

# 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

山田一成\* 田中健一\* 有村信夫\* 金丸貞巳\*

Navigational Traffic Phenomena on Narrow Straits

(C-I) A Method of Simulation of Traffic Flow in Waterways

By

Kazunari Yamada, Ken'ichi Tanaka, Nobuo Arimura and Sadami Kanamaru

## Abstract

The traffic capacity of network of waterways is important for the design of a canal system in a harbor. A program for the simulation of traffic flow is studied as the first step for the evaluation of the capacity.

Since the data on the traffic in the canal system of Tokyo Harbor are compiled, the simulation is applied for the Keihin Canal and its vicinity in the system, where there are curves and a T-shaped crossing. The distributions of the ship size and speed are so determined to simulate the real ones and the time of ship arrival is assumed to follow the random distribution.

The unit time,  $\Delta T$ , for the simulation is determined as one tenth of the time necessary to proceed  $8L_{\text{mean}}$ ; the semi-axis major of the effective domain, where  $L_{\text{mean}}$  is the average length of ship.

When no collision, stranding, nor deep violation of center line is expected in a time length of,  $10\Delta T$ , each ship is moved forward by  $\Delta T \cdot V$ , where  $V$  is the speed of each ship. However, when a ship is expected to collide, strand, or violate the center line, the change in direction is examined and followed. If no suitable steering is expected to avoid the danger, retardation is examined.

An example of the distribution of ship traces is shown as the result of the simulation.

## 1. ま え が き

近年産業発展にともない輸送貨物の増大と技術革新により、大型船、高速船の就航多量化などで、わが国の港湾とこれに通じる狭水道の内航ならびに外航の船舶の交通量が飛躍的に増大し、年を追って輻輳化が著しくなっている。現在これがため狭水道における船舶の衝突、乗揚げなど交通事故的海難がしばしば起こっている。この種の問題を解決するため狭水道の船舶交

通現象について多くの観測、調査、研究などがなされるようになったが、<sup>1)</sup>ここで特に交差、屈曲、障害物などのある複雑な水路、あるいは、港湾計画に基づく水路など、各種交通条件の重り合った広域的な水路網の船舶交通流を解析する手法が望まれている。

このため共通工学部では、ここ数年にわたり狭水道の船舶交通現象について調査研究を行ない。<sup>2)3)4)5)6)7)</sup>さらにこの結果とともに水路網の船舶交通流を大型の電子計算機でシミュレートし、解析するソフトウェア

シミュレーションに関する報告をCシリーズとして発表することにした。

\* 共通工学部

原稿受付 昭和46年6月30日

の開発を試みている。

このソフトウェアは、水路網の形状、船舶の種類、大きさ、交通量を入力条件として与え、船の運動性能および航法などの拘束条件のもとにこの水路網中の多数の船舶が互いに他の船舶や障害物、陸岸などを回避運行し能率よく、各船がそれぞれの目的地に達するための最適航路を選ぶべく、これらの船舶の位置および速度を時々刻々計算し、船舶交通流を求めていく方法であり、あわせて、船舶交通流の各時間断面における交通現象の評価量を計算するものである。しかし、実際に船舶の交通現象をシミュレートする場合には、前述の入力条件や拘束条件をいかに近似して、いかなる手順で計算し、所定の時間内に結果を得るかが重要な点となる。

今回は、このシミュレーションの方法で東京港の港湾計画中の京浜運河および第一航路に適用して一応の成果を得たので、この方法とその適用例について以下に報告する。

## 2. シミュレーションの前提とモデル

今回の水路網における船舶交通流のシミュレーションで用いた前提、水路モデルおよび船舶のモデルは次の通りである。

### 船舶の運行上の前提

水路網に入航しようとする船舶はそれぞれこの水路網のどの入口より入り、どの道筋を經過して、どの出口より出航するか、という事柄は確定しているとし、さらにこの水路網の多数の出入口における入航船舶の交通量は互いに独立であり、そして、この地点の入航船舶の交通量は前提として設定された交通量を中心に時間経過とともに変動する。なお、この設定された交通量を以下標準交通量ということにする。

### 水路網のモデル

この前提事項によってこの水路網を航行する船舶は水路の出入口別に分類することができて、この分類に応じた船が航行する特定の部分水路が水路網中に見出される。例えば、図-1のようなT字形の水路網では、この水路を通る船舶により、①→②、②→③、③→④の三本の部分水路が知られる。以下この部分水路を基本水路ということにする。従って多数の交差、分岐のある複雑な水路網であっても、やはりこれを航行する船舶の分類で得られた多数の基本水路が互いに重り合って構成されているとして取り扱われる。そこでこの基本水路の形状を示す両側境界線（兩岸）の曲線は実

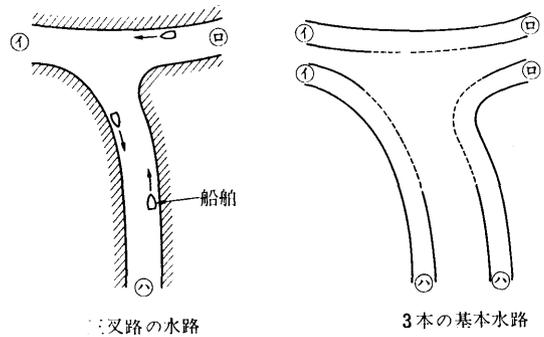


図1 水路網の分解

際の水路の屈曲や船舶の航行に寄与する有効水路幅など幾何形状による特徴で折れ線近似する。このようにして水路網のモデル化を行なう。

### 船舶モデル

ここで用いる船舶は総トン数の異なる数種類のものを取り扱われ、その船の形状は船の長さ（垂線間長）を長径とし、その幅を短径とする楕円形で近似する。そして、これらの各種船舶の長さ、幅の係数とこの船の最適速度（満載速度）、旋回径、停止距離など性能に關係する量は藤井らによって多数のデータが集計されているのでこの結果<sup>9)</sup>を用いることにする。それは船の諸係数並びに諸性能に關する量（ $Q$ ）がその船の長さ（ $L_{pp}$ ）を変数として、

$$\log Q = A \log L_{pp} + B \dots \dots \dots (1)$$

$A, B$ , 定数

なる式で表示されている。

これを用いて総トン数の異なる各種船舶の形状および諸性能を規準化し、各種船舶のモデルが設定される。

## 3. シミュレーションの方法と船舶交通状態の評価方法

このシミュレーションの方法は、すでに述べたように水路の形状、船舶の種類、交通量を入力条件として与え、船舶の運動性能および航法などの拘束条件のもとにこの水路網を多数の船舶が互いに他の船舶や障害物、陸岸などを回避運行し能率よく各船がそれぞれの目的地に達すべく、これらの船舶の速度および位置を時々刻々計算して行くものである。この計算順序は図-2のフローチャートに示した通りであり。以下この計算手順について述べる。

