

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I)

山田一成*・有村信夫*・田中健一*

The Travelling-time Distribution of Vessels for Evaluation of Marine Traffic(I)

By

Kazunari YAMADA, Nobuo ARIMURA and Ken'ichi TANAKA

Abstract

Traffic situation in a water way is evaluated here where the distribution of pass time is taken as the index for congestion.

The ship domain model, a statistical concept of a domain into which other ships avoid to enter, is assumed here together with an assumption of the speed in the direction of the water way, being liner functions of the density of other ships domain.

Binomial functions are investigated to approximate distributions of the speed and the travelling-time. This yields that the Poisson distributions is good one for the purpose. where the variable is taken as ratio of the total ship area to the area of water way.

1. ま え が き

船舶の航行安全の重要性から海上交通については各方面で調査研究⁽¹⁻³⁾が行われている。船舶の交通現象は非常に複雑な現象であり、これの解明手段として船舶交通流の実態観測⁽⁷⁻¹³⁾やシミュレーション⁽¹⁴⁻¹⁸⁾が広く用いられている。

前の報告^(14,17)で船舶が長水路区間を航行するときの通過時間は水路の形状、交通量、交通流における大小船舶の混合比率など交通環境によって変わることが示され、通過時間分布が交通流の状態を知る一つの指標になることが分かった。そこで、広域的な航行領域における船舶の交通状態を調べる手段として、この領域で代表的な有限個の水路区間についての通過時間分布をシミュレーション等で求め、次に通過時間分布資料から水路形状など交通環境の異なった未調査領域の

通過時間分布等を推定する方式が考えられる。本報告は船舶交通流中の各船舶の相対位置から求められた閉塞領域⁽⁶⁻¹³⁾に着目して、この通過時間の分布と各船の水路方向の速度成分に関する分布及び各船の回避回数⁽⁶⁻¹³⁾の性質を解析したものである。また、具体例としては、通過時間分布と水路形状について水路幅員、水路長、枝水路の有無の関係をとり扱った。なお、広域交通における船の旅行時間(通過時間)についてはいくつかの解析法⁽⁴⁾が示されている。

2. 通過時間分布と速度分布の解析方法

船舶が一定区間を航行するときの通過時間分布と水路方向に沿った速度成分の分布について解析を行った。

前提としては既に述べたように、船舶交通流中の各船舶の相対位置の関係から、他の船舶を近づけない閉塞領域が存在する点に着目して、航行の安全性から他船の出現によって自船の針路変更や減速など避航動作を行う統計的な領域を想定する。そして、他船がこの領域に多く存在すれば、自船の回避回数が確率的に増

* 共通工学部

原稿受付 昭和60年3月5日

加し、迂回によって自船の水路方向の速度成分が小さくなる。この点から、自船の水路方向の速度成分を統計的な領域内の船舶密度について一次式で近似する。また、船舶交通流はほぼ定常状態の場合を取り扱い、交通量および船舶の大きさ別の分布状態は時間経過に伴ってあまり変わらないことにする。また、船舶交通流中の標準船としては船舶の大きさ別分類で最も数の多いものを選ぶことにした。さらに、航行領域は船舶の大きさに較べて十分に広いものとする。

以下、頻繁に現れる重要な記号について説明する。
 S_0 : 1隻の標準船が水路の水面を占有する大きさとする。

γS_0 : 標準船が他船などの存在で航行上の影響を受けて、自船の針路変更や減速など避航動作を行う統計的な領域の面積。

MS_0 : 船舶交通流の形成される水路の有効水面の面積。

$M_1 S_0$: 船舶交通流の全船舶が占有した水路上の領域の面積。

$M_2 S_0$: $MS_0 - M_1 S_0$ 。

従って M_1 は水路中の全船舶を標準船で換算したときの隻数になり、 M_2 は幾何学的にみた水路の航行可能な船の余裕換算隻数となる。また、 γ は船が避航動作を行う統計的な領域を船の大きさに正規化した値と見なすことができる。

