

## シミュレーションによる航路計画の研究

## SIMULATION STUDY ON CHANNEL PLANNING

木 俣 昇\*・石 崎 肇 士\*\*

By Noboru Kimata and Hajime Ishizaki

## 1. 緒 言

われわれの社会は明らかに新しい段階に突入しつつある。スコット・グリアは「われわれの持つ担保のすべてが周囲の都市的世界の財産として吸いとられている<sup>1)</sup>」と述べている。そしてこの状況は、わが国における計画視座の変更を引き起こし、拠点主義的な全国総合開発計画から、全国的なネットワーク構造の確立をめざす新全国総合開発計画への変遷をもたらした。これは社会体系における量的変化に伴ってじゃっ起された価値体系の変化であり、社会の基盤的なシステムが、量的拡大の結果、他のシステムとより強い関連性のもとに置かれ、相互に補完しあって機能する時代に至ったことを意味する。このことは社会の各計画化において、計画間、あるいはシステム間の位階性を無視した個別的計画手法の非有効性の宣言である。ティンバーゲンは、プロジェクトの評価という問題において、補完的 (complementary) プロジェクトの概念<sup>2)</sup>を用いているが、これはプロジェクト間の位階性の一つ概念であり、計画間の位階性の概念にまで拡張されねばならない。われわれは、ある計画 (上位計画) を実現するために実現されていなければならぬサブシステムの計画を補完的計画ということにする。この場合、補完的計画の条件の一つとして、上位計画より要請された諸要求事項がその計画で満足されていることの必要性がある。しかしそのシステムの開発に伴う物理的、技術的、資金的、あるいは時間的制約等の強さによっては、それらを完全には満足させえない場合がある。したがって上位計画はその補完的システムの分析結果を、その補完性の強さに応じてフィードバック情報として受けとらねばならない。

すなわち、補完的プロジェクトの計画理論は、これら

制約と要求事項の満足との関係を操作的に解析することによって、上位計画へのフィードバック量を求めることであるといえよう。補完的計画の手法としては、その従来の機能よりみてシステム論的計画理論がその有効性を十分に発揮することが期待される。

本研究は、このような観点より港湾計画、あるいは臨海部を中心とする地域計画の補完的計画として、近年その重要性を増してきている航路の整備計画のためのシステム開発を目的とするものである。

わが国は瀬戸内海を始め東京湾、大阪湾、伊勢湾等重要地点に狭水路を有しており、開発規模の拡大に伴って急激に航路交通量が上位計画の制約として作用するに至った。特に瀬戸内海地域は、水深 -11 m、幅員 500 m の早瀬瀬戸を初め、水深 -10 m、幅員 400 m の来島中水道 (北航のみ)、水深 -11 m、幅員 700 m の備讃瀬戸北水道等の日本有数の狭水路を出入口に有しており、ポートアイランド、大阪港海上都市構想等を初めとする瀬戸内海沿岸地域の大規模開発計画は、その補完的なシステムである航路の交通容量の面より検討を加えておく必要があるだろう。

われわれが対象とする船舶交通に関して、二つの大きな特徴を指摘することができる。その一つは、その大きな慣性力に起因する船舶運動上の特性、たとえば前進惰力の制御の困難性に伴う操船における行動選択の順序性、緊急停止に伴う旋回現象による安全確保の困難性等である。他の一つは、通航船舶が 100 トン以下の小型船から 10 000 トン以上の大型船にわたっており、その交通流は速度、大きさの両者とも分散が非常に大きな混合流であるということである。

われわれは、船舶運動の特性を定式化し、直線の主航路に横断航路が直角に交差する理想化された航路における通航船舶のシミュレーションモデルを構成し、その混合流を解析することによりシステム論的航路計画の展開の第一段階としたい。

\* 正会員 京都大学助手 工学部土木工学科

\*\* 正会員 (株)日建設計

## 2. 航路における船舶交通の特徴

船舶は、航路の形式、海象、気象および船舶の輻輳度を考慮して、前後 1~3 km のを安全確認領域内の他船舶との安全を確保するために必要な行動系列を、自船舶の操船性能に規定された範囲内で決定することによって航路を通航している。船舶の行動は、一般にその大きな慣性力やプロペラ推力の左右不平衡性、潮流等非線形的な力関係に起因する種々の特殊性を持つが、モデル的には、他船舶との衝突回避の状況を想定し、前方向、横方向の閉塞領域<sup>3),7)</sup>が侵害されない行動の中から操船上の安定性を考慮し、通航所要時間を比較することによって決定される。

横方向の閉塞領域とは、二船がすれちがう時、「二船間の海水の運動によって相互に吸引力が作用し接触する危険を回避するのに必要な船舶間の横方向距離」であり、その大きさは一般に船舶の垂線間長  $L$ 、あるいは  $1.5L$  程度とされている<sup>3)</sup>。一方、前方向の閉塞領域は、状況に応じて種々想定される。たとえば、二船舶の他に障害物が少なく、十分な水域がある場合は、主機反転、35度転舵で惰行する直進距離とすることができる。しかし、水域が狭く左右に船首が振れては危険な場合は、主機反転を用いることができず<sup>8)</sup>、極微速後進、錨をもって停船できる距離となる。実際に航路で観測される前方向閉塞領域はだいたいこの間の値である。

藤井らは、(1)先行船の運動状態の変化を認めるまでの時間と、(2)適切な避航動作が行なわれるまでの時間をもとに、船舶の垂線間長  $L$  を用いて、 $8L$ 、 $3L$  の半だ円形をその船舶の閉塞領域として推定している<sup>3)</sup>。一方、京浜運河、浦賀水道での船舶間の距離の実測調査<sup>7)</sup>では、船長 10~50 m の船舶の閉塞領域は、横方向に 50~120 m、前方向 150~200 m、船長 70~130 m の船舶については、横方向 250~350 m、前方向 500~1000 m となっている。

もちろん、船速、潮流、視程、輻輳度、さらに操船者の心理的要因によって、これら閉塞領域の値は変化するし、先行船が後続船に転針や減速を通知し、後続船がそれを確認するようにすれば、大幅に減少するとされている。閉塞領域の概念は船舶交通の定式化において重要なものであるが、上でみたようにその大きさは種々想定される。われわれは、この値を操作可能なようにモデルに組み入れることにより、この問題を解決する必要がある。

他の船舶交通の特徴として、慣性力の制御困難性に起因する (i)自由走航、(ii)旋回、(iii)減速、(iv)機関停止および、(v)反転という行動選択の順序性の傾向をあげることができる。これは船舶の航跡調査によって推

測されることである。運輸省が実施した調査<sup>4),5)</sup>によれば、船舶は衝突回避行動として減速や機関停止、反転を必要とする以前に前方船を旋回で回避し、自由走航を追求していることがわかる。また潮流や推進機関等、非線形的な力を受ける操船において迅速性のみならず力学的安定性を重視するのは当然であろう。実際に観測される船舶の動態は、潮流、視程、航路の屈曲、陸岸の影響等が複雑に関連し、さらに操船者の心理的要因が加わった結果であることは明らかである。

本研究は航路計画のための一種の情報システム<sup>19)</sup>の作成を目的としており、現段階で明らかにされている資料をもとに船舶の動態のシミュレーションモデルを作成し、それにシステム分析の手法を適用することによって高次の計画情報を求めることを試みた。われわれは以下の分析で船舶交通の基本的構造として、一定距離の安全確認領域、他船との安全確認のための前方向、横方向の閉塞領域、および上述の5種類の行動間の選択順序を設定し、船舶交通の定式化を試みた。

## 3. 船舶の行動系列決定システムの概要

本節では前節で設定した基本的構造のもとで、船舶の動態をシミュレートするための基本的事項である船舶の行動系列の決定方式について概説する。

前節で設定したように船舶は航行時にはその内に含まれる他船との安全を確認する安全確認領域をもって。本研究では、航路をこの安全確認領域によって数ブロックに分割し、さらに船舶の占有水域を表現するために船舶の垂線間長を基準にレーンに分割する。