まずはじめに計算機にこのシミュレーションの制御用の定数をセットさせた後、水路網のデータおよび船

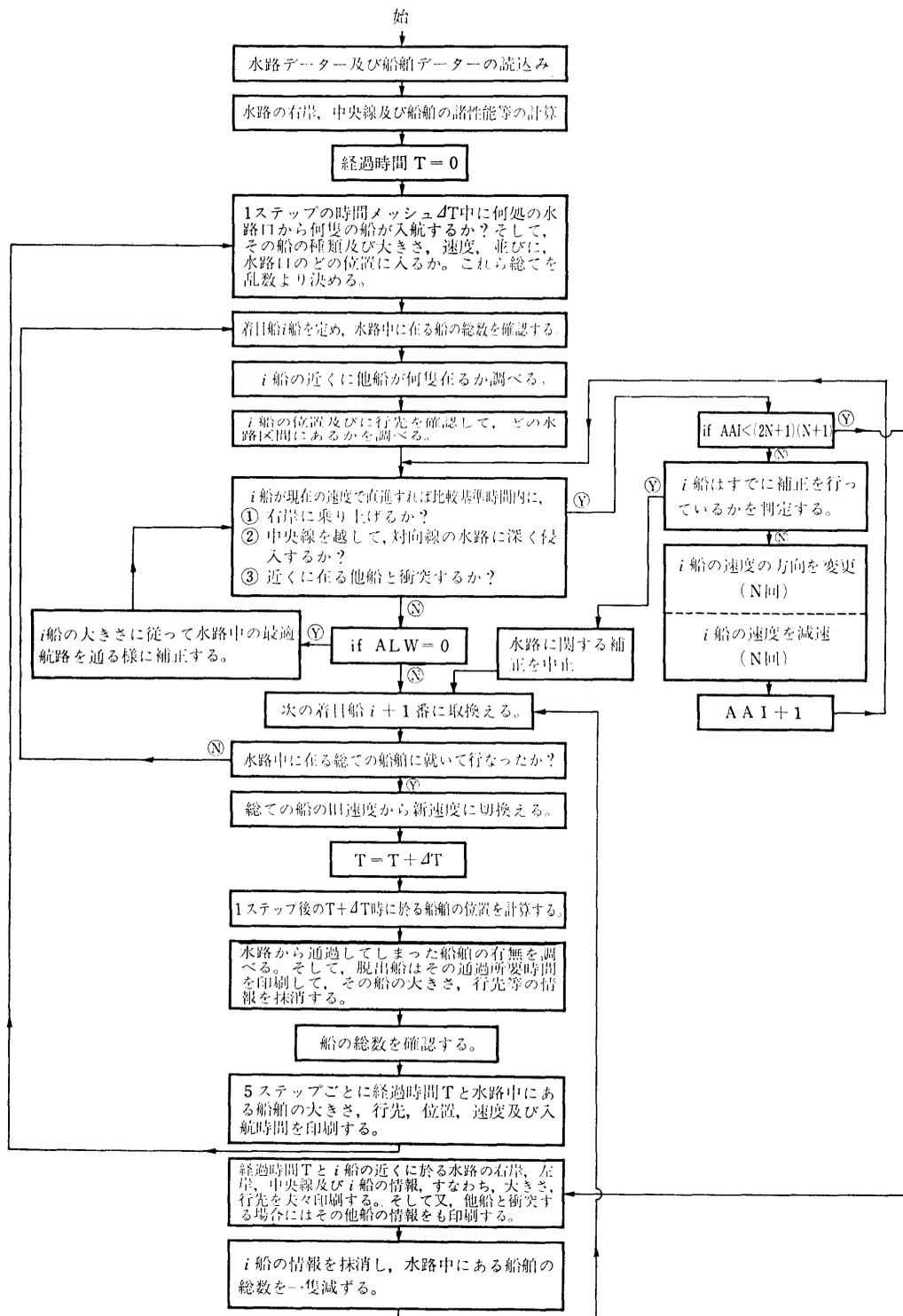


図 2 シミュレーションのフローチャート

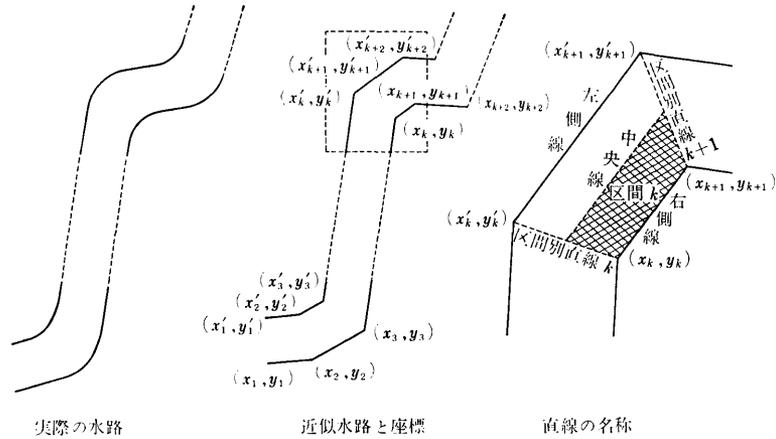


図 3 水路の表示モデル化

船に関するデータを次のような計算処理で行なう。

**水路データ処理**

図-3 で示したごとく屈曲を有する水路網の基本水路の両岸、または水路の両側の境界線は折れ線近似で表現するものとし、水路の右岸および左岸の変曲点における座標を  $(x_k, y_k), (x'_k, y'_k), k=1, \dots, n_{IJ}$  とたま  $n_{IJ}$  を変曲点の数と、さらに、 $I, J$  を水路網の入口、出口の番号とした場合、これらの水路網のデータより、 $I$  と  $J$  間の基本水路の右岸または右側境界線(以下単に右側線という)および中央線を定める近似折れ線式はそれぞれ、

$$\begin{aligned}
 &(y_{k+1}-y_k)x - (x_{k+1}-x_k)y \\
 &\quad + (y_k x_{k+1} - y_{k+1} x_k) = 0 \quad \dots\dots\dots (2) \\
 &\{\omega(y_k - y_{k+1}) + (1-\omega)(y'_k - y'_{k+1})\}x \\
 &- \{\omega(x_k - x_{k+1}) + (1-\omega)(x'_k - x'_{k+1})\}y \\
 &+ \{\omega y_{k+1} + (1-\omega)y'_k\}(\omega x_k + (1-\omega)x'_k) \\
 &- \{\omega y_k + (1-\omega)y'_k\}(\omega x_{k+1} + (1-\omega)x'_{k+1}) = 0 \\
 &\quad \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

$$k=1, \dots, n_{IJ}-1$$

として得られる。そして(3)式の  $\omega$  は水路の利用度を示すパラメータであって、水路の左半分すなわち対向船の船路へ絶対に入ることのできない場合には 0.5 の値を採り、また、一方交通などで水路の左半分をも船の航行が可能である時には零の値を採るものである。

さらにシミュレーションの結果の整理などに利用するため、基本水路の右側線と中央線を結ぶ区間別の直線式をも求めて置く。

すなわち、

$$\begin{aligned}
 &\{\omega y_l + (1-\omega)y'_l - y_l\}x \\
 &- \{\omega x_l + (1-\omega)x'_l - x_l\}y \\
 &+ \{\{\omega x_l + (1-\omega)x'_l\}y_l - (\omega y_l + (1-\omega)y'_l)x_l\} = 0 \\
 &\quad \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

$$l=1, \dots, n_{IJ}$$

ここで区間別の式(4)の  $l=k, l=k+1$ 、と水路の右側線の(2)式および中央線の(3)式との4本の直線式で囲まれた領域を以下  $IJ$  基本水路の区間  $k$  と呼ぶことにする。

したがって水路網のデータ処理はこの水路網中の各基本水路における3種類の(2),(3),(4)式の各係数を計算することになる。

**船舶データの処理**

本項で用いる各種船舶は総トン数が前提事項により与えられているから、それともなって(1)式より各種船舶の長さや幅および最適速度  $V_0$ 、旋回径  $\rho$ 、停止距離  $S$  などの諸性能が求められ、これらの量からさらにこの各種の船舶が他船や障害物など回避したり、あるいは減速(増速)する場合の単位時間(時間メッシュ)当りの最大回頭角(速度ベクトルの回転角の範囲)と最大減速率並びに最大増速率をも、あわせて得ることにする。

そこで今回これらを簡単化してシミュレーションの計算時間を短くするため、次の仮定を置いた。

- ① 船が進路方向も変えはじめたならば、すみやかに(1)式で与えられた旋回径で等円軌道に入る。
- ② 船の速度の増減は時間経過にともない指数的に変わる。すなわち  $t$  秒後の速度  $|V'|$ 、現在の速度  $|V|$  とし、その船の最適速度を  $V_0$  とすれば、

(増速)  $|V'| = |V| + (V_0 - |V|)(1 - e^{-\delta t}) \dots (5)$

(減速)  $|V'| = |V|e^{-\delta t} \dots (5')$

$$\delta = \frac{V_0}{S} \quad \therefore S = \int_0^\infty V_0 e^{-\delta t} dt \dots (5'')$$

とする。

したがって、この仮定①から船舶が単位時間（時間メッシュ  $\Delta T$ ）内の最大回頭角  $\varphi_{\max}$  は

$$\varphi_{\max} = \tan^{-1} \left[ \frac{\int_0^{\Delta T} |V| \sin \frac{V_0}{\rho} t dt}{\int_0^{\Delta T} |V| \cos \frac{V_0}{\rho} t dt} \right] = \frac{V_0}{2\rho} \cdot \Delta T \quad (6)$$

となる。

また、この仮定の②から最大増速率  $\beta_{\max}$  と最大減速率  $\alpha_{\max}$  はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\max} &= \frac{|V'| - |V|}{|V|} = \frac{x}{1-x} (1 - e^{-\delta \Delta T}) \\ x &= \frac{V_0 - |V|}{V_0} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{|V| - |V'|}{|V|} = (1 - e^{-\delta \Delta T}) \dots (7')$$

となる。もちろんここで得られた  $\varphi_{\max}, \alpha_{\max}, \beta_{\max}$  の値はいずれも船舶の大きさに関係するものである。ここまでがこのシミュレーションの準備計算段階であって、次はこの水路網の各入口より船舶を入航させる段階である。

**入航船の発生**

まず、このシミュレーション上各船舶に属する必要事項を列記することにしよう。すなわち、

- ① 水路網を航行する船の一連番号
- ② その船の大きさ（総トン数）
- ③ この船がこの水路網のどの入口より入航したかを示す入口番号
- ④ ③と同様に出航口を示す出口番号
- ⑤ この船がこの水路網に入った時刻
- ⑥ この船の現在速度（ $x$  方向成分と  $y$  方向成分）
- ⑦ この船の現在位置（ $x$  方向成分と  $y$  方向成分）
- ⑧ その船が属する基本水路の区間番号
- ⑨ この船が、この水路網を通過に要した所要時間

これらの事項を以下船舶の固有情報と言うことにする。なお、このうちの⑧、⑨項は、シミュレーション結果の整理上の項目である。

話をもどして、水路網の各入口より船舶を入れる場合はこれらの船の情報項目を定めることになる。すなわち、②～④項目はシミュレーションの前提となる交通量パターンによって、また⑥項の船の速度ベクトル

の大きさは②項に従ったその船の最適速度の値でかつその方向はその水路口の基本水路の方向と一致させたもので、さらに⑦項の船の位置はその水路口の右半分（ $l=1$ ）上の1点を選ぶことで定まる。そこでこの5項目の船の情報により1隻当りの入航船に関する1枚の入力カードを作成する。このようにして得た入航船のカードをシミュレーションの時間ステップ毎（時間メッシュ  $\Delta T$  内）に計算機へ読込んで、各水路口に船舶を発生させる。また、これらの5項目以外の情報すなわち①、⑤、⑧項目は入航船カードを読込んだ時点で水路網中にある船に対する一連番号とこの入航時刻および区間番号1を与え、この入航船の固有情報を完成する。しかしこのステップで読込む入航船カードの枚数は各水路口へ入航する船の交通量が前提条件として与えられた標準交通量の範囲で変動するためステップごとに変える必要がある。そこでこのカードの読込み枚数の決定方式について述べることにする。

水路口における標準交通量とは単位時間  $T_s$  にその水路口へ入航する船の隻数であってその上限量 ( $\bar{q}_i$ ) と下限量 ( $\underline{q}_i$ ) と与えたものである。このためその水路口の地点で十分大きい  $T_s$  のサンプリング時間を選んだ場合入航船の平均的な交通量は、その標準交通量の上限量と下限量との平均値にほぼ近いと考えられる。

したがって単位時間  $T_s$  にこの水路網へ入航する船舶の総隻数  $G$  はおよそ

$$G \doteq \frac{1}{2} \sum_i (\bar{q}_i + \underline{q}_i) \dots (8)$$

となり、( $i$  は水路口の番号である) また時間  $T_s$  はシミュレーションの時間メッシュ  $\Delta T$  とした場合  $T_s/\Delta T$  ( $\equiv M \gg 1$ ) のステップ数に相当する。

故に本項のシミュレーションの一つのステップにおいて、水路網へ入航しようとする船舶の出現確率はこの  $M$  個のステップに  $G$  隻の船を分配したとき一つのステップに  $H$  隻割当られる確率  $q_H$  で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} q_H &= \left( \frac{G-H+1}{M+G-H-1} \right) q_{H-1}, \quad H=1, 2, \dots, G \\ q_0 &= \frac{M-1}{M+G-1}, \quad H=0 \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

そこでこのステップにおける入航船カードの読込み枚数  $H$  はステップごとに乗積合同法で計算した一様乱数 ( $F$ ) ( $0 \leq F < 1, 8$ 桁) を得て

$$\sum_{H=0}^H q_H \leq F < \sum_{H=0}^{H+1} q_H \dots (10)$$

なる式を満たす  $H$  を見出して決定する。

以上の操作で水路網の各入口へ船舶を入航させ得たので次はこの入航船と現在水路網中にある船とがこの水路網を航行する運行上の取り扱いについて説明する。

**船舶の運行上の判定**

本項のシミュレーション上で船舶を動かす方法は水路網を航行する各船舶の運行状態から微小時間（時間メッシュ  $\Delta T$  内）に、これらの船舶が取り得る速度を定め、これから船舶の  $\Delta T$  時間中に船の移動距離を計算し、さらに、この操作を繰返えすことにより船舶の位置を漸次求めて行く方式とする。