はじめに、自船の航行上に影響を及ぼす領域 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して直ちに超幾何分布の

$$P_k = \binom{M_1}{k} \binom{M_2}{\gamma - k} / \binom{M}{\gamma} \quad (1)$$

で与えられ、この領域内の船舶密度 ρ は

$$\rho = k / \gamma S_0 \quad (2)$$

となる。またその平均密度 $\bar{\rho}$ とその分散 σ^2 は夫々

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\gamma S_0} \sum_{k=0}^{\gamma} k P_k = \frac{M_1}{MS_0} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{(\gamma S_0)^2} \sum_{k=0}^{\gamma} \left(k - \frac{M_1}{M} \gamma\right)^2 P_k \\ &= \frac{\gamma}{(\gamma S_0)^2} \frac{M_1}{M} \frac{M_2}{M} \frac{M - \gamma}{M - 1} \quad (4) \end{aligned}$$

(312)

として求められる。

通常の船舶の交通現象では単位面積当りの船舶密度は低いので、航行中の全船が水路を占める面積 $M_1 S_0$ は水路面の MS_0 に較べて非常に小さくなる。また、統計的な避航領域は水路の有効面積に較べて極めて小さく、 $\gamma S_0 \ll MS_0$ も成り立つから、(1)式は二項分布で近似でき、超幾何分布の複雑性が避けられる。すなわち、(1)式は

$$\begin{aligned} P_k &\sim \binom{\gamma}{k} (M_1/M)^k (M_2/M)^{\gamma-k} \\ &= \binom{\gamma}{k} p^k q^{\gamma-k} \quad (5) \end{aligned}$$

となり、 M_1/M 、 M_2/M を夫々 p 、 q と書けば $q = 1 - p$ となる。

以下、この p を占有比と呼ぶことにする。

次に、船舶が水路の長さ L の区間を航行するときの通過時間と航行中の船速度の分布について調べる。まず、船舶交通流中で着目した一船が航行する距離 L を N 等分し、 L/N の長さが他船などの存在で自船の航行上に影響を与える統計的領域 γS_0 の直径程度の値に選ぶとすれば、各区間を通過中の船の速度変動は各区間で互いにほぼ独立な事象として扱うことができる。さらに、前提からその船が各区間を通過するとき自船の水路方向に沿った速度成分 $V^{(i)}$ を各区間の船舶密度 $\rho^{(i)}$ の一次式の

$$V^{(i)} = V_0 (1 - \alpha \rho^{(i)}) \quad (6)$$

で近似すると、避航による速度成分の相対遅れ比は

$$(V_0 - V^{(i)}) / V_0 = \alpha \rho^{(i)} \quad (6')$$

になり、船の満載速力 V_0 の違いに無関係な値となる。ただし、 α : 定数、 i : 区間番号と書く。既に述べた様に、自船の水路方向に沿った速度成分の変化量は自船近傍の船舶密度に比例すると近似しているから、(6')式の α の意味は自船の他船に対する避航効果の強さを表わしていると考えられる。そして(6)、(6')式中の船舶密度 $\rho^{(i)}$ はこの区間の中央を通過するときの値を用いる。以下水路に沿った速度成分を簡単に速度と呼ぶことにする。

水路の長さ L の区間を航行するときの船の平均的な速度 V 、通過時間 T および、これらの相対遅れ比は夫々

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V^{(i)} = V_0 \left(1 - \frac{\alpha}{N\gamma S_0} m\right) \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L}{V^{(i)}} \sim T_0 \left(1 + \frac{\alpha}{N\gamma S_0} m\right) \quad (8)$$

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\alpha}{N\gamma S_0} m. \quad (7')$$

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\alpha}{N\gamma S_0} m \quad (8')$$

となる。ただし、

$$m = \sum_{i=1}^N k^{(i)} = \gamma S_0 \sum_{i=1}^N \rho^{(i)} \quad (9)$$

$$T_0 = L/V_0 \quad (10)$$

であり、 m の意味は自船が長さ L の水路区間を通過するとき、航行上で影響を受ける他船の出現隻数となる。

一方、各区間で他船の出現する隻数 $k^{(i)}$ ($i=1, 2, \dots, N$)の確率は互いに独立で、(5)式と同じ二項分布の $B(\gamma, p)$ に従い、確率変数 m の分布法則は $B(N\gamma, p)$ の二項分布になる。