すなわちモデル航路は図-1のようにブロック、レーンに分割され、ブロックは一般ブロックと交差ブロックに区別される。

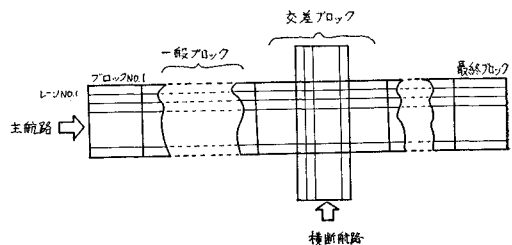


図-1 航路のモデル図

船舶の行動系列とは、第一ブロックにおける船舶到着に始まり、各ブロックの通航行動の系列の決定をへて、最終ブロックの通航完了確認によって終了する一連の船舶の採用行動の系列である。その概要は、航路の入口の第一ブロック、それに続く一般ブロック、および主航路と横断航路が交差する交差ブロックにおいて、次のよう

に定式化される。

特に本研究では、主航路に優先指定がない場合を取り上げる。このような場合には海上衝突予防法によって、他船を右舷にみる船舶が他船の進路を避けるものとされている。したがって図-1において主航路を通航する船舶は左から右へ、横断航路を通航する船舶は下から上へ通航する場合を考察することになる。

(1) 第一ブロックにおける船舶の発生

船舶の航路への到着は、第一ブロックでの船舶の発生に対応する。船舶はある確率分布によって発生し、第一ブロックへの侵入の可、不可を第一ブロック内の他船との前方向、横方向の閉塞領域によって検討することにより、その船舶の侵入位置のレーン番号および船舶の大きさに応じた占有レーン数を指定する。

到着分布は一般的にはポアソン分布が経験的に設定される<sup>31,32)</sup>が、各港湾と対象航路との位置関係によって異なるため、ここでは任意分布を設定できるようにした。

(2) ブロック内通航の安全の確認方式

船舶の航路内航行の条件は、次のようである。

- (i) 横方向の閉塞領域の確保
- (ii) ブロック内およびブロック通過完了時点での前方向の閉塞領域の確保
- (iii) 船舶はその動力機関の特性上非連続的な80%、60%の二段階の減速速度を持つ。この範囲で他船との安全を確保できない場合は機関停止、あるいは極微後進を必要とするが、この場合は操船性が非常に低下するので異常として記録する。
- (iv) 船舶は後方の船舶との安全が保てる限り、前方船を二船まで旋回で通航レーンを変更することにより回避することが許される。
- (v) 航行中後方より自船より速い船舶が航行してきた場合、自船が別に定める通航路移譲義務船の場合には、その通航位置を開放しなければならない。自船が何らかの理由で旋回できない場合はこの限りではない。

これら5個の前提条件のもとでのブロック内通航の最早の行動予定は、図-2の作業順序図で示されるようにシステムの的に決定される。

(3) ブロック通航完了の確認方式

船舶はまずブロック侵入時に、安全確認領域に対応するブロック内の通航行動の予定表を図-2のシステムにしたがって作成する。この予定行動は、その船舶の通航完了時において次の二種類の確認を受け、実行動作となる。

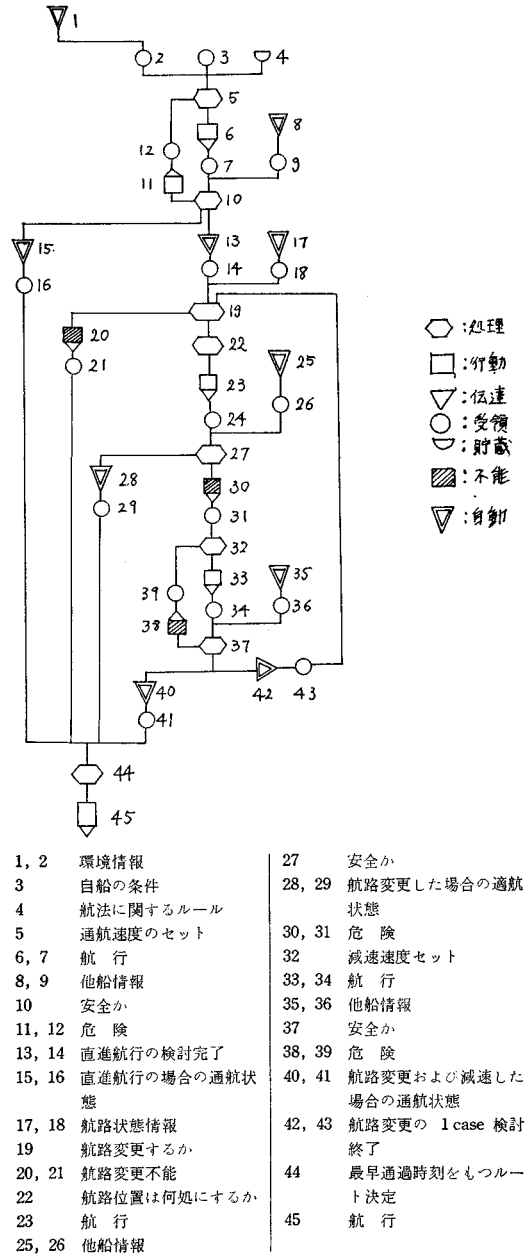


図-2 ブロック内通路予定行動決定システム

- (i) ブロック内通航中に、前方船が減速によって自船の閉塞領域を侵さなかったか。
  - (ii) ブロック通航完了時点において、次ブロック内に自船の閉塞領域を侵している船舶がないか。
- この二つの安全確認において不備が生じた場合は、ブロック内の通航予定行動を変更し再度安全確認を行なう。通航完了の確認は図-3の作業順序図のようにシステム化される。

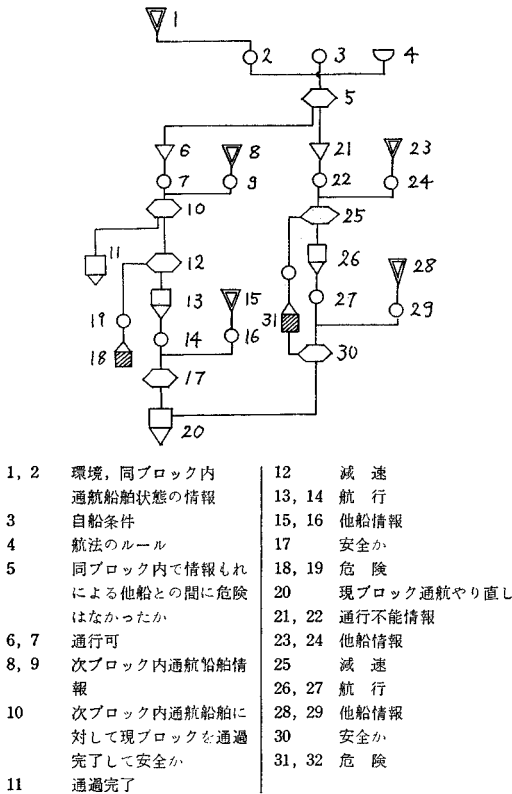


図-3 ブロック通過完了確認システム

(4) 交差航路における航行方式

主航路に優先権が認められていない場合には、海上衝突予防法が適用されるので、航路横断船舶が著しく増加するならば主航路の通航に支障をきたす。交差ブロックにおける主航路通航船舶の行動は次のような制約を受ける。

- (i) 別に定める横断船舶に対する安全確認領域内の全船舶に対して、交差完了するまで、相互の閉塞領域を確保する。
- (ii) 主航路通航船舶は海上衝突予防法により右舷に見る横断船舶の通航をさまたげてはならない。そして横断船舶を回避する場合には、必ず横断船舶の後方を通航しなければならない。
- (iii) 船舶の減速は一般ブロックと同じである。
- (iv) 主航路を通航中の他船との安全確認は一般ブロックの場合と同じである。
- (v) 横断船舶によって主航路が通航できない場合には、交差ブロック入口において、通航可能となるまで待機しなければならない。一般に船舶は停船状態においては不安定であるので、この場合も異常事態として記録する。