ここで今回船舶の運行上考慮すべき点として次の事項をあげておく。

- ① 船舶は水路の右側（右岸）に乗揚げるか？
- ② 船舶は水路の中央部を越して対向船の航路に深く侵入するか？
- ③ 船舶は他の航行中の船あるいは水路中の障害物に衝突するか？

したがって各船舶の運行状態の判別は水路網を航行する各船舶が、それぞれ現在の進向速度で移動した場合、近い将来のある時間（ $T_{max}$ ）内に、これらの3点の現象が起こるかで定める。このテストラン中のある時間  $T_{max}$  はシミュレーション手法を行なう場合の精度に関係し、時間メッシュに比較して大きいほど望ましいがテストランの判定による拘束が厳しくなるため、シミュレーションに要する計算時間が長くなるので、一応船舶の閉塞領域<sup>9)</sup>をその船が横切るのに要する時間の数倍を選ことにする。

このテストランにおける判別計算の原理は着目している船と必ずしも1隻とはかぎらない他船、障害物、あるいは基本水路の右側線または、中央線などとの最短距離を時間の変数としてそれぞれの相対位置ベクトル  $D_n(t)$  とこれらのものとの相対速度  $\Delta V_n$  を求める。なおこれらの数を  $NN$  とする。そして

$$\frac{\partial |D_n|}{\partial t} = 0, \quad n=1, \dots, NN \dots \dots \dots (11)$$

によりこの船がこれらのものと最も近づく時間  $T_{on}$  を計算し、この  $T_{on}$  と  $T_{max}$  とを比較する。

すなわち

$$\left. \begin{array}{l} T_{on} < 0 \\ 0 \leq T_{on} \leq T_{max} \\ T_{on} > T_{max} \end{array} \right\} \text{ならば} \quad \left. \begin{array}{l} TT=0 \\ TT=T_{on} \\ TT=T_{max} \end{array} \right\}$$

と置き

$$|D_n(TT)| > a + \xi \left( \Delta V \cdot \frac{D_n(TT)}{|D_n(TT)|} \right) \cdot \Delta T \quad (12)$$

$n=1, \dots, NN$

なる判別式で (12) 式が成立しない場合に運行上の事項で、支障があると判定した。この (12) 式中の  $a$  は船舶の形状を楕円で近似したための誤差とこの着目船と他のものとの間の流体力学上の相互作用による領域などを考慮した安全係数である。または船の運動性能上の関係で急激な速度の変更が行なえないゆえの補正係数である。すなわち1船が航行中その進路方向を巨大船が横切るとき、その巨大船の近くにあるこの船はその速度を最大に変えても運動性能上衝突を回避することが不可能となる。

したがってこの船は他の船が遠距離にいるときに判定をしなければならないことなどを考慮したものである。

さて、このテストランを水路網中のすべての船で行なった結果、運行上の支障のある船は速度の微小変更を行なう、すなわちこの船の現在の進路方向をわずかに変更したり、あるいは速度の大きさ（速力）を少し減じたりして、運行上の①, ②, ③の可能性がなくなるようにする。また、これと逆にこれらの運行上の支障のない船舶は航法などにより各船の大きさにしたがって水路上の最適航路、すなわち大きな船は水路の中央部付近を小さな船は水路の側端の航路を航行するため、この船の現在位置を考慮し進路方向をわずかに変更するものとする。そしてさらにその船の速度が減速などでその船の本来の最適速度より下回わる場合にはこの最適速度の値へ現在の速度をわずかに増速すると共に、再度運行上の①, ②, ③について判定を行ない、この内の一つでもこの現象が現われたときはこれらの補正操作を中止して、現在の速度に戻す。以上これらの運行判定によりこの時間ステップにおける水路網中の各船舶の速度が決定されたことになる。そこで上で述べた船の速度変更操作について説明する。

**速度変更操作の取り扱い**

この変更操作には、船の速度ベクトルの方向、すなわち進路方向を変える操作（イ）と、この速度ベクトルの大きさ、すなわち速さを減速または増速する操作

注 1. この第2項は  $T_{max}$  が十分  $T_{max} \gg \Delta T$  ならば不用となるがこの計算時間を短縮するため前述のごとく  $T_{max}$  の値を設定していることによりほぼ  $T_{max} \approx (5 \sim 10) \Delta T$  となっていることの補正項である。

(ロ)の2種類が考えられ、このシミュレーション中でこの操作を行なう場合の優先順位は原則として(イ)、(ロ)の順序とする。

一般に、船が速度を変える場合、この船の諸性能で定まる最大回頭角  $\varphi_{max}$ 、最大減速率  $\alpha_{max}$  および最大増速率  $\beta_{max}$  を下回る値で、しかもこの操作による速度変化は可能のかぎり小さな値で行なうことが運行上望ましい。したがって、これらの回頭角、増速率、減速率の値についてレベルを設定し、規準化を行ない、この操作におけるこれらのレベルについても優先順位を定める必要がある。

そこで回頭角 ( $\varphi_l$ ) の規準化は最大回頭角 ( $\varphi_{max}$ ) を整数  $N$  で分割し、

$$\varphi_l = \pm \frac{l}{N} \varphi_{max} \quad l=0, 1, \dots, N \dots\dots(12)$$

と置き、 $l=0$  は直進をまた  $\varphi_l > 0$  は船の左旋回をさらに  $\varphi_l < 0$  は右旋回をそれぞれ表わす。

そしてこの旋回レベルの優先順位は、 $l=1, \dots, N$  で左右旋回順位は運行上影響のある対象船、あるいは障害物、ならびに水路の中央線、右側線のこれらのうちで、この船に最も影響<sup>注2</sup>を与えるもので決定し、これがこの船の進路方向の右側にある場合には、はじめに左旋回に対する操作を次に右旋回のもの順で行なう

注 2. (11) 式で得られる  $T_{on}$  の大小関係で最小  $T_{on}$  を取るものがこの船に最も影響を与えると考えられる。

ことになる。したがってこれが逆の左側にあるときにはこの反対の順位となる。しかし、この左右の総方向の各旋回レベルで船を旋回させても運行上の支障がある場合にはじめてこの船の速度の減速を採り上げることになる。

そこでこの船の速度を増速させる増速率 ( $\beta_l$ ) のレベルは回頭角と場合と同様にして

$$\beta_l' = \frac{l'}{N} \beta_{max} \quad l'=1, \dots, N \dots\dots(14)$$

とし、また減速率の各レベル  $\alpha_l''$  も次のように書くことができる。

$$\alpha_l'' = \frac{l''}{N} \alpha_{max} \quad l''=1, 2, \dots, N \dots\dots(15)$$

そこで、これらをまとめて、船の速度変更操作を演算形式として表示すれば

$$\begin{pmatrix} Vx' \\ Vy' \end{pmatrix} = \epsilon \begin{pmatrix} \cos \varphi_l & \sin \varphi_l \\ -\sin \varphi_l & \cos \varphi_l \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Vx \\ Vy \end{pmatrix} \dots\dots(16)$$

となり、 $Vx, Vy$  は船の現在速度の各成分であり、 $Vx', Vy'$  は速度変更後のものである。また増速操作の場合には  $\epsilon=1+\beta_l' \quad l'=1, \dots, N$  で減速の時は  $\epsilon=1-\alpha_l'' \quad l''=1, \dots, N$  とさらに回頭のみの場合には  $\epsilon=1$  と置くしたがって減速、あるいは増速を含む速度変更の演算子の数はそれぞれ  $(2N+1) \cdot (N+1)$  個となる。

そこで、この減速と旋回操作の  $(2N+1) \cdot (N+1)$  回によっても前述の運行上の①, ②, ③における現象を脱しきれない船舶は、この水路網を航行不能と判定して別途処理を行ない、この船に関する船の情報を出力で

		NAVIGATIONAL TRAFFIC PHENOMENA							TOKYO DATIICHI KURO					
T	NO.	D	U	W	X	Y	VX	VY	CHECK V	CHECK D	T(START)	POSIT	TD-TU	OS
2H 31M 40S	153	1	3	1	1101.9	4582.0	-1.393	3.728	1.000	0.999	2H 10M 40S		OH 21M OS	
	177	2	1	5	3905.7	424.3	6.240	-4.369	0.997	0.999	2H 23M 30S		OH 8M 10S	
2H 31M 40S	155	1	3	2	1103.5	4485.0	-1.293	4.664	1.000	0.999	2H 14M 40S	AC7		
	157	1	3	2	1142.3	4285.6	-1.293	4.664	1.000	0.999	2H 14M 40S	AC7		
	158	1	3	2	1130.5	4384.7	-1.293	4.664	1.000	0.994	2H 15M 0S	AC7		
	159	1	3	2	1163.5	4245.3	-1.694	4.534	1.000	0.995	2H 15M 30S	AC7		
	161	1	3	2	1303.0	3991.8	-2.810	3.941	1.000	0.997	2H 16M 30S	AC6		
	164	1	3	1	1968.5	2953.8	-1.456	2.469	0.720	1.000	2H 17M 30S	AC5		
	165	1	3	2	1613.6	3504.6	-2.456	4.171	1.000	1.000	2H 18M 30S	AC5		
	166	1	3	1	1982.8	2944.1	-2.019	3.430	1.000	1.000	2H 18M 30S	AC5		
	168	1	3	2	1951.1	2927.9	-1.729	2.936	0.704	1.000	2H 20M 0S	AC5		
	169	1	3	2	1896.6	2798.3	-2.810	3.941	1.000	0.997	2H 20M 30S	AC5		
	170	1	3	2	1988.0	2884.6	-2.456	4.171	1.000	1.000	2H 21M 0S	AC5		
	171	1	3	3	1947.6	2866.3	-2.598	4.412	1.000	1.000	2H 21M 30S	AC5		
	172	1	3	1	2417.6	2233.0	-2.019	3.430	1.000	1.000	2H 22M 0S	AC4		
	173	1	5	3	3453.8	2786.1	3.170	3.844	0.973	0.990	2H 23M 0S	AE5		
	174	3	1	2	2075.2	2304.3	2.348	-4.232	1.000	0.999	2H 23M 0S	AC4		
	175	1	2	3	2108.0	2350.7	-1.672	2.345	0.562	0.965	2H 23M 0S	AB4		
	176	1	3	2	2445.7	2131.3	-2.425	4.119	0.944	1.000	2H 23M 0S	AC4		
	178	1	3	2	2301.5	2259.8	-2.456	4.171	1.000	1.000	2H 23M 30S	AC4		
	179	1	3	1	2593.4	1924.4	-2.019	3.430	1.000	1.000	2H 23M 30S	AC4		
	180	1	3	2	2423.4	2111.3	-2.456	4.171	1.000	1.000	2H 24M 0S	AC4		
	181	1	5	3	3378.9	2241.9	2.663	3.873	0.918	0.999	2H 24M 0S	AE5		
	182	1	3	1	2660.0	1821.5	-2.019	3.430	1.000	1.000	2H 24M 0S	AC3		
	183	1	3	2	2697.3	1764.4	-2.456	4.171	1.000	1.000	2H 25M 30S	AC3		
	184	1	3	2	2731.0	1639.3	-2.083	4.369	1.000	0.995	2H 26M 0S	AC3		
	185	1	3	3	2670.5	1691.4	-2.203	4.622	1.000	0.995	2H 26M 0S	AC3		
	186	1	3	2	2808.0	1516.8	-3.143	3.681	1.000	0.986	2H 26M 30S	AC3		
	187	1	3	2	2408.5	1412.1	-3.451	3.393	1.000	0.999	2H 27M 0S	AC2		
	188	1	5	5	3080.2	1311.2	-0.748	4.036	0.537	1.000	2H 28M 0S	AE3		
	189	1	3	2	3227.9	1116.0	-3.734	3.079	1.000	0.999	2H 28M 30S	AC2		
	191	1	3	2	3461.8	944.9	-4.212	2.384	1.000	0.994	2H 29M 30S	AG1		
	192	4	1	5	2017.8	2454.3	2.360	-7.266	1.000	0.975	2H 29M 30S	AG4		
	193	1	5	3	3413.3	938.0	-4.456	2.522	1.000	0.993	2H 29M 30S	AE1		
	194	1	3	2	3576.1	856.1	-3.734	3.079	1.000	0.998	2H 30M 0S	AG1		
	195	1	3	2	3687.6	763.9	-3.988	2.742	1.000	1.000	2H 30M 30S	AG1		
	196	2	1	2	1905.2	2286.8	3.638	-1.324	0.800	0.998	2H 30M 30S	AB5		