従って、(7)式と(8)式から交通流中の船舶の速度 V と通過時間 T の分布は、共に、同じ二項分布になることが分かる。

さらに、他船の出現する隻数 m の値は $0 \leq m \leq N\gamma$ であって、その確率密度 P_m は

$$P_m = \binom{N\gamma}{m} p^m q^{N\gamma-m} \quad (11)$$

となり、(11)式から船舶の速度 V と通過時間 T の平均と分散は夫々

$$\bar{V} = V_0 (1 - \alpha p / S_0) \quad (12)$$

$$\sigma_V^2 = V_0^2 \alpha^2 \gamma p q / (N\gamma S_0)^2 \quad (13)$$

$$\bar{T} \sim T_0 (1 + \alpha p / S_0) \quad (14)$$

$$\sigma_T^2 = T_0^2 \alpha^2 \gamma p q / (N\gamma S_0)^2 \quad (15)$$

で求められ、更に(8')式の通過時間の相対遅れ比についての平均と分散は

$$(T - T_0) / T_0 = \alpha p / S_0 \quad (14')$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 \gamma p q / (N\gamma S_0)^2 \quad (15')$$

となる。

次は、交通流における船舶の速度と通過時間の分布の形状を調べるために、この二項分布の積率母関数 Z すなわち、

$$Z = (pe^{\theta} + q)^{N\gamma} = \exp(N\gamma \log(1 + p(e^{\theta} - 1))) \quad (16)$$

を導入する。(16)式の母関数は船舶の航行水域面に対する占有比 p を $1 \gg p$ の条件で近似すると、

$$Z \sim \exp(N\gamma p(e^{\theta} - 1)) \quad (17)$$

となり、さらに、占有比 p が多少大きいときには(16)式で e^{θ} を展開し p^3 以上の項を捨てると、

$$Z \sim \exp(N\gamma p\theta + N\gamma p q \theta^2 / 2) \quad (18)$$

が得られる。(17)と(18)式の積率母関数は夫々ポアソン分布と正規分布に対するものである。船舶の交通量が増加すれば、交通流中の全船舶による水路面の占有比 p は大きくなり、船舶の速度及び通過時間の分布形状はポアソン分布から正規分布へと変わることが分かる。当然のことながらこの種の問題について広く知られている分布と一致する。

ここでは α 、 N 、 γ の三つの未知数を用いて、船舶が一定の距離を航行するときの通過時間と船舶の速度の分布を確率的に取り扱ってきた。観測やシミュレーション等から、船舶の平均通過時間の(14)式、または、通過時間の相対遅れ比の(14')式と通過時間の分布の(17)式と通過時間の分散の(15)式で、夫々、未知数である α 、 $N\gamma$ 、 γ の概略値を得ることができる。

また、 α 、 $N\gamma$ 、 γ の表わす意味をまとめて見ると、 α は長さ L の水路を航行するとき自船が他船等の存在で航行上の影響を受けて進路変更や減速を行って避航する場合の避航効果の強さに関係するものである。 $(\gamma S_0)^{1/2}$ は操船者が相手船と衝突を回避するために必要と判断した距離に相当し、 γ は船が避航動作を行う統計的な領域を船の大きさで正規化した値である。 N は $L/2(\gamma S_0)^{1/2}$ で、水路区間の分割数を表わすものである。

3. 統計的な避航回数の推定

前節では、船舶の速度の水路方向に沿った成分のみを扱ってきた。ここでは、他船等を避航するとき、船舶の進行方向が常に水路方向に対して一定の角度範囲以内で回避操作を行って航行する場合を採り上げ、自船における確率的な回避回数を調べる。

船舶交通流における各船の速度ベクトル方向は水路方向に沿って何時も $-\beta \sim +\beta$ 範囲内の角度にあるものとし、以下、この角度を進針角と呼ぶことにする。