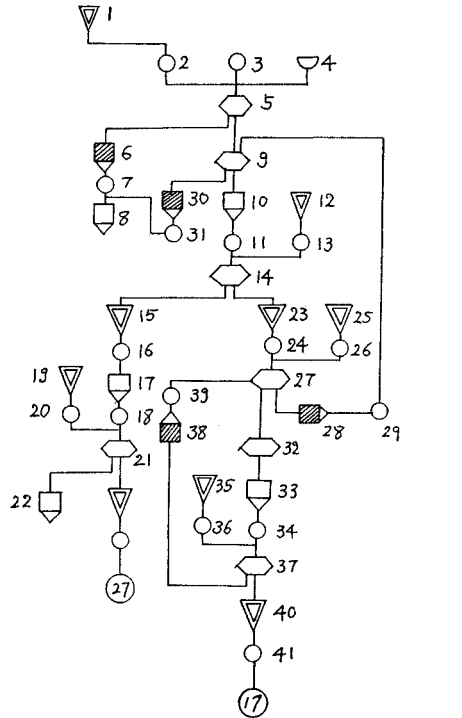


図-4 交差ブロック通航予定行動決定システム

- (vi) 交差ブロック入口で待機船がすでにいる場合、その待機位置が自船の閉塞領域を侵害するならば、待機船が動き出すまで交差ブロックへの侵入は許されない。

以上の制約の下で、交差ブロックでの主航路通航船舶の行動決定は、作業順序図によって図-4のようにシステム化される。

ここで、通航路移譲義務船とは後続船の船速、船型との差がある一定値以上の場合の前方小型船を指すものとする。これは航路の通航規制の一種であり、計画の手段の一つとして政策的に決定されるものである。本研究では、通航船舶を船種、船型の組み合わせによって表-1のようにランクに分けている。ここでは通航路移譲義務

表-1 船舶統一ランク表

船種 ランク	貨物船	タンカー	客船 フェリー	機帆船
500 以下	1	1	3	1
500~1 000	2	2	4	
1 000~3 000	3	3	5	
3 000~6 000	4	4		
6 000~10 000	5	5		
10 000~40 000	6	6		
40 000 以上		7		

船は、ランク差が2以上の小型船とする。

また計算機によるシミュレーションモデルの作成では、システムの全状態が定義されていることが重要であり、前述の(1)~(4)の通航行動の定式化に関する条件設定には、船舶交通の特徴の他にシステムの完全記述の条件が加わっている。たとえば旋回、あるいは第一、第二減速で前方船との安全が確保できない場合の追従や、交差ブロックへの進入待機の状態は船舶の運動特性上、不安定かつ危険であり、実際の船舶交通においては異常事態であるが、船舶数を増加させてシミュレーションを行えばこれらの事態は、システム内部ではある確率で出現するものであり、十分考慮しておく必要がある。

本研究では、システムの状態の完全記述とプログラミングの容易さのため 図-2~図-4 に示すような作業順序図を採用した。

#### 4. 航路シミュレーションモデルの概要

前述の2., 3. 節の船舶交通の基本的構造をもとに、本節では *time-slicing* と *event-sequencing*<sup>10)</sup> の複合形として、理想化された航路における船舶通航のシミュレーションモデルを構成する。本研究では、3. 節で述べたように 図-1 のモデル航路を対象とする。この航路の幅員、全長は、レーン数、ブロック数によって表示される。ここに、レーンの幅は、船舶の垂線間長  $L$  を、ブロックの長さは、安全確認領域の長さをもとに決定される。本モデルではまず第一に、航路の船舶の行動を決定する安全確認領域に対応する各ブロックの各船舶の通航行動によって「事象」を定義し、第二に、ブロックの出入口において最早行動船舶を探索し、*time-slicing* の間隔を決定する。

本モデルは、図-5 に示すように船舶のブロック内通航行動の予定表作成部、最早行動の探索部、通航の安全確認部、予定行動の修正部、および異常事態の検出部と各種の統計処理部で構成されている。

ここで、ブロック内通航行動の予定表の作成、通航の安全確認、予定行動の修正は、おのおの前節で定式化されたものであり、図-2, 図-3, および 図-4 をサブシステムとする。本モデルでは計算機の容量制限よりシステムの状態が、十隻以上の待機船をもつことになれば、

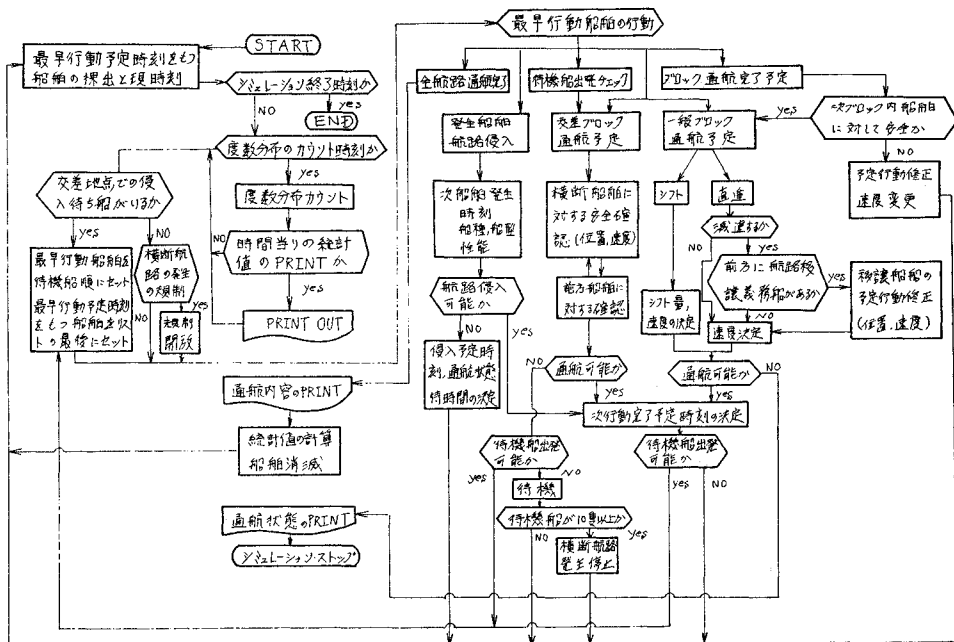


図-5 航路シミュレーション・システムの概要

一時横断船舶の発生を停止し、その旨を記録し、計算を続行することにしてゐる。本シミュレーションモデルの記憶容量は、約3万ワード、内変数1万4千、プログラム1万5千であり、10時間分のシミュレーション時間は到着船舶数  $\lambda = 0.2 \sim 0.8$  のとき、FACOM 230-60 で約3~4分である。なお出力情報としては、船舶の侵入待ち時間、ブロックごとの通航速度、位置、所要時間、遅延時間、行動内容（一段、二段減速、異状減速、旋回）および航路内航行船舶数である。

本モデルの特徴は、船舶の垂線間長、占有レーン数、船速、旋回性能；安全確認領域長；前方向、横方向閉塞領域長；および安全確認方式ですべてが決定されるという点である。したがって、他の要因はこれらの値を媒介としてモデルに導入される。たとえば、潮流は船舶の対地速度、前方向閉塞領域長、安全確認領域長の変化としてモデルに導入され、操船者の心理的要因も同様にこれらの値を確率変数として表現することによって、モデルに導入されることになる。

すなわち、本モデルの信頼性は、本モデルに直接表現されていない航路システムの環境要素をいかにこれら内部要素と関連づけ、分析するかにかかっている。したがって本研究の分析においては、システム的方法の持つ操作性を有効に用いる必要があるのである。

### 5. 航路シミュレーションモデルの基礎的分析

前述したようにこのシステムの出力の計画情報としての信頼性は、もちろん設定された基本的構造に全面的に規定されるが、環境要素と内部要素との関連の記述の信頼性に依存する。したがってこの関連性を明らかにすると同時に、その不確実性を分類し<sup>13)</sup>、システムの操作性を用いて、その定量的把握が試みられねばならない。

航路システムは、図-6のようなサブシステムに切断される。前節では、その中で船舶技術条件、航路条件、通航規則を環境要因として、船舶航行システムに対するシミュレーションによるモデル化が行なわれた。このモ