図 4 出力例

印字する。

次はこのシミュレーションの出力関係について述べることにする。

**出力関係**

まずこれまでの操作によって水路網中の各船の速度は得られ、これを用いて運行上の判定で使用したある時間 ( $T_{max}$ ) よりも短い微小時間すなわち1ステップ時間中に、これらの船が進む距離を求め、それぞれの船の位置を計算する。そしてこれらの船のうちで水路網より脱出するかを調べ、このような船がある場合にはこの船が水路網を通過に要した所要時間とその船の情報とを出力として随時印字するとともに、計算機記憶装置のデータから、この船に関する情報を抹消する。ここまでで本シミュレーションの1ステップに関する操作は総べて終了で、以下、これらの操作を繰返えし行なうとともに水路網を航行する船舶の交通状態を把握するための出力として、これらの船舶の位置、速度やこの船が水路網に入ったときの時刻などの船に関する情報とこの水路網における船舶の交通状態の評価量とを経過時間ごとに印字する。

この評価量としては航行中の船の速度をその船の最適速度で割った値すなわち速度の減速比と航行中の船の速度のうちで水路方向の成分をそのときの速度の大ききで割って水路方向に対する変角比を選ぶことにする。この評価量の定義から水路を航行する船舶が著しく幅転すれば、減速比は零に近づき、また変角比は1から零までのいろいろな値をとると考えられる。そこでこの2つの評価量と、前述の水路通過所要時間とで船舶の交通状態を示す今回の基本的な指標とした。

なお、この出力例としては東京港の第一航路を行なったものの一部を図-4に示す。そして図中の記号は次の通りである。

- T : 経過時間
- NO.: 船の一連番号
- O : この船が水路網に入る水路口番号
- D : この船が水路網から出る水路口番号
- W : 船の大きさを示す番号でこの1, 2, 3, 4, 5はそれぞれ総トン数 50, 300, 2000, 8000, 20000の各船を示す。
- X, Y : 船の位置座標 (m)
- VX, VY : 船の速度の各成分 (m/sec)
- CHECK V : 減速比
- CHECK D : 変角比
- T (START) : この船が水路網に入った時の時刻

- POSIT : 基本水路の区間番号の符号
- TD-TO : この船の水路網における通過所要時間

**4. 適用例**

ここで開発されたシミュレーションの適用例は現在羽田沖を航行して東京湾に出入する船舶のうち、小型

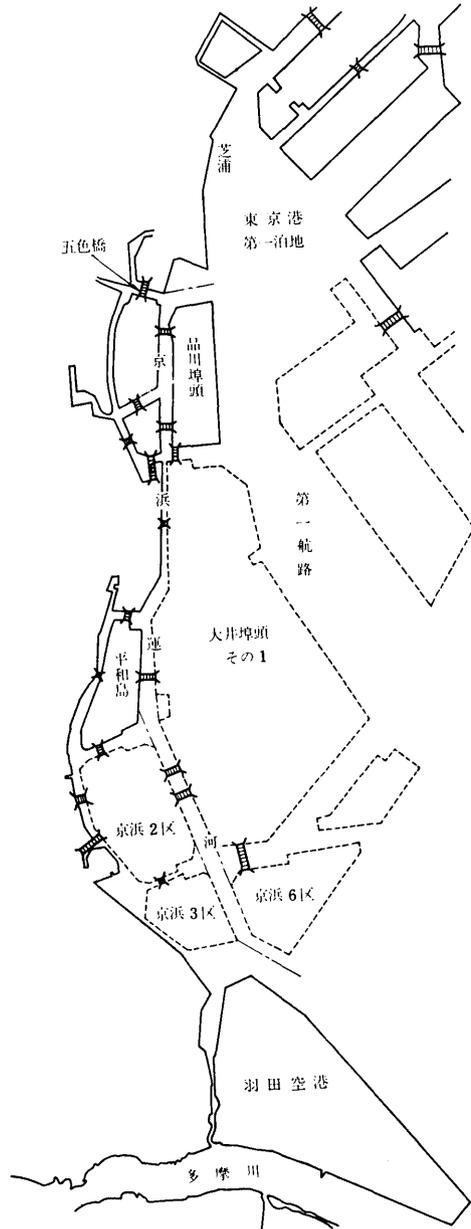


図5 東京港の京浜運河の位置

表 1 船舶の大きさ

船の長さ	10 m	20 m	30 m
船の幅	1.6m	3.2m	4.8m
総トン数	8 t	50 t	150 t
最適速度	3.0m/s	3.6m/s	4.0m/s

表 2 各水路口における入航船の交通量

出入口の場所	標準交通量
羽田沖	10隻/15分~15隻/15分
第一泊地	15隻/15分~30隻/15分
五色橋	5隻/15分~10隻/15分

船を東京港の港湾計画にもとづく京浜運河図-5に迂回させた交通状態を推定調査する目的で行なったものである。

この水路網の総延長は約 9 km で幅は 25~100 m であり、またこの水路網は短水路の中間部で長水路と T 字形に交差する構造である。そして短水路は現在頻繁に小型船が就航している五色橋、第一泊地間であり、長水路は計画中的のもので大井埠頭および品川埠頭と既成市街地(平和島、昭和島を含む)とに挟まれた水路で、この水路には五個所の屈曲部と橋梁による狭隘部があって羽田沖に通じている。

対象船としては表-1 の 3 種類の大きさの異なる小型船が雑ってこの水路網の三つの出入口より相互に独立な交通量で入航する。そしてこの水路は港湾計画中的のものであるからこの水路と類似し、現在中、小の船舶が頻繁に航行している川崎港の京浜運河のラッシュ時の交通量<sup>2)</sup>より水路幅、船の大きさの補正<sup>2)</sup>を行なって表-2 のような各水路口の交通量(標準交通量)を設定し、この値で、時間的に変化するものとした。