一般に、船舶の分類は速度ベクトル \bar{V} が $\bar{V} + \Delta\bar{V}$ の間にある隻数を Δn とすれば、水路中の全船舶隻数 K は Δn を速度空間で積分して得られる。もし、各船舶が満載速力で航行しているとすれば、満載速力は船の長さの統計的な関数⁽⁵⁾として取り扱えるので、 Δn は水路中の全船舶の大きさ別分類隻数に等しくなる。さらに、船の長さの違いによる満載速力は船の長さの約0.3乗⁽⁵⁾に比例して変わることから、各船の速度による船舶密度の偏り等の変動については考慮しないで、自船の航行に影響を与える他船の大きさ別分類の船種に関する出現確率 P_{vi} を $\Delta n_i / K$ で与えることにした。

一方、各船の速度ベクトルの進針角が一様な確率分布をもつとすれば、自船と他船の速度ベクトルに関する相対方位角 ψ の確率分布 P_{ij} は

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2\beta} \left(1 - \frac{|\psi|}{2\beta}\right) & |\psi| \leq 2\beta \\ 0 & |\psi| \geq 2\beta \end{cases} \quad (19)$$

となる。

また、船舶の形状を長軸 $2a_k$ と短軸 $2b_k$ の楕円形で近似したとき、船舶が他船の存在を考慮しないで、二隻の船舶が夫々の速度ベクトル \bar{V}_j, \bar{V}_i (i : 自船, j : 他船) で直進して衝突するときの範囲、即ち、幾何学的衝突直径は相対速度ベクトル $\bar{V}_{ji} = \bar{V}_j - \bar{V}_i$ 軸の法線上に投影された(20)式の線分 D_{ij} ^(註)で表わされる。

$$D_{ij} = \sum_{k=i,j} \frac{1}{|\bar{V}_{ij}| |\bar{V}_k|} \sqrt{a_k^2 (\bar{V}_{ij} \times \bar{V}_k)^2 + b_k^2 (\bar{V}_{ij} \cdot \bar{V}_k)^2} \quad (20)$$

従って、船舶が他船と幾何学的衝突する単位時間当りの確率回数 N_{ij} は藤井の関係式⁽¹⁹⁾を変形して用いると、

$$N_{ij} = \frac{K}{MS_o} \int_{\bar{V}} \bar{V}_{ij} \cdot D_{ij} \cdot P_{ij} \cdot P_{V_i} \cdot P_{V_j} \delta \bar{V} / \int_{\bar{V}} P_{V_i} \delta \bar{V} \quad (21)$$

で求められる。

他方、第一近似として自他船間の幾何学的衝突領域

(註) D_{ij} の正確な軌跡は各楕円の原点に関する垂足曲線の和となり、この垂足曲線の軌跡はブースの紐状線であるが、(20)式ではブースの紐状線に外接する矩形形状で近似している。

(314)

が、統計的な避航領域 γS_o に相似であるとすれば、 γS_o の直径は幾何学的衝突直径に比例して、 $\gamma^{1/2} D_{ij}$ と置くことができる。このため、上述で算出した衝突の確率回数から航行上に影響を与える統計的な領域 γS_o に他船が出現したとき、自船の回避回数は $\gamma^{1/2} N_{ij}$ で与えられることが分かる。さらに、この航行過程で確率的に直進航走が可能な平均距離 L_{ij} は、自船の平均速度を単位時間当りの衝突の回避回数 $\gamma^{1/2} N_{ij}$ で割って得られる。また、 $(\gamma S_o)^{1/2}$ の意味は操船者が相手船と衝突を回避するために必要と判断した距離に相当するものと考えられる。

次に、大小2種類の船舶が直線の幅700mの水路を交通量240隻/時で航行する場合について、(21)式の試算例を示す。船舶の混在比は、小型船対大型船の比を(1:0), (2/3:1/3), (1/3:2/3), (0:1)の4種類とした。