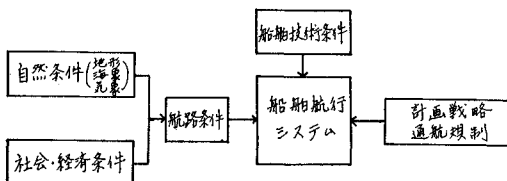


図-6 航路システム概念図

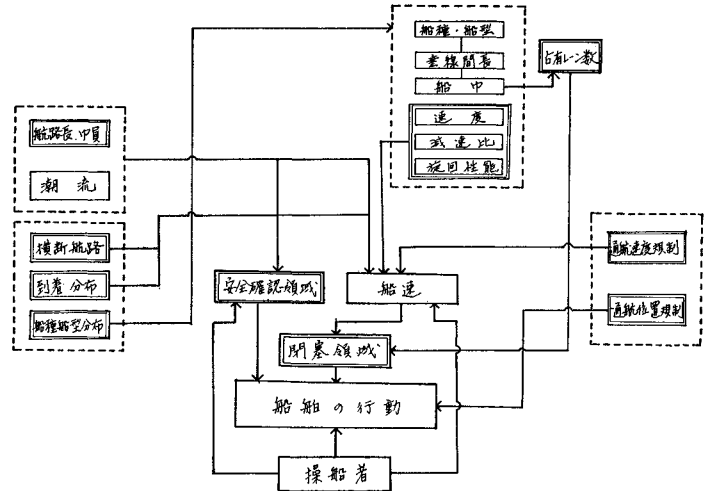


図-7 航路システムの要因関連図

デルに作用する環境要因を操作的に解析するため本システムを構成する要素を細分割し、その関連を求めれば、図-7のように整理できる。

これらの要素は船舶およびその交通に関する要素、人的要素、地理的航路条件の要素および計画戦略の要素に大別される。また一般システム理論<sup>18)</sup>でいう内的要素とシステムの環境をなす環境要素という分類を用いれば、地理的航路条件の要素や人的要素は環境要素であり、図-7の中の二重わくの要素は本システムで直接操作される内的要素であるといえよう。

環境要素は二重わくの要素との関連においてシステムに作用するのであって、その影響を分析するためには環境要素と二重わく要素との関連性の把握が重要となる。しかし現段階においては、これらの関連性は少数のものを除けば十分に調査、解析されているとはいえない。それゆえに航路計画においては、システム分析の各種の手法を適用することにより信頼性を向上するための努力が必要となるのであって、われわれの提供するシステムもそのための一道具だてなのである。本節においては、各要素についての既存の調査結果を概説し、それをもとに本システムの基礎的な分析として、システム構成要素の要因分析と環境要素の分析を行なう。

#### (1) 船舶交通に関する調査結果の概説

a) 船舶交通流に関しては到着分布、船種・船型分布、航路通航位置分布等に関する多数の調査・報告<sup>4), 5), 6), 9)</sup>がある。

船舶の到着分布は、20隻/時間以下の航行状態ではポアソン分布が成立するとされている<sup>9)</sup>。時間的な変動のパターンは一般に航路と港湾との位置関係により異なる。港湾周辺部においては荷役作業時間の影響を強く受

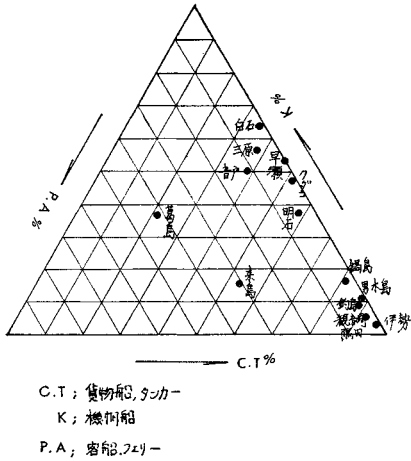


図-8 航路別船種構成

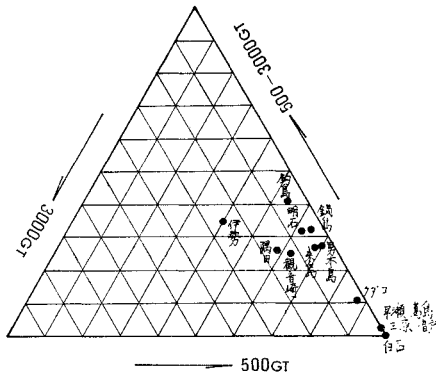


図-9 航路別船型構成

け、変動は大きいですが、遠くなるほど平滑化され時間的変化が小さくなること<sup>3)</sup>が報告されている。

船種、船型構成は図-8、図-9 のようになっており主航路と副航路では大きく異なる。主航路は貨物船、タンカーが 90% を占めるものと、客船フェリーの比率が相対的に多くなっているものがある。一方、副航路では機帆船が 50% を占めることが大きな特徴である。

航路通航位置は、たとえば来島の中水道、西水道では潮流が南流の場合には、中水道が南航船舶、西水道が北航船舶の推選航路となっており、通航船舶はこの推選航路にほぼ平行に航行していることが報告されている。

b) 船舶の種々の特性は一般にその垂線間長  $L_{pp}$  との関係で整理されている<sup>3), 13)</sup>。たとえば船舶の大きさ (GT)、満載速度 (ノット)、旋回時間、逆転停止距離 (m)、等はその対数を用いて、

$$\log(GT) = 2.82 \log(L) - 2.06 \pm 0.06^3) \dots (1)$$

のように推定されている。したがって船舶交通に関する記述には、船舶の垂線間長が重要な媒介変数となる。

e) 気象・海象と船舶動態との関係については、

① 潮流と船舶動態との関係を見ると、前方向の船間距離は、順潮に比して逆潮の場合減少し、横方向にはほぼ一定であるとされている。潮流と前方向船間距離との関係は、

$$l = 8L + 650 \cdot (u/L)^{14}) \dots (2)$$

$$l = 7L + 5L_0(u \cdot L_0/VL)^{33}) \dots (3)$$

の 2 種類の推定式が報告されている。ここに  $L$  は船舶の垂線間長 ( $L_{pp}$ )、 $u$  は潮流速 (ノット)、 $V$  は船速 (ノット)、 $L_0$ 、 $V_0$  は定数である。潮流の解析には、その方向性を考慮しなければならないが、狭水路では、主航路の船舶は、同方向であり問題ない。横断船舶については、横方向の偏位を加味しなければならないことになる。船速については一般に操船性能が対水速度に関係するから、潮流のある場合は、船舶の大きさと潮流の流速の程度にもよるが、対地速度は潮流分だけ加減される。通航位置に関しては 3000 GT 以上では潮流の影響を受けず、航路内を通航するが、小型船は特殊な航法でそれに対処している<sup>14)</sup>。

② 視程不良の原因は、主として霧、スモッグであり、沿岸地帯の工業化に伴って、年々増加する傾向にある。視程と船間距離、船速、あるいは航行不能日数等については十分な資料がない。

③ 風波の影響は船舶の舵行現象として解析され、調査結果<sup>15)</sup>によれば、航路浮標が 3 カイリピッチとすれば大体 270 m 以内で修正されている。これは船舶の横方向船間距離に関係し、それが 1.5  $L$  程度であれば、この影響は無視し得るといえる。

d) 操船者の緊張については、瀬戸内海の 6 カ所の狭水路での調査がある<sup>15), 16)</sup>。操船者の緊張を引き起こす航路条件としては、船舶の輻輳、潮流、水路幅、湾曲見とおし、浅瀬、航路標識の順となっている。しかし操船者の緊張が操船にどのような変化として表われるのかに関しては資料がない。

以上のように船舶交通に関する調査は、われわれが欲する水準では不十分であり、今後の調査に待たねばならない面が多い。

(2) システム構成要素の要因分析

計画システムの要素は計画手段である戦略集合と環境集合に分類されるが<sup>17)</sup>、環境集合の要素は予測の対象となるいくつかの状態と計測誤差による変動範囲を持つ。この概念は実験計画法での制御要因と標示要因の概念を用いて操作的定義に変換される。この場合、標示要因にはいくつかの状態を持つ要素と、かなりの計測誤差が予想される要素とが含まれることになる。

