時間分布の性質の解析結果を説明した。そして、この分布に含まれているマン系の要因に関する衝突の判定条件について位置ベクトル共面、時間軸、速度ベクトル共面上で解析して、避航操船時における判断

情報の把握様式をモデル化して考察した。更に、旋回避航時の条件、旋回時の損失、旋回限界の条件、及び水路による補正方式の解析結果から船舶交通流におけるマン・マシンの影響効果を捉える測定方式について検討を行った。

次に、東京港における第一航路と第二航路の合流付近のモデル化した水路で、マン系の介在する簡易型の船舶交通流発生装置を試作した。この装置のディスプレイに現われている交通状況を交通流の外側、即ち、陸地から捉える場合と交通流の内側、即ち、船上から捉える場合の二通りの俯瞰画像情報でマン系が操船する船を含む船舶交通流の模擬実験を行ない、マン系の操船する船舶が水路の航行に要した通過時間分布のデータを収集して考察した。

その結果、大型船では航行環境の両系による情報収集方式で通過時間分布に違いが現われたので、通過時間分布の差で船舶交通流におけるマン・マシンの影響効果を捉えることができた。そして、この効果は船舶の旋回径が水路幅に近づくに従って大きくなることが判った。

以上、この研究からは船舶交通に拘るマン・マシンの影響効果を捉える一つの手懸が得られる様になった。更に、位置ベクトル共面、時間軸、速度ベクトル共面における衝突判定条件等の解析結果は、船舶交通の実態調査におけるレーダー写真などの観測データの考察に有効な手段となる。

謝辞

本研究に当たり、種々の有益な御意見を戴きましたシステム技術部翁長一彦部長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 山田一成, 田中健一, 有村信夫, 金丸貞巳: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究 (C-I), 水路網における船舶交通流シミュレーション, 船舶技術研究所報告, Vol.8, (1971), No.4, p.17
- 2) 山田一成, 田中健一, 渡辺健次, 有村信夫, 浜島金司, 金丸貞巳: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究 (C-II), 船舶交通流の制御シミュレータの開発, 船舶技術研究所報告, Vol. 15, (1978), No.3, p.1
- 3) 田中健一, 渡辺健次, 山田一成, 金丸貞巳, 有村信夫, 浜島金司: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究 (C-III), シミュレータによる船舶交通流制御法の研究, 船舶技術研究所報告, Vol. 15, (1978), No.3, p.23
- 4) 渡辺健次, 浜島金司, 富田宏: 船舶交通システムの研究—その4—, 船舶技術研究所報告, Vol.15, (1978), No.3, p.49
- 5) 藤井弥平: 海峡および水道の船舶交通現象に関する報告 (B-I), 航行容量の試算, 船舶技術研究所報告, Vol.13, (1966), No.5, p.43
- 6) 山田一成, 有村信夫, 田中健一: 船舶交通流評価としての船速度分布と通過時間分布(そのI), 船舶技術研究所報告, Vol.22, (1985), No.4, p.1
- 7) 有村信夫, 山田一成, 塩田重須, 大谷浩二: 実船調査による避航時のレーダー写真解析, 日本航海学会論文集, Vol.77, (1987), p.125