図-1では、単位時間当りの衝突回避回数 $\gamma^{1/2} N_{ij}$ と進針角の関係を示した。図の縦軸は $\gamma^{1/2} N_{ij} (S^{-1})$ の対数を取り、横軸は船舶の最大進針角 β (度)を取り上げて描いている。ここでは γ の値の資料が少ないので、閉塞領域の観測値を参考にして $\gamma^{1/2} = 10$ と置いて進針角の依存性のみを調べた。船舶の混在比の種類表示は小型船舶の場合を◎, ○, △, □の印で行い、大型船舶は各印の上に/を重ねて表示した。

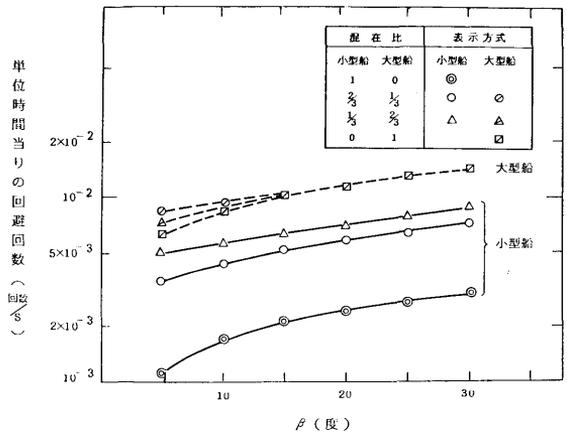


図-1 単位時間当りの衝突の回避回数と進針角の関係

縦軸は衝突の回避回数 $\gamma^{1/2} N_{ij} (S^{-1})$ の対数を取り、横軸は船舶の最大進針角 β (度)を示す。なお $\gamma^{1/2} = 10$

なお、大型船舶の進針角 β の大きい所で \odot, \triangle の印が無いのは大型船舶の \square とほとんど重なるためであり、省略している。図の単位時間当りの衝突の回避回数 $\gamma^{1/2} N_i$ は船の進針角 β が広がるに従って増加し、その絶対値は大型船舶の方が小型船舶よりも大きい。また、この船舶交通流の大型船では衝突回避回数に小型船による混合の影響をあまり示さない点から、飽和状態で航行しているものと推定される。反対に、小型船は大型船の混在比の上昇に従って、回避回数を増加させることが分かる。

このような結果が得られたことは大型船が小型船に比較して水路面に対する占有面積と速度が大きいことによるものであり、このことから、回避回数についての進針角の依存性で混合交通流における大きさ別船舶の航行状態を調べることができる。しかし、この回避回数には他船の出現で自船の航行安全上に影響を与える統計的な領域 γS_0 の $\gamma^{1/2}$ を変数として含んでおり、 γS_0 の形状は船舶の運動性能と見張の判断に関係するため、 γS_0 の形状について十分な検討を行う必要があると考えられる。

4. 通過時間分布と速度分布の推定例

広域的な水路で代表的な小区間として、幅員 B_0 、長さ L_0 の水路について本モデルの α 、 N 、 γ の三つの未知数と水路に対する船舶の占有比 p_0 の値が得られたとき、これらの値から他の水路条件における船舶交通状態の評価量として、船舶の通過時間分布等を求める二三の具体例を示す。

その1 水路の長さが L_0 から L に変わった場合で船の速度及び通過時間の分布を推定する。まず、 BL_0 、 $BL \gg \gamma S_0$ の条件が十分成り立つならば、両者の水路で単位長さ当りの船舶の交通状態は確率的にほぼ同じ状態と考えられる。このため、両者水路で夫々の積率母関数を Z_0 、 Z と書けば、単位長さ当りの積率母関数で、 $Z_0^{L/L_0} = Z^{L/L_0}$ が成り立ち、直ちに

$$Z = Z_0^{L/L_0} = (p_0 e^{\alpha} + q_0)^{N\gamma L/L_0} \quad (22)$$

が得られる。従って、水路長 L についての船の速度及び通過時間の分布の確率密度 P_m は

$$P_m = \binom{\nu}{m} p_0^m q_0^{\nu-m}, \quad \nu = N\gamma L/L_0 \quad (23)$$

となって、(12)~(18)式より、これらの平均や分散等を知ることができる。

また、水路の長さは同じであるが、水路の幅員が B_0 から B に変わった場合は、水路面に対する船舶の占有比が B_0/B 倍になる。その結果、通過時間分布の積率母関数 Z は

$$Z = ((B_0/B)p_0 e^{\alpha} + 1 - (B_0/B)p_0)^{N\gamma} \\ \sim \exp(N\gamma (B_0/B)p_0 (e^{\alpha} - 1)) \quad (24)$$