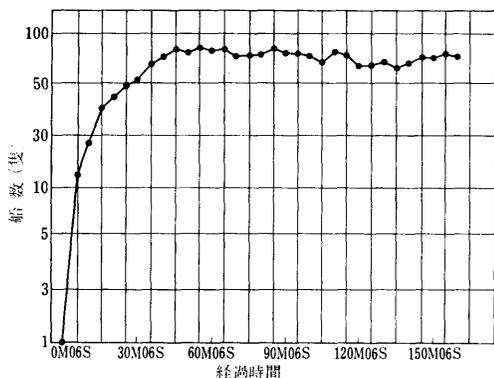


図 6 水路における船舶交通流の定常過程

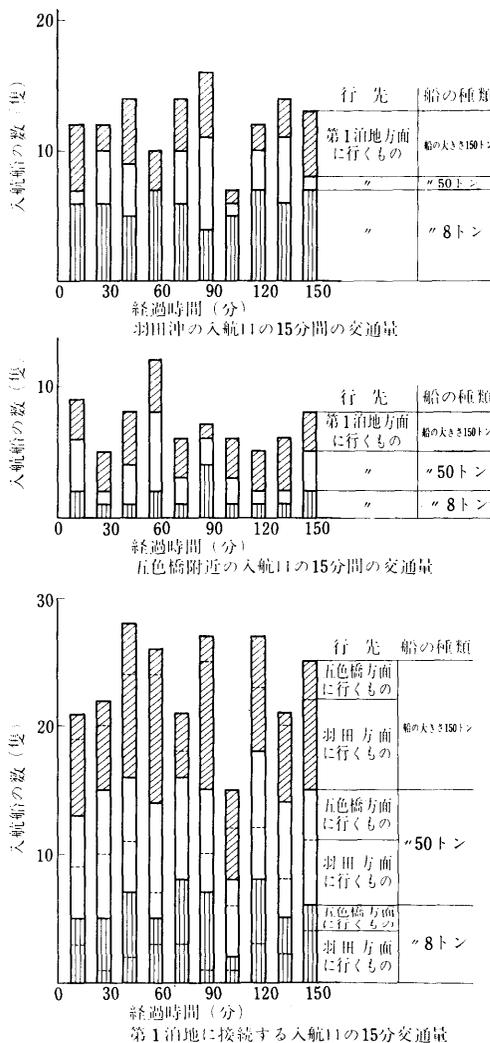
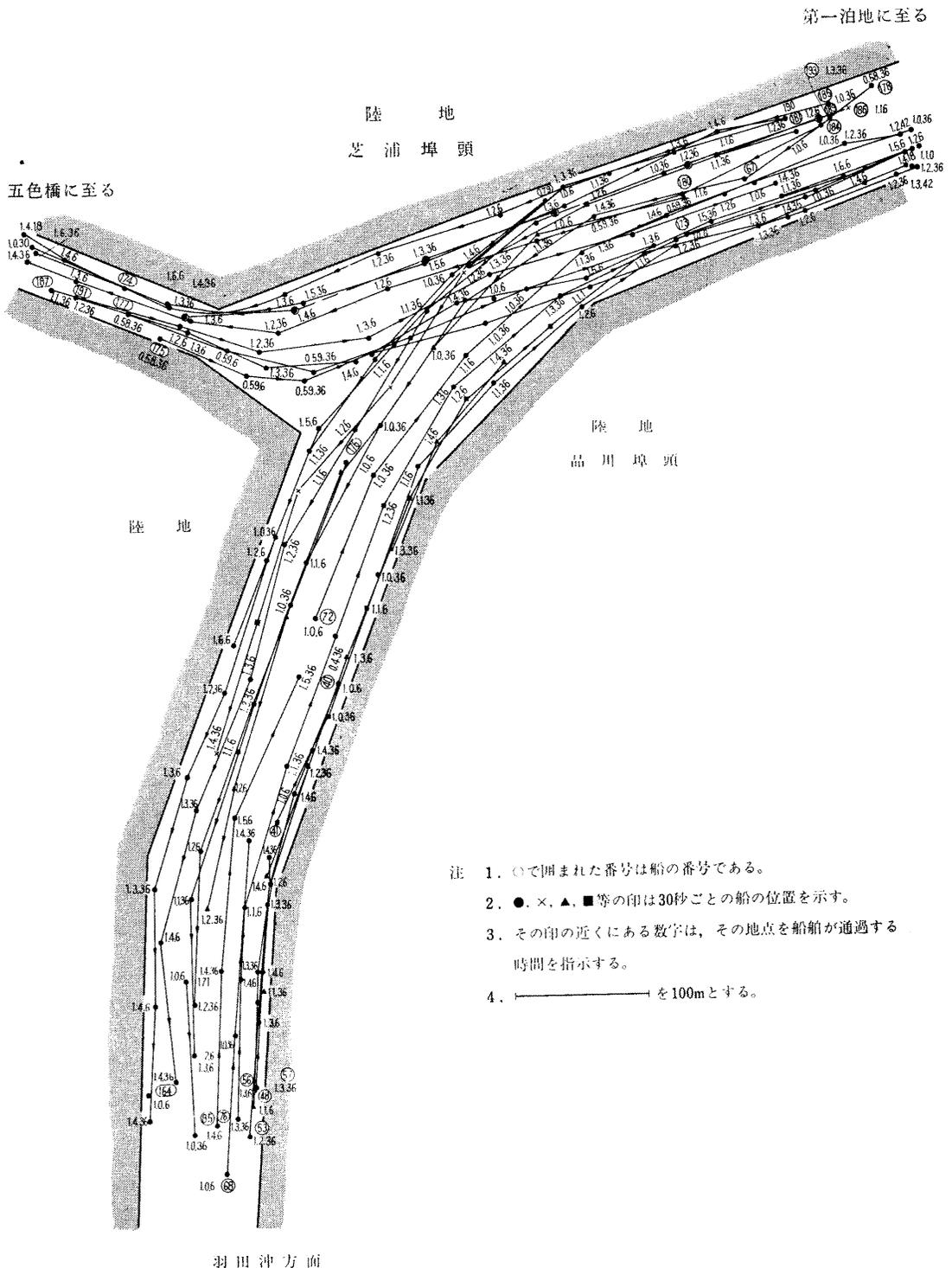


図 7 各出入口における入航船の交通量分布

以上の前提条件のもとにシミュレーションを行ないこの水路網の全く船の無い状態から実時間で約 2 時間 45 分までの船舶の交通状態を表示することができた。この結果によれば京浜運河は表-1 のような小型船が各出入口より毎分 1~1.5 隻の割合で入航する交通量を収容できることが示された。

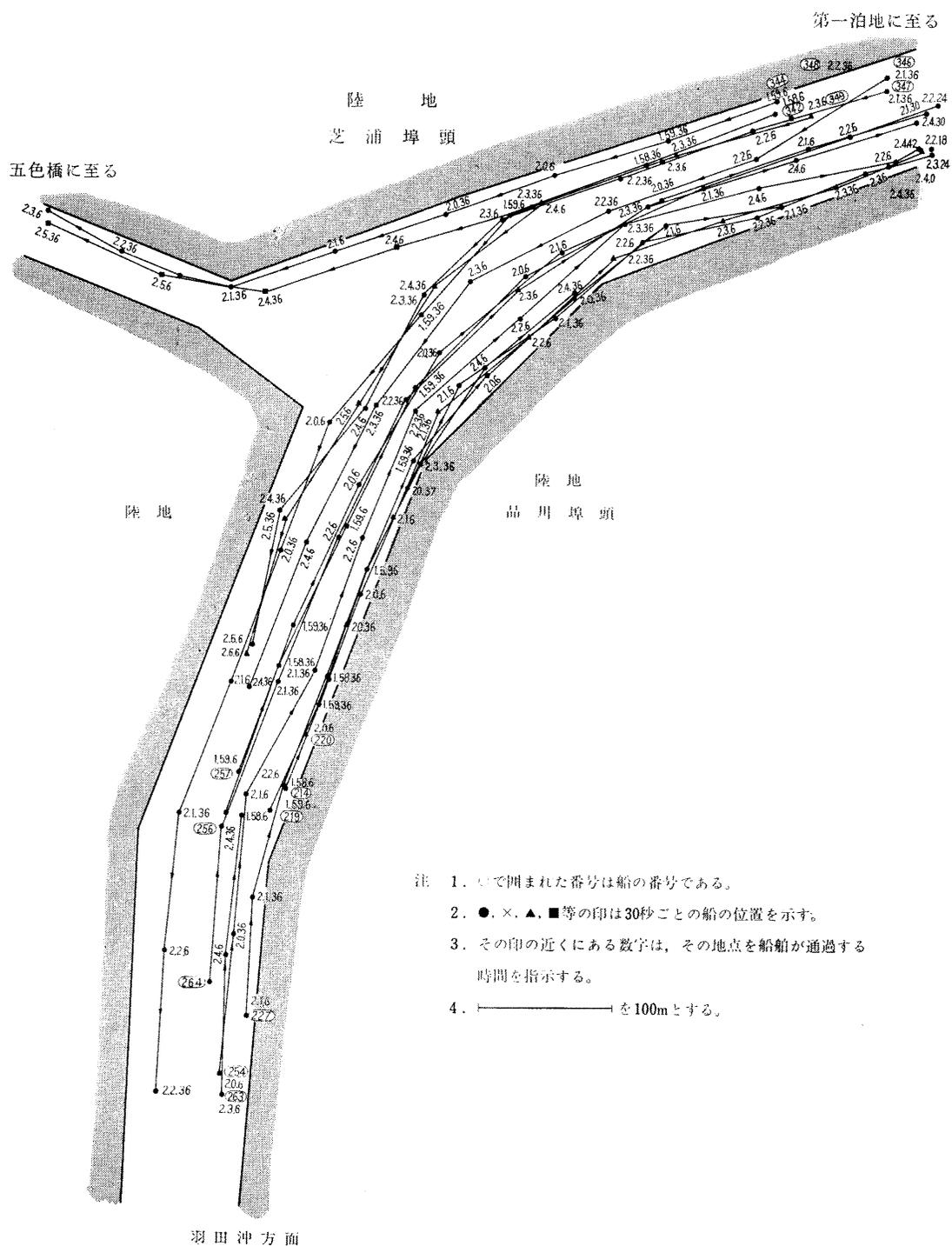
このシミュレーションで水路に入航した船舶数は 472 隻であり、出航したものは 401 隻であった。

以下このシミュレーションで得た具体例を示す。すなわち図-6 は縦軸には水路網中の船の隻数を横軸には経過時間(実時間)をとって、この水路網に船が全くない状態から各水路口より船舶を入航させて船舶交



- 注 1. ○で囲まれた番号は船の番号である。  
 2. ●, ×, ▲, ■等の印は30秒ごとの船の位置を示す。  
 3. その印の近くにある数字は、その地点を船舶が通過する時間を指示する。  
 4. ————— を100mとする。

図 8 交差点における船舶の航跡図 (1時0分6秒から約5分間)



- 注 1. 〇で囲まれた番号は船の番号である。  
 2. ●, ×, ▲, ■等の印は30秒ごとの船の位置を示す。  
 3. その印の近くにある数字は、その地点を船舶が通過する時間を指示する。  
 4.  を100mとする。

図 9 交差点における船舶の航跡図 (2時0分6秒から約5分間)

潮流が定常状態に成るまでの時間を求めたものでありそれによると実時間で約36分であった。

図-7は各水路の入航船の15分間交通量でこの交通量は前提の標準交通量と計算機で発生させ乱数より時間的に変動する分布をもたせたものである。

図-8, 図-9はこの京浜運河で船舶が最も輻輳していると考えられる交差点の船舶の航跡図であって、これはシミュレーション開始時から実時間で約1時間後と2時間後とのほぼ5分間の船舶の動きより、30秒ごとの船の位置より求めたものである。また図-10, 11は船舶がこの京浜運河で通過に要する時間を横軸に取り縦軸にはその通過時間を持つ船の隻数を与え、スペクトル図とし、船の大きさ別、コース別に分類して画かれている。また矢印はこの船がコース別の基本水路を航行に要する最小時間を別途に計算して与えたものである。したがって、このシミュレーションで得た最小の通過所要時間の値と矢印で示した値との差がいわゆる水路が屈曲したり、水路幅が変化することなどによるものであり、また通過所要時間のスペクトルの

分布の広がり、船舶相互あるいは障害物など回避するために要した時間差の影響と考えられる。しかしこれらに対する詳細の検討は今後に待たれるところである。

次にこの水路網の交差点以外の水路や経過時間にもなう船舶交通状態の取り扱いは、この京浜運河を図-12のように区分し、経過時間の15分ごとに作表し本報告の最後に表-3で掲載した。そして表中の“上り”、“下り”は船舶が第一泊地に向かって航行する場合を“上り”とする。

そこで、この京浜運河の船舶交通状態を示す表-3の評価量すなわち速度に関する減速比ならびに水路方向に対する変角比はほぼ1に近く、経過時間にとまってあまり変化せず、またこの水路上の各地点の値も特に変動はない点や、船舶が最も輻輳すると思われる交差点の航跡図でも異常航跡をとる船舶は見出されない点などを考慮すればこの京浜運河は表-1の小型船が表-2の交通量でこの水路へ入航し得ることが知れよう。