計画システムにおいて「結果の集合」といわれるものは、システムの状態、あるいはそのスカラー的表現であ

る特性値に対応する。特性値はシステムの状態を用いて種々想定可能であり、そこに恣意性が入る余地がある。補完的計画にあっては、上位計画へのフィードバックという意味での合目的性が検討されねばならない。システムによる「結果」の操作的定義は、合目的性の客観的斉合性を保障する一つの方法である。そしてシステム分析は、「結果」とそれに対するシステムの要素の寄与率を求め、要素自身の信頼性とを対比することにより情報システムとしての価値を明らかにする。

補完的計画である航路計画にあっては、航路の交通容量は重要な情報である。

交通容量の概念に関しては、まず 1950 年 *Highway Capacity Manual* において、基本交通容量、実用交通容量、可能交通容量の 3 種類の概念が明らかにされ、次いで 1966 年、道路計画、あるいは既設道路の交通量の評価のために「サービス水準」によるサービス交通容量が定義された。航路の交通容量についても同様の概念を導入することができる。その定義にもとづけば、「サービス交通容量」の水準規定項目として、相互に重複するが、(1) 速度および旅行時間、(2) 交通の中断、または障害、(3) 行動の自由性、(4) 安全性、(5) 運転の快適性および容易性、(6) 経済性の 6 項目をあげることができる。

船舶交通に関して上述の項目を検討すれば、船舶の運動特性上、第 2 項目の交通の中断または障害は、他の項目を全面的に規定するクリティカルなものといえる。

船舶交通における船舶の停止は非常に危険なものと考えられ、異常事態である。計画時点において、システムの異常事態の発生確率を予測しておくことは非常に重要であるが、補完的なシステムである航路の計画にあっては、異常事態の発生確率は小さな値に保たれている必要がある。われわれはこのような考えのもとに、航路システムの定常的な状態での挙動を解析対象とする。

船舶の遅れは航路通航中旋回や減速を必要とする場合に発生し、これは行動の自由性、安全性、快適性、容易性を低下させる。もちろん (1)、(6) の項目とも直接関係する。そこで、われわれはシステムの状態を記述する特性値として、期待通航所要時間からの遅れを採用することにする。ここで、期待通航所要時間とは、船舶が巡航速度で航路全長を自由走航するに要する時間と定義する。

システムの状態を規定する要素としては、表-2 に示すものを次のような理由で選択した。

#### a) 制御要因

船舶交通の特徴の一つとして、航路通航船舶の船種、船型および船速ともその分散が大きい混合流であることをあげることができる。したがって補完的な航路計画に

表-2 要因と水準

要 因	水準	レ ベ ル 内 容
A. 船型構成	1	備讃瀬戸の西行観測データ
	2	水準 1 の大型船舶を 1.5 倍
B. 船舶発生パターン	1	ピーク数 1, ピーク率 3/4
	2	ピーク数 1, ピーク率 1/2
	3	ピーク数 1, ピーク率 1/4
	4	ピーク数 0
C. 安全確認領域	1	2000 m
	2	2500 m
D. 減速による最小船間距離の補正率	1	95%, 75%, 60%
	2	95%, 80%, 70%
E. 最小船間距離	1	垂線間長 (L) × 8.4
	2	L × 8.4 × 0.8
F. 航路規制	1	有り
	2	無し
H. 占有レーン数	1	L × 1.5
	2	L × 1.0
I. 船速規制	1	無し
	2	有り
J. シフト所要時間	1	旋回試験の観測データ
	2	J <sub>1</sub> × 1.2

\* 表-3 参照

表-3 船種構成

船 種	貨物船	タンカー	客 船	フェリー	機帆船
発生比率					
主航路	0.50	0.20	0.05	—	0.25
横断航路	0.06	0.40	0.03	0.80	0.07

おける容量を増大させる有効な計画手段の一つとして、航路通航船舶に関する速度、通航位置の規制を考える。

船舶の速度規制としては、航路通航船舶の最高速度を 10 ノットとする。これは瀬戸内海航路の現状に近い水準である。

通航位置規制としては、500 トン以下の小型船の通航位置を航路中心より外側半分の水深の浅い所のみで規制する。これは航路の拡張にとまらぬ深瀬の経済性という観点からみても妥当なものであろう。

#### b) 標示要因

船舶の到着パターンは、航路と港湾との位置関係により異なる航路に固有の要因である。ここでは、ピーク率との関係で 4 種類の水準を設定した。船型構成は主航路と副航路では当然異なる。さらに将来の造船技術の革新による大型化も予想される。ここでは現状の値と大型化の一例として、現状の大型船比率を 50% 増した水準を設定した。

他の要因は統計的誤差の影響による変動に関する標示要因と考えられ、その変動範囲を水準 1, 水準 2 として



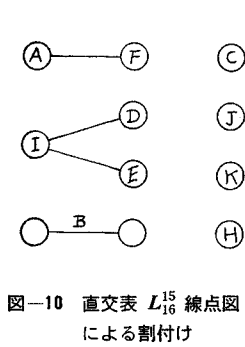


図-10 直交表  $L_{16}^{15}$  線点図による割付け

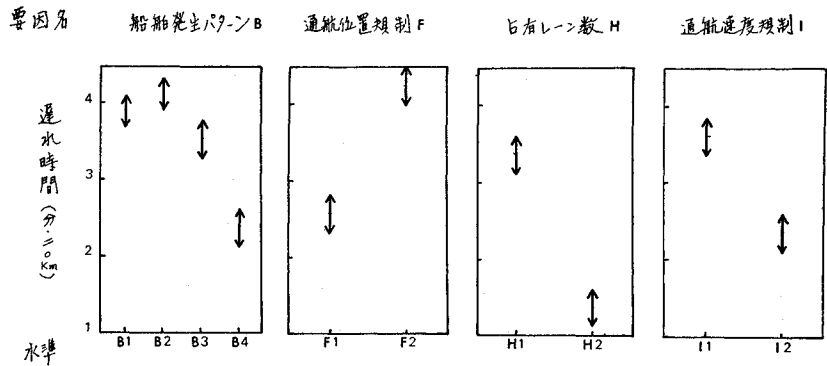


図-11 航路システムの要因効果図

取ることとした。たとえば横方向閉塞領域を指定する占有レーン数は、 $L$  と  $1.5L$  の説があり、本分析では水準1として  $1.5L$ 、水準2として  $L$  を取った。

表-2 の要因を直交表  $L_{16}^{15}$  の線点図により、図-10のように割り付け、FACOM 230-60 により実験を実行し、分散分析表-4を得た。表-4 に示す寄与率より、次のようなことが指摘できる。ここでは、航路幅員は600 m とした。

当然の結果ではあるが、占有レーン数  $H$  が一番支配的であり、その寄与率は約 57% である。図-11 の要因効果図をみると、この要因が  $H_1=1.5L$  より  $H_2=L$  に変化することにより、システムの特性値である遅れ時間は3.4分より1.4分になり、約2.5倍の変化をすることがわかる。このことは図-7の要因間の関連図と合わせて考えれば、直接的には横方向の閉塞領域が、そして船種、船型構成も間接的にはあるが、システムを規定する重要な要素であるといえよう。

他の本システムの標示要因は、いずれもその寄与率が10% 以下であり、その設定の差異による影響は少なく、一応安定したシステムであるといえる。しかしその中で図-11 に示したように、船舶の発生パターンは水準2

で特性値が最大値を持ち、水準4で最小値を持つ要因であることは注目に値する。これは波動性が交通流に大きな影響を与えることを示している。

航路への船舶到着パターンはその航路の独自の特性であり、一般に航路の交通容量は、日当りのものと時間当りのものとの間に線型的な関係が成立しなくなる。このことは計画段階において、この要因を標示因子とするかどうかの十分な吟味が必要であることを意味する。

制御要因である通航位置規制Fおよび速度規制Iの寄与率は、おのおの約9%、16% である。これは占有レーン数に次ぐものである。

このことより航路の渋滞・拡張と同様、上位の計画構想を実現するための計画化の有効な手段として、これらの規制を考えることが重要である。われわれは後の分析において再度この問題を取り上げ、より具体的な規制について検討を加えることにする。