となり、(24)式から船舶の通過時間分布についての拡がりとその水路幅員の依存性が予測できる。

次に、水路の幅員が緩やかに変化して狭い所などのある長水路の場合を採り上げる。まず、水路を j 個の幅員 B_i 、長さ L_i の広い矩形水路の連なったものとして扱い、各部分水路の積率母関数 Z_i が互いにほぼ独立と見なすと、長水路の積率母関数 Z は

$$Z = \prod_{i=1}^j Z_i = \prod_{i=1}^j (p_i e^{\alpha} + q_i)^{N\gamma L_i/L_0} \\ \sim \prod_{i=1}^j \exp(N\gamma (L_i/L_0) (B_0/B_i)p_0 (e^{\alpha} - 1)) \\ = \exp(N\gamma \sum_{i=1}^j (L_i/L_0) (B_0/B_i)p_0 (e^{\alpha} - 1)) \quad (25)$$

となる。なお、 $p_i = (B_0/B_i)p_0$ 、 $(i=1, 2, \dots, j)$ は夫々の各部分水路における船舶の占有比である。

その結果、水路の幅員が変化する場合でも船舶交通が定常状態で流れているかぎり、全水路における船の速度と通過時間の分布は、ポアソン分布となることが分かる。

また、水路幅員が変わる場合でも全体の水路における船の占有比 p を

$$p = \sum_{i=1}^j (L_i/L_0) (B_0/B_i)p_0 \quad (26)$$

と書き代えれば、この水路と等価な一様水路の問題として扱えることを示した。

その2 本線水路の途中にある枝水路から船舶が出入りするとき、本線水路を通過する船舶の速度と通過時間の分布を取り扱う。すなわち、本線水路の長さを L とし、枝水路は本線水路の入り口から L_1 の場所にあつて、この枝水路より船舶の出入で本線水路面における船舶の占有比が Δp 増減する場合である。ここでは一方通行とする。本線水路を航行する船舶の通過時間の分布の積率母関数 Z は

$$Z \sim \exp(N\gamma (L_1/L)p_0 (e^{\alpha} - 1))$$

$$\begin{aligned} & \times \exp(N\gamma(L_1/L - 1)(1 + \Delta p/p_0)p_0(e^\theta - 1)) \\ & = \exp(N\gamma((L_1/L) + (1 - L_1/L)(1 + \Delta p/p_0))p_0(e^\theta - 1)) \end{aligned} \quad (27)$$

で与えられる。

この結果から、枝水路から船舶の出入がない $\Delta p = 0$ の場合の占有比 p_0 と $N\gamma$ の値が得られると、枝水路から船舶が出入する本線水路を通過する船の速度や通過時間の分布を(27)式で推定することが可能になる。

5. む す び

本稿は二つの前提を基に長水路を航行する船舶の通過時間分布と船の水路方向に沿った速度成分の分布を統計的な手法で考察したものである。

すなわち、船舶交通流中の各船は航行安全上から他船の出現で自船の針路変更や速度の減速など回避操作を必要とする統計的な領域をもち、さらに、各船の水路方向に沿った速度成分の変動をこの領域内の船舶密度について一次式で近似できるとした。

その結果、長水路を航行する船舶の通過時間と船速度の水路方向成分の分布は、共に、水路面に対する全船舶の占有比を確立変数とするポアソン分布になることを導いた。

通過時間分布の水路形状変数の関係から、長水路の長さや幅員を変えたときの通過時間分布を推定することが可能になった。そして水路の幅員が緩やかに変化する場合でも、この水路と等価な一様水路の問題として扱えることを示した。また、本線水路の途中にある枝水路から船舶の出入する複合水路でも、本線水路を航行する船舶の速度や通過時間の分布を推定できるようになった。