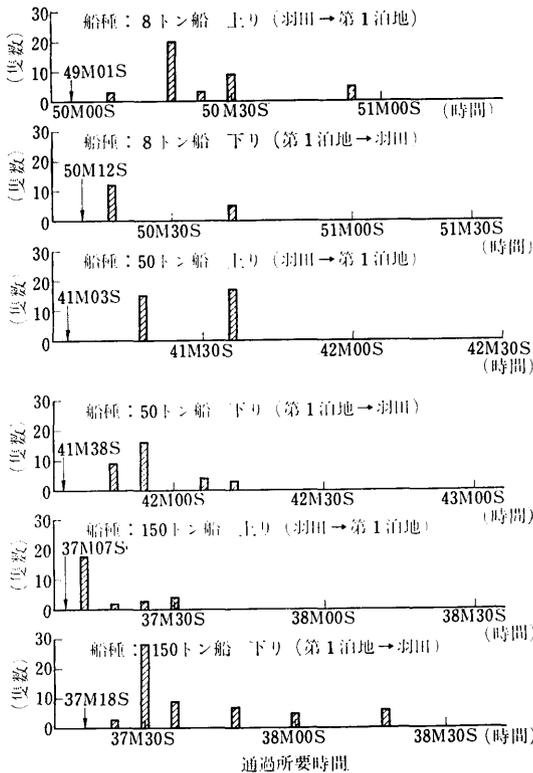


図10 船舶のI水路(羽田↔第一泊地)における通過所要時間のスペクトラム

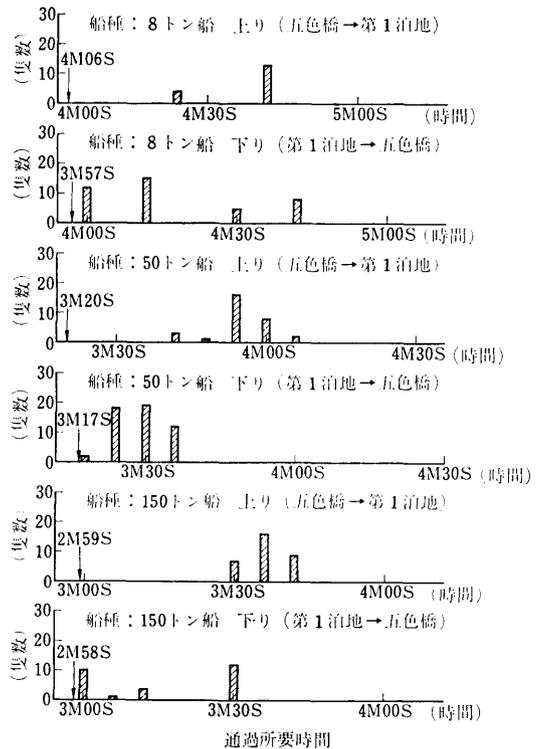


図11 船舶のII水路(五色橋↔第一泊地)における通過所要時間のスペクトラム

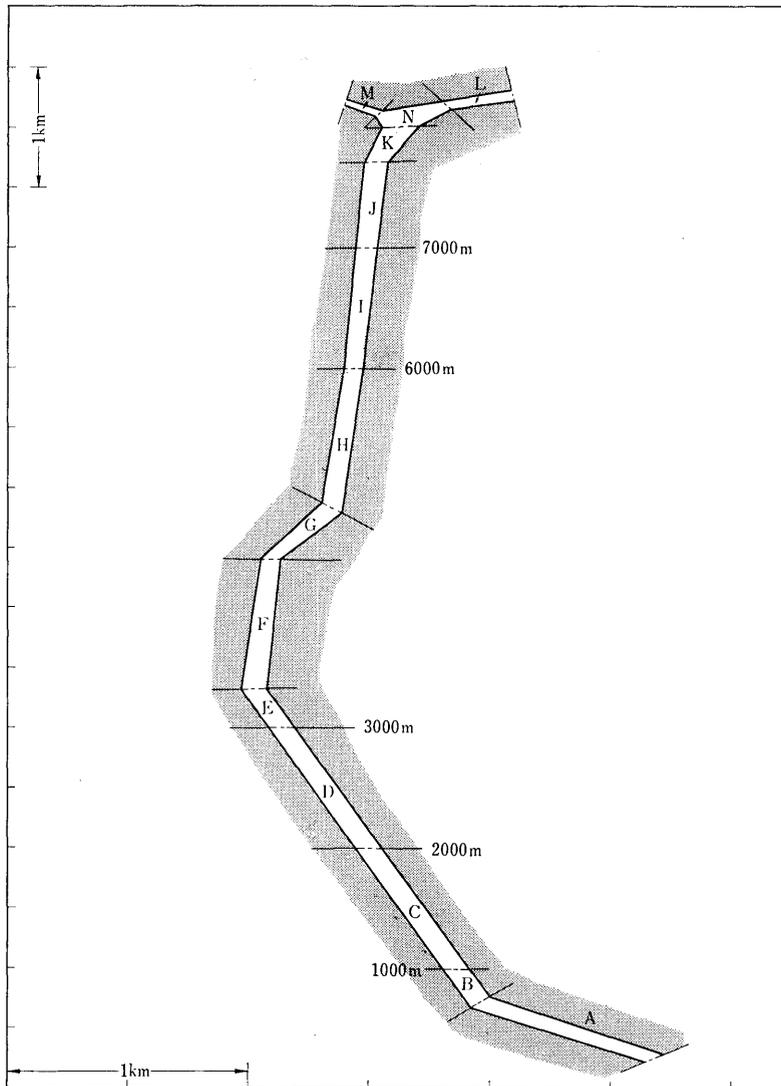


図 12 京浜運河における区間設定方法

## 5. む す び

今回開発した船舶交通流のシミュレーションの方法は水路網の形状とこれを航行する各種船舶の大きさおよび交通量などを前提とし、船の運動性能や航法などの拘束条件のもとにこの水路網中を多数の船舶が互いに他の船、障害物、陸岸など回避運行し能率よく各船がそれぞれの目的地に達するための最適航路を選ぶべくこれらの船の位置および速度を時々刻々計算し、この水路網中の船舶交通流を得るもので、さらにこの交

通流の各時間ごとに交通現象を示す評価量を計算するものである。

この評価量は水路の船舶交通容量を考察する場合の最も基本的な指標となる量であって、この基本的な指標としては航行中の船の速度をその船の最適速度で割った速度の減速比と航行中の船の速度のうち、水路方向成分をその速度で割った水路方向に対する変角比を取り扱った。

このシミュレーションの適用例としては港湾計画中の東京港の京浜運河を採り上げ、この運河の交差点

の船の航跡図や、この水路を各種の小型船が航行する場合の通過所要時間などを得ることにより、この運河の船舶交通流の解析が行ない得た。

以上船舶交通流のシミュレーションの体系は一応確立したが、今後この方法の中に含まれていない要因、例えば、船舶の操船者に関するものや海象気象による影響などについても考慮すべきであり、また本報告では船舶の運動性能などで種々の仮定とモデル化の近似を行なっているので、これらに対してもいっそうの改良とさらに、水路網の船舶交通容量と関係する多くの評価量の設定、これらと交通容量との関係を取り扱う方式の確立についても検討すべきであると考えている。

### 謝 辞

このシミュレーションの適用例は東京都港湾局のご支援のもとに行なわれたものであり、実際の計算は日本 IBM 株式会社で行なった。両者に厚く感謝する。

### 追 記

本適用例の計算に使用した計算機は IBM 360-75 であり、この適用例の約 2 時間 45 分の船舶交通流のシミュレーションに要する計算時間はほぼ 30 分であった。

### 参 考 文 献

- 1) 藤井, 田中: 海上交通工学序説, 船舶 Vol. 42, No. 8 p. 6 (1969)
- 2) 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, No. 2, p. 1, (1966)
- 3) 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, No. 2, p. 17, (1966)
- 4) 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), 中型船の閉塞領域の調査, 船舶技術研究所報告 Vol. 4, No. 4, p. 1, (1967)
- 5) 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, No. 6, p. 19, (1967)
- 6) 田中, 渡辺, 山田, 沢井, 金丸, 有村, 栗村, 藤井: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究, 制限水路の船舶の可能航行容量について (A-2) (その I), 閉塞領域におよぼす潮流の影響の研究, 船舶技術研究所報告 Vol. 6, No. 3, p. 17, (1969)
- 7) 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 (A-2) (その II), 船舶の混合交通における交通量換算係数について, 船舶技術研究所報告 Vol. 8, No. 3, p. 17, (1971)
- 8) 藤井: 海峡および水道の船舶交通現象に関する研究 (B-I), 航行容量の試算, 船舶技術研究所報告 Vol. 3, No. 5, p. 43, (1966)
- 9) 渡辺: 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その例, 船舶技術研究所報告 Vol. 3, No. 5, p. 53, (1966)

表 3 I シミュレーション結果の集計表

時間	区 間		船 数				面 積	船舶の総 トン 数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける 運 動 量	単位面積 当りの隻 数	速 度 の 比 減 速 比	水路方向 に対する 変 角 比	単位面積 当りの総 運 動 量	備 考	
			8 トン 船	50 トン 船	150 トン 船	計											
○時十五分○六秒現在	A	上り 下り	2隻 0	1隻 0	1隻 0	隻 4	ha 9.42	t 216	m/s 3.999	m/s 3.388	tm/s 826.2	ha <sup>-1</sup> 0.424	0.999	0.996	tm/sha 87.7	羽田附近	
	B	上り 下り	1 0	0 0	1 0	2	3.37	158	2.999	2.745	444.5	0.593	0.874	0.914	131.9		
	C	上り 下り	2 0	1 0	1 0	4	12.65	216	3.399	3.398	827.1	0.316	0.999	0.998	65.4		
	D	上り 下り	1 0	0 0	1 0	2	10.25	158	3.500	3.498	623.8	0.195	1.000	0.999	60.9		
	E	上り 下り	0 0	0 0	1 0	1	2.66	150	3.999	3.999	599.9	0.375	0.999	0.999	225.5		
	F	上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	9.69										
	G	上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	4.98										
	H	上り 下り	0 0	0 1	0 0	1	8.45	50	3.599	3.596	179.8	0.118	0.999	0.999	21.3		
	I	上り 下り	0 2	0 2	0 2	6	8.50	416	2.867	2.860	1006.3	0.705	0.832	0.997	118.4		
	J	上り 下り	0 0	0 0	0 2	2	6.87	300	3.999	3.989	1196.7	0.291	0.999	0.997	174.2		
	K	上り 下り	0 1	0 1	0 1	3	3.49	208	3.532	3.430	757.7	0.259	0.999	0.974	217.1		
	L	上り 下り	0 0	1 2	0 0	3	2.67	150	3.594	3.590	538.5	1.123	0.998	0.998	201.7	第一泊地 と接続附 近	
	M	上り 下り	0 0	1 0	0 0	1	0.61	50	3.600	3.574	178.7	1.639	1.000	0.992	293.0	五色橋附 近	
	N			1 1	2 2	4	3.64	358	3.540	3.497	1371.9	1.098	0.969	0.986	376.9	水路の合 流分岐地 点附近	