### (3) システムの環境要素の分析

航路計画システムは4節で設定されたモデルに陽表的には含まれない要素を多数持つ。その一つとして潮流は船舶交通にかなりの影響を与えるものと考えられる。潮流は図-7の要因間の関連より、船舶の速度と前方向閉塞領域の変化としてモデルに導入される。

一般に船舶の操船性能は対水速度に関係しており、船舶の大きさと潮流の流速の程度にもよるが、船速は潮流速分だけ加減される。潮流のある場合の前方向閉塞領域としては、前述の調査結果にしたがい式(3)の関係式を採用した。

他の要因としては主航路を横断する船舶数と航路通航位置規制を取りあげた。これは前述の(2)の分析結果に基づき、航路通航位置規制のより具体的分析を行なうためである。

ここでは次のような水準の規制を取り上げた。

水準1; 規制なし

水準2; 速度に着目し、低速船である機帆船を航路外

表-4 分散分析表

要因	自由度	SS	mS	F	$\rho$ (%)
A	1	0.0751	0.0751	—	0.03
B	3	6.6415	2.2138	51.85	5.16
C	1	0.6627	0.6627	15.52	0.49
D	1	0.3332	0.3332	7.80	0.23
E	1	3.1108	3.1108	72.85	2.43
F	1	1.3400	1.3400	265.57	8.95
A×F	1	0.0119	0.0119	—	—
H	1	71.6672	71.6672	1678.39	56.73
I	1	20.1651	20.1651	472.25	15.94
J	1	2.1581	2.1581	50.54	1.68
K	1	0.0501	0.0501	—	0.48
I×E	1	0.0337	0.0337	—	—
I×D	1	9.9949	9.9949	234.07	7.88
e	4	0.1708	0.0427		
ST		126.244			100.00

側 200 m に、ランク 3 以上の高速船を航路内側 400 m に規制し、混合流を分離した。ただしフェリー、客船のランク 2 も高速船に含まれる。

水準 3；船舶の大きさに着目し、フェリー、客船を除くランク 1 の小型船を航路外側 200 m、ランク 4 以上の大型船（ランク 3 のフェリー、客船を含む）を航路内側 400 m に規制する。

次に横断船舶数は、主航路に優先権の指定がない場合、その増加が主航路の機能停止の事態を引き起こすと予測されるために取りあげた。

しかし、本分析では潮流および航路通航規制の効果を主とする。したがって横断船舶の水準は、主航路が正常に機能しうる程度のものを想定した。

以上 3 要因と水準を整理すると表-5 となる。

表-5 要因と水準

要因	水準	レベル内容
A. 潮流	1	逆流 2 ノット
	2	潮流なし
	3	順流 2 ノット
B. 航路規制	1	航路規制なし
	2	船速による分離規制
	3	船型による分離規制
C. 横断隻数	1	通航船舶なし
	2	0.07 隻/分
	3	0.15 隻/分

実験は FACOM 230-60 を用い、直交表  $L_9^4$  による表-6 の割付け表に従って実施し、9 個の資料を得た。

実験は  $\lambda$  の各水準で十時間のシミュレーションを行な

表-6 要因割付け表

要因	1	2	3	4	5	6	7	8	9
潮流	1	1	1	2	2	2	3	3	3
位置規制	1	2	3	1	2	3	1	2	3
横断隻数	1	2	3	2	3	1	3	1	2
誤差	1	2	3	3	1	2	2	3	1

い、時間当りの影響船舶比率を求め、その平均値が 80% となる  $\lambda$  を決定する。次にこの  $\lambda$  を到着率として、その時の旋回回数、減速回数の平均値を求めた。

ここに影響船舶比率とは、通航完了船舶数に対する旋回、減速を行なった船舶数の比率である。

表-7 はシミュレーションで求められた影響船舶が 80% となる到着率  $\lambda$  を特性値とする分散分析表である。

表-7 分散分析表

要因	自由度	SS	mS	F	$\rho$ (%)
A	2	0.307	0.153	65.4	57.53
B	2	0.193	0.096	41.15	35.86
C	2	0.021	0.010	4.38	3.02
E	2	0.005	0.002	1.00	—
e	0	0	0		(3.59)
ST		0.524			100.00
誤差	2	0.005	0.002		

\* 到着隻数  $\lambda$  を特性値とする。

この表より、横断船舶 C の寄与率をみれば 3% であり、一応われわれが想定したようにその影響があまりない状態にあることが確認できる。しかし、その効果の量は小さいといえども、図-12 の要因効果図より、この要因の水準の増大にともなって、特性値が容量減少の方向に変化していることより、この要因の重要性が推測される。われわれは、この横断船舶の影響については次節で改めて考察を加えることにする。

環境要素である潮流 A は (II) の分析結果と要因関連図とからも推測されるように 57% という大きな寄与率をもつ。大きな混合流である船舶交通流においては速度差および前方閉塞領域長の分散が大きな影響力をもつ。

潮流は、式 (3) でモデルに導入される。この場合、速度は潮流  $u$  の正、負に応じて、右あるいは左に  $|u|$  だけ移動するだけであり、分散は変化しない。

しかし、閉塞領域は  $u/L$  の項のため分散が変化する。 $L$  がある値以上では潮流の影響は小さいが、 $L$  が小さい小型船では影響が表われ、したがって分布の下方が  $u$  の正負により左右に移動する。

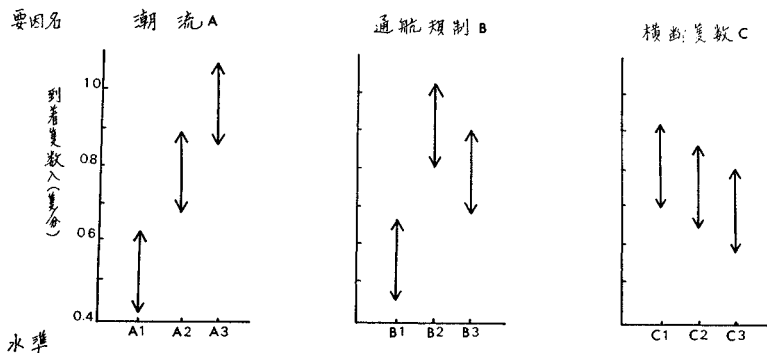


図-12 要因効果図

図-12の要因効果図における順潮、逆潮の関係は上述の理由によるものである。すなわち逆潮では閉塞領域の分散が大きくなり、影響船舶が増大する結果である。

船舶交通においては、ある範囲では旋回と減速は補完的な関係にある。

航路通航位置規制は旋回範囲を制限するものである。表-7の分散分析表によれば航路通航位置規制Bの寄与率は36%であり、その効果は図-12に示されている。

これより規制による旋回制限にともなう減速の増大は規制による混合流の分離の効果により、あまり大きくならないことがわかる。これは船速を要因とする規制である水準2と船舶の大きさを基準とする水準3を比較すればより明らかである。すなわち図-13において水準2

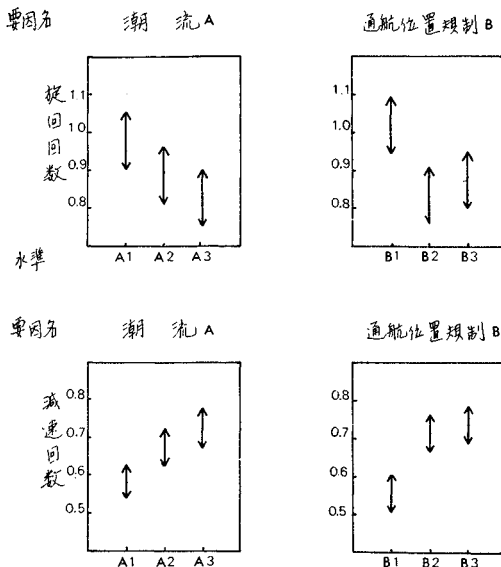


図-13 旋回、減速回数に対する要因効果図

が旋回、減速回数についても水準3を上まわり、 $\lambda$ で与えられる容量を増大させている。これは単位、速度ともに大きな分散をもつ船舶混合流においては、速度による分離が有効であることを示している。ただ船舶は、前述したように、垂線間長と船速が単調な関数関係にあるから、速度による分離は、船型の分離をも含んでいることになる。