さらに、船の進行方向がいつも水路方向に対して一定の角度範囲以内で一様な分布を採る大小船の混合交通流を用いて、自他船間の確率的な衝突回数から自船の衝突を防ぐための回避回数を試算して、混合交通流における大きさ別の船舶の航行状態を調べた例を示した。

以上に述べたように、本解析モデルは船舶の交通流の実態観測やシミュレーションなどで、ある部分水路について本モデルの定数値 α , N , γ が求められると、実際に交通流の調査が行われていない航行環境下で、一定区間を航行する船の通過時間の分布等を推定して、船舶交通流の一つの評価量を得ることが可能になった。

謝 辞

本研究に当り、ご意見ご討論を戴きました共通工学部 数理研究室長 渡辺健次氏をはじめとして関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) “海上交通工学論文集録”，日本航海学会誌，Vol.46,(1975), p.78-86
- 2) “海上交通工学論文集録”，日本航海学会誌，Vol.80,(1984), p.70-84
- 3) 藤井弥平：“序説海上交通工学”，海文堂（1971）
- 4) 渡辺，浜島 船舶交通システムの研究 一広域交通の一解析法一，船舶技術研究所報告，Vol.10,(1973), No.2, p.1
- 5) 藤井弥平：海峡および水道の船舶交通現象に関する研究，(B-I)，船舶技術研究所報告，Vol.3,(1966), No.5, p.43
- 6) 渡辺健次：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例，船舶技術研究所報告，Vol.3,(1966), No.5, p.53
- 7) 藤井，渡辺，田中，山田，宮城：制限水路の船舶の基本航行容量について (A-1)(そのI)，小型船の閉塞領域の調査，船舶技術研究所報告，Vol.3,(1966), No.2, p.1
- 8) 藤井，渡辺，田中，山田，関：制限水路の船舶の基本航行容量について (A-1)(そのII)，大型船の閉塞領域の調査，船舶技術研究所報告，Vol.3,(1966), No.2, p.17
- 9) 藤井，渡辺，田中，山田，沢井，金丸：海峡および水道の船舶交通現象に関する研究，制限水路の船舶の基本航行容量について (A-1)(そのIII)，大型船の閉塞領域の調査，船舶技術研究所報告，Vol.4,(1967), No.4, p.1
- 10) 藤井，田中，山田，金丸，有村：京浜運河の船舶交通量に関する考察，船舶技術研究所報告，Vol.4,(1967), No.6, p.19
- 11) 田中，渡辺，山田，沢井，金丸，有村，藤井：海峡および水道の船舶交通現象に関する研究，制限水路の船舶の基本航行容量について (A-2)(そのI)，閉塞領域におおげず潮流の影響の研究，船舶技術研究所報告，Vol.6,(1969), No.3, p.17
- 12) 田中，渡辺，山田，沢井，金丸，有村，浜島：海峡および水道の船舶交通現象に関する研究，制限

水路の船舶の基本航行容量について(A-2)(そのII), 船舶の混合交通における交通換算係数について, 船舶技術研究所報告, Vol.8, (1971), No.3, p.17

- 13) 田中, 渡辺, 山田, 金丸, 有村, 浜島: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究, 制限水路の船舶航行容量について, 一観測による航行容量の推定一, Vol. 10, (1973), No. 3, p 1
- 14) 山田, 田中, 有村, 金丸: 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のシミュレーション, 船舶技術研究所報告, Vol.8, (1971), No.4, p.17
- 15) 渡辺, 浜島: 船舶交通システムの研究—その3—, 船舶技術研究所報告, Vol.11, (1974), No.4, p.1
- 16) 山田, 田中, 渡辺, 有村, 金丸, 浜島: 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
- 17) 田中, 渡辺, 山田, 金丸, 有村, 浜島: 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
- 18) 渡辺, 浜島, 富田: 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
- 19) 文献 No.3, p.154-156