表 3 II シミュレーション結果の集計表

時間	区 間	船 数				面 積	船舶の総 トン 数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単面積 当りの隻 数	速度の減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単面積 当りの総 運動量	備 考
		8ト ン船	50ト ン船	150ト ン船	計										
○ 時 三 十 分 ○ 六 秒 現 在	A 上り 下り	2 0	3 0	0 0	5	9.42	166	3.359	3.348	585.2	0.530	0.999	0.996	tm/sha 62.1	羽田附近
	B 上り 下り	0 0	0 0	1 0	1	3.37	150	3.999	3.995	599.3	0.296	0.999	0.998	177.8	
	C 上り 下り	3 0	1 0	1 0	5	12.65	224	3.316	3.314	850.3	0.395	0.998	0.999	67.2	
	D 上り 下り	3 0	1 1	0 0	5	10.25	124	3.239	3.237	431.8	0.487	0.999	0.999	42.1	
	E 上り 下り	1 0	0 2	0 1	4	2.66	258	3.798	3.760	970.6	1.503	0.999	0.989	364.9	
	F 上り 下り	1 2	1 0	2 3	9	9.69	824	3.621	3.606	3242.4	0.928	0.999	0.995	334.6	
	G 上り 下り	2 0	0 1	0 2	5	4.98	366	3.494	3.489	1424.5	1.004	0.990	0.998	286.0	
	H 上り 下り	0 1	0 1	2 2	6	8.45	658	3.765	3.763	2601.1	0.710	0.999	0.999	307.8	
	I 上り 下り	0 1	0 1	1 2	5	8.50	508	3.719	3.717	2002.5	0.588	0.999	0.998	235.6	
	J 上り 下り	0 0	0 1	0 0	1	6.87	50	3.599	3.599	180.0	0.145	0.999	0.999	26.2	
	K 上り 下り	0 0	0 1	0 0	1	3.49	50	3.600	3.600	180.0	0.286	1.000	1.000	51.6	
	L 上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	2.67									第一泊地 と接続附 近
	M 上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	0.61									五色橋附 近
	N		0	1	2	3	3.64	200	3.494	3.416	721.2	0.824	0.898	0.973	198.1

表 3 III シミュレーション結果の集計表

時間	区 間		船 数				面 積	船舶の総 トン 数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面積 当りの隻 数	速度の減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量	備 考
			8 トン 船	15 トン 船	150 トン 船	計										
○時四十五分〇六秒現在	A	上り 下り	1 0	0 2	1 3	7	9.43	708	3.737	3.662	2703.1	0.743	0.998	0.980	tm/sha 287.0	羽田附近
	B	上り 下り	1 0	0 0	1 0	2	3.37	158	2.999	2.766	444.8	0.593	0.874	0.922	132.0	
	C	上り 下り	4 2	2 1	2 2	13	12.65	798	3.438	3.432	3079.5	1.027	0.997	0.997	243.4	
	D	上り 下り	1 1	1 1	0 3	7	10.25	566	3.582	3.574	2185.9	0.682	0.995	0.997	213.3	
	E	上り 下り	1 0	1 0	1 1	4	2.66	358	3.648	3.643	1400.9	1.503	0.999	0.997	526.6	
	F	上り 下り	1 1	3 2	0 0	7	9.69	266	3.427	3.378	933.7	0.722	0.999	0.984	96.4	
	G	上り 下り	3 0	0 1	1 1	6	4.98	374	3.432	3.334	1427.9	1.204	0.999	0.969	286.7	
	H	上り 下り	3 0	0 2	1 3	9	8.45	724	3.577	3.546	2791.0	1.065	0.999	0.991	330.3	
	I	上り 下り	1 0	1 0	0 1	3	8.50	208	3.532	3.514	798.5	0.352	0.999	0.994	93.9	
	J	上り 下り	2 1	1 2	2 2	10	6.87	774	3.578	3.558	2990.7	1.455	0.999	0.994	435.3	
	K	上り 下り	0 1	0 1	0 1	3	3.49	208	3.532	3.430	757.7	0.859	0.999	0.974	217.1	
	L	上り 下り	0 1	1 1	0 0	3	2.67	108	3.394	3.380	381.3	1.123	0.998	0.995	142.8	第一泊地 と接続附 近
	M	上り 下り	0 0	1 0	0 0	1	0.61	50	3.600	3.574	178.7	1.639	1.000	0.992	293.0	五色橋附 近
	N			1 2	2 3	3 6	3.64	558	3.433	3.406	2043.4	1.648	0.928	0.991	561.4	水路の合 流分岐地 点附近

表 3 IV シミュレーション結果の集計表

時間	区 間	船 数				面 積	船舶の総 トン 数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面積 当りの隻 数	速度の減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量	備 考	
		8トン 船	50トン 船	150ト ン船	計											
一時〇分〇六秒現在	A 上り 下り	0 1	1 1	1 1	5	9.42	408	3.640	3.638	1583.4	0.530	0.999	0.998	168.1	羽田附近	
	B 上り 下り	1 1	1 1	0 0	4	3.37	116	3.230	3.219	395.2	1.185	0.979	0.996	117.3		
	C 上り 下り	2 0	1 1	0 2	6	12.65	416	3.531	3.530	1606.6	0.474	0.999	0.999	127.0		
	D 上り 下り	4 0	1 2	0 3	10	10.25	632	3.479	3.475	2434.5	0.975	0.999	0.998	237.5		
	E 上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	2.66										
	F 上り 下り	4 0	0 2	2 2	10	9.69	732	3.519	3.511	2848.9	1.031	0.999	0.997	294.0		
	G 上り 下り	1 1	2 1	1 2	8	4.98	616	3.599	3.595	2384.5	1.606	0.999	0.998	478.8		
	H 上り 下り	2 2	1 0	1 2	8	8.45	532	3.499	3.441	2071.1	0.946	0.999	0.997	245.1		
	I 上り 下り	1 0	3 1	1 3	9	8.50	808	3.710	3.707	3141.5	1.058	0.999	0.998	369.6		
	J 上り 下り	3 1	1 1	0 2	8	6.87	432	3.399	3.390	1649.4	1.164	0.999	0.997	240.1		
	K 上り 下り	2 0	0 0	1 1	4	3.49	316	3.498	3.428	1210.3	1.146	0.999	0.981	346.8		
	L 上り 下り	0 1	1 1	1 1	5	2.67	408	3.629	3.624	1578.1	1.872	0.996	0.998	591.1	第一泊地 と接続附近	
	M 上り 下り	0 0	1 0	0 0	1	0.61	50	3.023	2.994	149.7	1.639	0.839	0.990	245.4	五色橋附近	
	N		1	1	1	3	3.64	208	3.169	3.141	765.2	0.274	0.889	0.990	210.2	水路の合 流分岐地 点附近

表 3 V シミュレーション結果の集計表

時間	区 間	船 数				面 積	船舶の総 トン 数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面積 当りの隻 数	速 度 の 減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量	備 考
		8ト ン船	50ト ン船	150ト ン船	計										
一 時 十 五 分 〇 六 秒 現 在	A 上り 下り	5 0	2 0	0 2	9	9.42	440	3.421	3.353	1597.2	0.955	1.021	0.982	169.6	羽田附近
	B 上り 下り	0 0	0 2	1 0	3	3.37	250	3.732	3.731	959.0	0.890	0.999	0.998	284.6	
	C 上り 下り	2 0	1 1	1 2	7	12.65	566	3.599	3.595	2205.1	0.553	0.999	0.998	174.3	
	D 上り 下り	0 2	1 1	1 3	8	10.25	716	3.649	3.648	2806.0	0.780	0.999	0.999	273.8	
	E 上り 下り	0 1	0 0	0 1	2	2.66	158	3.499	3.465	615.6	0.751	0.999	0.990	231.4	
	F 上り 下り	2 0	1 1	1 3	8	9.69	716	4.649	3.634	2796.7	0.825	0.999	0.995	288.6	
	G 上り 下り	2 1	0 0	0 3	6	4.98	474	3.498	3.400	1866.1	1.204	0.999	0.996	374.7	
	H 上り 下り	3 1	2 2	0 0	8	8.45	232	3.276	3.298	815.2	0.946	0.999	0.999	96.5	
	I 上り 下り	4 2	0 0	0 1	7	8.50	198	3.141	3.138	743.5	0.823	0.999	0.998	87.5	
	J 上り 下り	1 1	0 0	2 0	4	6.87	316	3.499	3.497	1246.6	0.582	0.999	0.999	181.5	
	K 上り 下り	0 0	2 1	0 0	3	3.49	150	3.599	3.568	535.2	0.859	0.999	0.990	153.4	
	L 上り 下り	1 0	1 3	0 0	5	2.67	208	3.479	3.461	739.2	1.872	0.999	0.994	276.9	第一泊地 と接続附 近
	M 上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	0.61									五色橋附 近
	N		1	1	3	5	3.64	508	3.443	3.230	1793.2	1.373	0.925	0.953	492.6

表 3 VI シミュレーション結果の集計表

時間	区 間	船 数				面 積	船 船 の 総トン数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面 積の 数	速 度 の 減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面 積の 総 運動量	備 考	
		8ト ン船	15ト ン船	150ト ン船	計											
一 時 三 十 分 〇 六 秒 現 在	A	上り 下り	1 1	2 0	1 3	8	9.42	716	3.649	3.555	2698.6	0.849	0.999	0.975	286.5	羽田附近
	B	上り 下り	0 1	0 1	0 0	2	3.37	58	3.299	3.291	203.1	0.592	0.999	0.997	60.3	
	C	上り 下り	2 0	1 0	3 3	9	12.65	966	3.724	3.721	3811.8	0.711	0.997	0.998	301.3	
	D	上り 下り	4 1	3 2	1 0	11	10.25	440	3.362	3.352	1614.4	1.073	0.999	0.996	157.5	
	E	上り 下り	1 1	1 0	0 1	4	2.66	216	3.399	3.280	757.1	1.503	0.999	0.969	284.6	
	F	上り 下り	1 2	2 0	0 0	5	9.69	124	3.329	3.184	419.7	0.515	0.999	0.984	43.3	
	G	上り 下り	1 1	0 1	1 1	5	4.98	366	3.519	3.459	1406.5	1.004	0.999	0.982	282.4	
	H	上り 下り	0 0	1 1	1 4	7	8.45	850	3.884	3.857	3341.4	0.828	0.999	0.992	395.4	
	I	上り 下り	2 1	1 0	2 2	8	8.50	674	3.574	3.571	2649.5	0.941	0.999	0.998	311.7	
	J	上り 下り	4 0	1 2	0 2	9	6.87	482	3.414	3.391	1803.2	1.310	0.997	0.993	262.5	
	K	上り 下り	1 0	0 0	0 0	1	3.49	8	2.999	2.979	23.8	0.286	0.999	0.993	6.8	
	L	上り 下り	0 0	0 1	0 0	1	2.67	50	3.599	3.583	179.2	0.374	0.999	0.995	67.1	第一泊地 と接続附 近
	M	上り 下り	1 0	0 0	0 0	1	0.61	8	2.999	2.988	23.9	1.639	0.999	0.996	39.2	五色橋附 近
	N			1 2	2 3	3 6	3.64	558	3.407	3.403	1920.1	1.648	0.926	0.996	527.5	水路の合 流分岐地 点附近