## 6. 二、三の数値実験について

われわれは、本システムを用いて、二、三の数値実験を実施した。

### (1) 航路交通容量の推定

われわれは航路交通容量の外的基準として、(1) システムの状態ベクトルが、大きく変化する点、(2) 影響船舶

比率が80%となる点および、(3) 時間当りの到着船舶隻数と通航完了隻数にある程度差が生じる点を用いて相互の容量の比較を行ない、航路の交通容量の定義に関する二、三の検討を行なった。

本分析では、航路幅600mの直線の主航路に幅員700mの横断航路が直角に交差しているモデル航路を対象とする。

標因子として、横断船舶数は5.(3)の分析の水準2と3の中間値で、かつ現在の瀬戸内海航路の50%増の6隻/時間、主航路の船種、船型構成は、備讃瀬戸の現状値である5.(2)の分析での水準A<sub>1</sub>を想定した。到着パターンは、簡単のためピークなしの水準B<sub>1</sub>を採用する。

システムの状態ベクトルは、減速回数、旋回数、遅延時間、侵入待ち時間、および異常減速ブロック数の5個の値をその要素とする。

到着隻数 $\lambda$ (隻/分)を0.1きざみで増加させ、おのおのレベルで10時間のシミュレーションを実施し、上述の5個のシステム状態ベクトルの構成要素との関係をおのおの求め、図-14を得た。

同様にして求めた $\lambda$ と影響船舶比率、通過完了隻数との関係は図-15、図-16に示すようになった。

(1)の外的基準に対しては、図-14の各グラフは $\lambda=0.6$ 以上でその特性値が急増することが観察されることより、その容量は36~42(隻/時間)程度であるとみることができる。同様に(2)に対しては、39~45(隻/時間)、(3)に対しては、36~42(隻/時間)という値になり、いずれにしてもこの場合の航路の時間当りの交通容量は、40隻/時間前後と考えられる。

システムの状態ベクトルの各要素は、サービス水準規定項目に対しては、たとえば、(1)、(6)の項目は、遅延時間、侵入待ち時間の関数であり、(2)~(5)は減速回数、旋回数、侵入待ち時間、および異常減速ブロック数の関数となる。

サービス水準に関する外的基準は明確な操作的定義をもたない。われわれの分析は、システムの状態ベクトルにより、これに対する一つの操作的定義を与える試みである。

それに対して、(2)、(3)の外的基準はより一層明確なスカラー量で定義されており、その水準を指定することにより、容量が確定する。しかし、いずれにしても最終的な容量の確定には、恣意的な側面が残されている。分析結果によれば、これらの外的基準は、システムの状態ベクトルの微係数最大、影響船舶比率80%、および入力、出力の乖離が20%という水準で同一の容量を与えている。

これら恣意性を含む外的基準に対して、操作的分析と

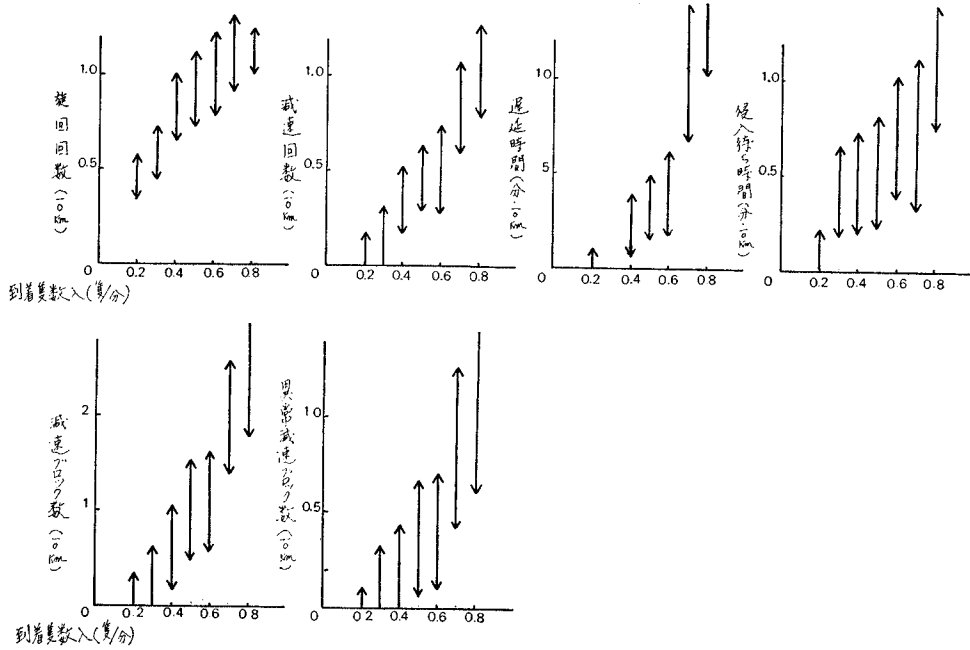


図-14 システムの状態ベクトルの変化

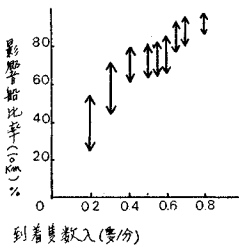


図-15 影響船舶比率

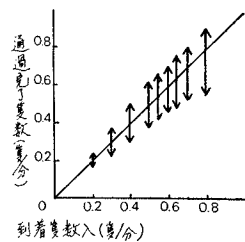


図-16 通過完了隻数と到着隻数

同時に経験的妥当性が十分に検討されることが必要であろう。

(2) 船舶交通流における群の発生

これらグラフでのもう一つの特徴は、λの増加に伴う分散の増大である。

これは低速の小型船舶に大型船が追従した場合、船舶交通流の密度分布に粗、密が発生する結果である。その

状況は、図-17 のシステム状態の出力図において、明確に観察される。

図-17 はランク7の船舶 281 の前方に、ランク1の低速の小型船があり、横方向閉塞領域が確保できないために、追越ができず、No. 281 の大型タンカーの後方に群が発生した状況の出力である。

No. 281 の大型タンカーは、まず No. 279 の低速の機帆船に追従し、さらに9ブロックでさらに低速のNo. 268 の機帆船に追つき、No. 279 の機帆船は、それを追越せるが、No. 281 のタンカーは横方向閉塞領域が確保できないため、これに追従することになっている。

群の規模は、ブロック番号が進むにしたがって増大し、13ブロックでは、20隻程の船舶が前方向閉塞領域を減速ともない35%に減じ<sup>3)</sup>、異常減速で追従している。

この群の発生は、明確な車線の概念をもつ道路交通と非常に異なる所である。また、統計処理の時間間隔の取り方により、群の影響が表われ、分散が異なることになり、この決定が重要な問題となる。