表 3 VII シミュレーション結果の集計表

時間	区 間		船 数				面 積	船 船 の 総 トン数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面積 当りの隻 数	速 度 の 比 速 減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量	備 考
			8 トン 船	50 トン 船	150 ト ン船	計										
一 時 四 十 五 分 〇 六 秒 現 在	A	上り 下り	0 1	0 0	0 1	2 隻	9.42	158	3.499	3.495	623.3	0.212	0.999	0.998	tm/sha 66.2	羽田附近
	B	上り 下り	2 0	1 0	0 0	3	3.37	66	3.423	3.374	214.9	0.890	1.080	0.984	63.8	
	C	上り 下り	2 3	0 1	0 2	8	12.65	390	3.324	3.316	1497.2	0.632	0.999	0.997	118.4	
	D	上り 下り	2 0	0 2	0 3	7	10.25	566	3.600	3.883	2206.8	0.682	1.000	0.998	215.3	
	E	上り 下り	0 0	1 0	1 2	4	2.66	500	3.899	3.896	1978.0	1.503	0.999	0.998	743.6	
	F	上り 下り	2 1	1 1	1 2	8	9.69	574	3.524	3.515	2227.1	0.825	0.999	0.997	229.8	
	G	上り 下り	1 0	1 1	2 2	7	4.98	708	3.742	3.662	2754.8	1.405	0.999	0.977	553.2	
	H	上り 下り	4 0	3 3	2 0	12	8.45	632	3.466	3.461	2374.4	1.420	0.999	0.997	281.0	
	I	上り 下り	1 0	3 1	0 1	6	8.50	358	3.565	3.564	1343.2	0.705	0.999	0.999	158.0	
	J	上り 下り	1 1	0 0	0 2	4	6.87	316	3.499	3.482	1246.0	0.582	0.999	0.994	181.4	
	K	上り 下り	0 0	0 0	1 0	1	3.49	150	3.999	3.997	599.6	0.286	0.999	0.999	171.8	
	L	上り 下り	0 0	0 2	0 0	3	2.67	250	3.733	3.731	959.3	1.123	1.000	0.999	359.3	第一泊地 と接続附 近
	M	上り 下り	0 0	0 0	0 0		0.61									五色橋附 近
	N			0 1	1 1	2	3.64	200	3.799	3.498	704.2	0.549	0.999	0.922	193.5	水路の合 流分岐地 点附近

表 3 Ⅷ シミュレーション結果の集計表

時間	区 間	船 数				面 積	船 船 の 総トン数	船舶の速 度の大き さの平均	船舶の水 路方向の 速度平均	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量	単位面積 当りの隻 数	速 度 の 減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量	備 考	
		8ト ン船	50ト ン船	150ト ン船	計											
二時〇分〇六秒現在	A	上り 下り	1 0	2 0	0 0	3	9.42	108	3.399	3.727	367.4	0.318	0.999	0.775	39.0	羽田附近
	B	上り 下り	1 1	0 1	0 2	5	3.37	366	3.519	3.442	1371.4	1.481	0.999	0.980	406.9	
	C	上り 下り	4 0	1 2	1 2	10	12.65	632	3.479	3.477	2434.5	0.790	0.999	0.999	192.4	
	D	上り 下り	1 0	0 2	1 0	4	10.25	258	3.549	3.548	983.2	0.390	0.999	0.999	95.9	
	E	上り 下り	0 0	0 1	0 1	2	2.66	200	3.799	3.723	761.8	0.751	0.999	0.980	286.4	
	F	上り 下り	3 0	1 0	0 2	6	9.69	374	3.432	3.490	1449.3	0.619	0.999	0.991	149.6	
	G	上り 下り	1 1	0 0	0 1	3	4.98	166	3.383	3.382	648.7	0.602	1.016	0.999	130.3	
	H	上り 下り	2 0	0 2	0 1	5	8.45	266	3.438	3.424	1006.3	0.591	0.999	0.994	119.1	
	I	上り 下り	2 1	2 2	1 2	10	8.50	674	3.539	3.534	2590.2	1.176	0.999	0.997	304.7	
	J	上り 下り	1 2	1 0	1 2	7	6.87	524	3.513	3.493	2041.0	1.018	0.999	0.993	297.1	
	K	上り 下り	0 0	0 1	1 0	2	3.49	200	3.799	3.625	761.2	0.573	0.999	0.951	218.1	
	L	上り 下り	1 1	2 0	0 0	4	2.67	116	3.074	3.061	362.0	1.498	0.937	0.995	135.6	第一泊地 と接続附 近
	M	上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	0.61									五色橋附 近
	N			2	0	1	3	3.64	166	3.331	3.247	645.6	0.824	0.999	0.971	177.4

表 3 IX シミュレーション結果の集計表

時間	区 間		船 数				面 積	船 船 の 総トン数	船 船 の速 度の大き さの平均	船 船 の水 路方向の 速度平均	船 船 の水 路方向に 於ける総 運動量	単 位 面 積 当 り の 隻 数	速 度 の 比 減 速 比	水 路 方 向 に 対 す る 変 角 比	単 位 面 積 当 り の 総 運 動 量	備 考
			8 トン 船	50 トン 船	150 トン 船	計										
二時十五分〇六秒現在	A	上り 下り	2 0	1 1	0 2	6	9.42	416	3.532	3.531	1607.4	0.636	0.999	0.999	170.6	羽田附近
	B	上り 下り	1 0	0 0	0 0	1	3.37	8	3.599	3.595	28.8	0.296	1.199	0.999	8.5	
	C	上り 下り	3 0	0 0	2 1	6	12.65	474	3.599	3.658	1874.7	0.474	1.032	0.996	148.2	
	D	上り 下り	1 1	4 3	1 1	11	10.25	666	3.562	3.556	2502.8	1.073	0.999	0.997	244.2	
	E	上り 下り	0 0	0 1	0 2	3	2.66	350	3.866	3.699	1307.3	1.127	0.999	0.957	491.4	
	F	上り 下り	4 1	2 0	0 2	9	9.69	440	3.354	3.335	1666.7	0.928	0.999	0.994	172.0	
	G	上り 下り	2 2	0 1	0 0	5	4.98	82	3.118	3.055	261.1	1.004	0.999	0.999	52.4	
	H	上り 下り	1 0	1 2	2 1	7	8.45	608	3.684	3.578	2252.0	0.828	0.999	0.972	266.5	
	I	上り 下り	2 0	0 1	0 2	5	8.50	366	3.519	3.518	1427.0	0.588	0.999	0.998	167.9	
	J	上り 下り	2 0	1 0	0 1	4	6.87	216	3.399	3.395	826.6	0.582	0.999	0.998	120.3	
	K	上り 下り	1 0	0 1	0 2	4	3.49	358	3.649	3.644	1402.3	1.146	0.999	0.998	401.8	
	L	上り 下り	0 0	0 1	0 0	1	2.67	50	3.600	3.599	180.0	0.374	1.000	0.999	67.4	第一泊地 と接続附近
	M	上り 下り	2 0	0 0	0 0	2	0.61	16	2.664	2.657	42.5	3.278	0.888	0.997	69.7	五色橋附近
	N			0	0	0	0	3.64								水路の合 流分岐地 点附近

表 3 X シミュレーション結果の集計表

時間	区 間		船 数				面 積 ha	船 舶 の 総 トン数 t	船舶の速 度の大き さの平均 m/s	船舶の水 路方向の 速度平均 m/s	船舶の水 路方向に 於ける総 運動量 tm/s	単位面積 当りの隻 数 ha <sup>-1</sup>	速 度 の 減 速 比	水路方向 に対する 変角比	単位面積 当りの総 運動量 tm/sha	備 考
			8 トン 船	50 トン 船	150 ト ン船	計 隻										
二 時 三 十 分 〇 六 秒 現 在	A	上り 下り	4 0	0 1	1 3	9	9.42	682	3.510	3.499	2661.8	0.955	0.999	0.996	282.6	羽田附近
	B	上り 下り	0 0	0 0	0 0	0	3.37									
	C	上り 下り	0 3	0 1	0 1	5	12.65	224	3.319	3.318	851.6	0.395	0.999	0.999	67.3	
	D	上り 下り	0 0	0 2	0 1	3	10.25	250	3.733	3.718	957.3	0.292	0.999	0.995	93.4	
	E	上り 下り	6 0	2 0	4 0	12	2.66	748	3.432	3.428	2901.5	4.511	0.999	0.998	1090.8	
	F	上り 下り	1 0	0 1	0 4	6	9.69	658	3.766	3.691	2540.5	0.619	0.999	0.980	262.2	
	G	上り 下り	1 0	0 1	1 0	3	4.98	208	3.199	3.078	644.6	0.602	0.916	0.959	129.4	
	H	上り 下り	1 0	4 2	2 1	10	8.45	758	3.659	3.652	2898.6	1.183	0.999	0.997	343.0	
	I	上り 下り	4 1	2 1	1 3	12	8.50	790	3.482	3.480	3057.3	1.411	0.999	0.998	359.7	
	J	上り 下り	2 0	0 1	0 1	4	6.87	216	3.399	3.396	827.1	0.582	0.999	0.998	120.4	
	K	上り 下り	0 1	0 1	0 0	2	3.49	58	3.299	3.277	203.6	0.573	0.999	0.992	58.3	
	L	上り 下り	0 1	1 0	1 1	4	2.67	358	3.643	3.473	1362.5	1.498	0.997	0.952	510.3	第一泊地 と接続附 近
	M	上り 下り	1 0	1 0	1 0	3	0.61	208	2.903	2.822	635.4	4.918	0.817	0.965	1041.7	五色橋附 近
	N			1	1	1	3	3.64	208	3.532	3.528	801.8	0.824	0.999	0.998	220.3