(3) 横断船舶の影響の分析

前節の(2)の分析でも指摘したように、平面交差である航路では、横断船舶の増大は主航路の機能低下、ひいては機能停止を引き起こすことが予想される。

瀬戸内海航路においては、神戸、大阪港を目的港、あるいは出発港とする主航路に、中国一四国間の日発定期船、フェリー、および客船の航路が交差しており、その

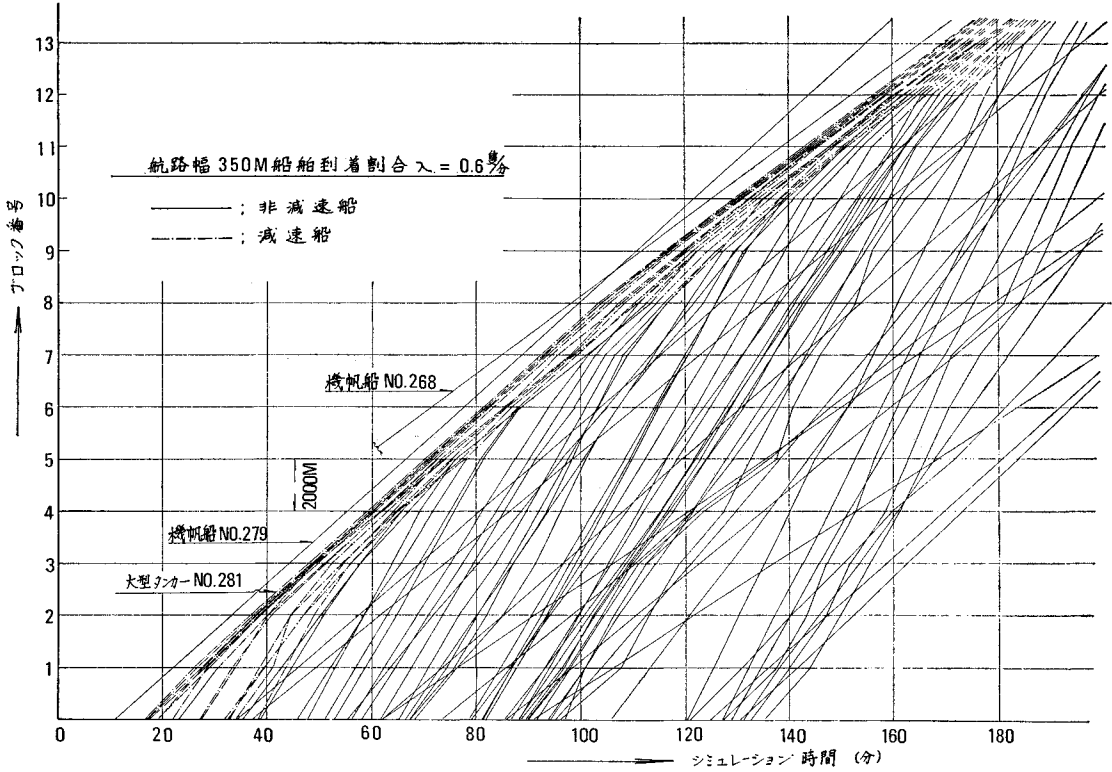


図-17 群の発生状況

需要は、主航路はもちろん横断航路においてもますます増大する傾向にある。

本研究では、現状の約2倍の24隻/時間の主航路交通流の場合について、横断船舶の影響を分析する。ここで取り上げた時間当たり24隻の航流量は、その船種、船型構成にもよるが、(I)の分析結果により、現在の瀬戸内海航路の容量以内にあると考えられるものである。

主航路の通過完了船舶数と横断船舶数との関係は、シミュレーション結果より図-18となる。横断船舶数が

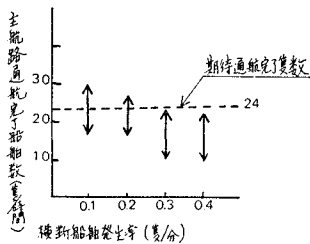


図-18 横断船舶の影響

0.1 (隻/分) の場合は、主航路への到着隻数 24 (隻/時間) と通過完了船舶数は一致しており、その影響はない。しかしそれが 0.2 (隻/分) になると通過完了隻数が、

22 (隻/時間) となり、横断船の影響があらわれる。0.3 (隻/分) ではシミュレーションシステムの待機船規約による横断船舶の到着停止が、2~3分程度発生し、0.4 (隻/分) ではそれは10~12分程度のものが3回発生する。すなわち、主航路交通量が24 (隻/時間) 程度の場合は、横断航路の容量は  $\lambda=0.2$  すなわち 9~12 (隻/時間) 程度となる。

現状の瀬戸内海航路では、横断船舶は平均5 (隻/時間) 程度である。これはピーク率を考慮すれば、航路交通容量の限界に近いものであると想像される。

いま、海上交通の現状をみれば、臨海部の開発に伴い増加の一途をたどっている。

特にポートアイランドの建設、大阪湾および瀬戸内海沿岸地域の大規模プロジェクトの進展に伴って、そこでの交通量は、飛躍的に増大することが予想される。したがって、これら増大する船舶交通に対して十分な航路容量がフィジカル (physical) に獲得できるかどうかが大きな問題となってくる。このため、これら開発構想は、その補完的システムである航路の交通容量という新たな観点から再検討を加えることの必要性のあることを指摘することができるであろう。

## 7. 結 言

航路は、港湾計画、地域計画の補完的システムであり、その計画にはシステム論的計画理論が実効的である。

本研究で開発されたシステムは、まず対象化し、その安定性を実験計画法により分析、確認した。

次に幅員 600 m の航路の交通容量を分析し、時間当たり 40 隻という値を得た。また、主航路交通量を 24(隻/時間)とした時の交差航路の容量として、10(隻/時間)を得た。

瀬戸内海航路の現状での船舶交通量をみてみると、幅員 400 m の来島中水道、幅員 700 m の備讃瀬戸北水道では、ピーク時における通航船舶は、おのおの約 30 隻/時間、20 隻/時間となっている。したがってこれらの値と現状での航路の実感的混雑感とを対比すれば、上述の容量はかなり妥当なものといえる。

6. (2) の分析でも指摘したように、群の発生は、航路幅員と船種、船型構成により異なる。この群の発生は、船舶交通流の分析において非常に重要なものといえる。また図—11で指摘したように、到着パターンによって、システムの応答状態が異なり、その容量も変化する。

このように、航路交通容量の概念化には、種々の問題があることは明らかであろう。特に、

① 航路固有の特性としての到着パターン、船種、船型構成等の標示要因の標準化

② 群の発生に伴う“車線”概念の変更  
および

③ 外的基準の操作的定義とその経験的妥当性の検討は重要な課題といえる。

また、分析過程を通じて、われわれは瀬戸内海地域の開発構想を航路交通容量の側面より再検討することの必要性を強く感じたことを報告しておく。

最後に、本研究に全面的な協力と援助をいただいた運輸省第三港湾建設局の各位と、船舶交通の特異性につ

き、有益な示唆をいただいた神戸商船大学 山口 篤教授、松木 哲助教授、浜畑勇技官、さらに本論文作成に当り、終始ご指導いただきました京都大学 吉川和広教授を始め研究室の各員に感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) スコット・グリア (奥田・大坪訳)：「現代都市の危機創造」, 鹿島出版会 (昭 45)
- 2) D.R.J. Tinbergen：「Project Criteria」
- 3) 藤井弥平・田中健一：「海上交通工学序説」, 船舶 Vol. 42, No. 7~10
- 4) 運輸省第三港湾建設局：「来島海峡通航船舶航跡調査報告書」, 昭 42 年 12 月
- 5) 運輸省第三港湾建設局：「備讃瀬戸通航船舶航跡 調査 報告 書」, 昭 43 年 3 月
- 6) 運輸省第四港湾建設局：「関門航路における通航船舶調査報告書」, 昭 43 年 3 月
- 7) 藤井弥平 他：“船舶の閉塞領域について”, 日本航海学会誌, 昭 41 年 7 月
- 8) 谷 初蔵：“Crash-Astern 操作の停止距離におよぼす船の旋回の影響”, 日本航海学会誌, 昭 40 年 7 月
- 9) 原 潔：“船舶交通の統計的特性— I”, 日本航海学会誌, 昭 41 年 7 月
- 10) A.V. Gafarian and C.J. Ancker：“Mean Value Estimation from Digital Computer Simulation”, M.S, Vol. 15, 1965
- 11) Thomas, H. Naylor and J.M. Finger：“Verification of Computer Simulation Models”, M.S Vol. 14 No. 2, 1967.
- 12) 宮川公男：「PPBS の原理と分析」, 有斐閣, 昭和 44 年 11 月
- 13) 長尾義三：「港湾工学」, 共立出版, 昭 44 年 5 月
- 14) 運輸省第四港湾建設局：「関門航路における船舶交通容量に関する研究—交通容量におよぼす潮流の影響について—」, 昭 43 年 3 月
- 15) 運輸省第三港湾建設局：「瀬戸内海航路の余裕水深と航路幅員に関する調査報告書」, 昭 39 年 3 月
- 16) 山口篤利・黒田 隆：“狭水路における操船者の緊張感”, 日本航海学会誌, 昭 40 年 12 月
- 17) Martin K. Starr：“Planning Models”, M.S Vol. 13 No. 4, 1966
- 18) オスカー・ランゲ (鶴岡重成訳)：「システム的一般理論」, 合同出版, 昭 44 年 8 月
- 19) T. Hermanson：“Information System for regional development control”, Regional Science Association papers XXII 1969

(1970.9.7・受付)