

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

田中健一*・渡辺健次*・山田一成*・金丸貞己*・有村信夫*・浜島金司*

Navigational Traffic Phenomena on Narrow Straits (C—III) An Investigation of the Marine Traffic Control by a Simulator

By

Ken'ichi TANAKA, Kenji WATANABE, Kazunari YAMADA,
Sadami KANEMARU, Nobuo ARIMURA and Kinji HAMAJIMA

Abstract

An investigation of the marine traffic control for a restricted water area was made with the aid of a traffic simulation, which uses a simulator with closed loop systems containing human operators reported in the previous paper.

In the Kawasaki District of Keihin Harbor, the operation started in 1973, in which the marine traffic has been centrally controlled by a control officer with the signal lights, and the preferential passage has been allowed for large vessels. This district was chosen as a model area in this simulation.

The series of runs of the simulation was successively processed without a serious trouble.

The influence of the traffic volume under the operation of the signal control on traffic performance characteristics, such as average travel times, waiting times and collision rates of ships, etc. was clarified by the simulation. The results obtained from the simulation will provide effective data for evaluations of the traffic control systems.

Further, it seems that the simulator is available as a tool for solving other marine traffic problems.

1. ま え が き

船舶輻輳水域における交通の安全性と輸送能率の向上を意図して、海上交通情報機構がいち早く海上保安庁により計画され、その一部は東京湾で運用実施されるに至った。その機構の一環として、集中信号制御方式による狭い水域での船舶交通管制業務が、モデル的に、昭和48年より京浜港川崎区および横浜区におい

て施行され、引続いて他の諸港においても運用実施される機運にある。

当所では、従来より船舶交通システムの研究を展開し、有効適切な交通システムの設定を目標に考察を進めてきた。前記の情報機構の業務実施にかんがみ、その信号による管制を主体とした船舶交通流システムの制御の適正化と、海難防止の技術開発への寄与を目標として、新たに試作した船舶交通流制御シミュレータ¹⁾を用いてシミュレーションを行うこととした。

* 共通工学部 原稿受付：昭和53年1月17日

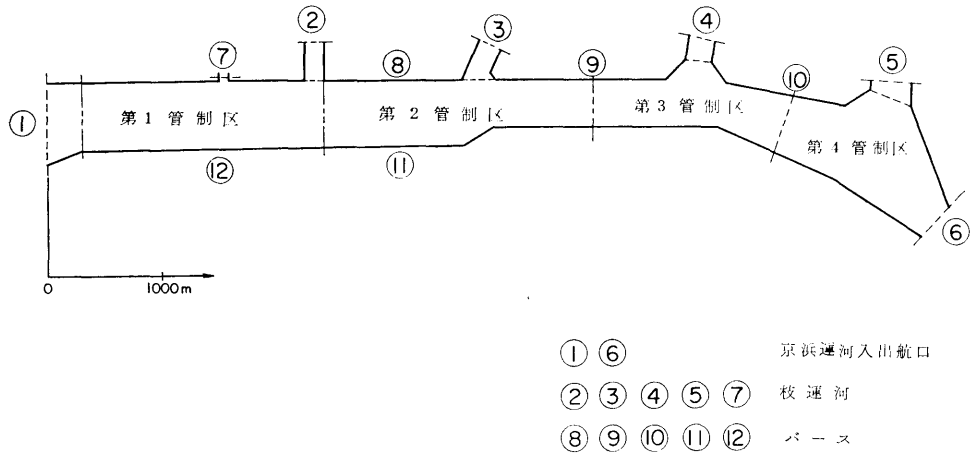


図-1 京浜港川崎区のモデル

この場合の研究のねらいは、前記の京浜港川崎区の信号制御方式による航行管制をケーススタディとしてとりあげ、交通量が増加した場合に招来されるであろう問題点の探索とその解決への指針を得ることに置き、併せて、交通流制御シミュレータの実用性の検討をも行おうとした。

2. シミュレーションにおけるモデル水域の状況

前述のように、本研究で採用した対象水域は、京浜港川崎区であるが、同区は航路延長約8km、幅員400～600mの京浜運河を主航路とし、これとこれに付随した数本の枝運河からなる。区内各所には多数のバースが設置されている。

本研究のシミュレーション実施に当っては、便宜上同区を図-1に示すようにモデル化した。すなわち、この図では水深の浅い航行禁止区域などは含まれず、その区域の境界線は適当な折れ線近似をもって示してある。また、この図で①～⑫は京浜運河入出航口、枝運河、バースなど船の入出航口を示すが、これらも実状に比べてかなり簡略化されており、特に、⑧～⑫のバースは幅広いバース区域を適宜纏めて縮小した地域に限定している。なお、同図には、現行の管制区分である第1、第2、第3および第4の管制区が示されている。

シミュレーションの実行に当っては、船舶交通流制御シミュレータの構成要素である船舶情報表示装置を必要とするが、この装置は図-1の水域モデルを実寸の1/1000の大きさとした図を模造紙に書き、これを

卓上に貼布して作成した。

3. シミュレーションにおける交通条件と交通流制御の方法

当所では、信号による航行管制が施行される以前の昭和47年10月に、この京浜港川崎区において、船舶交通量の実態観測調査を行っており、その結果を用いて、シミュレーションにおける各入航口の入航船データを作成した。

その観測は昼間連続(6.00～17.00)3日間にわたって行われたが、そのデータを集計し、昼間の日平均交通量1309隻/11時間(119隻/時)が得られたので、これを標準交通量とした。この観測では、水路の主要

出航 入航	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	計
①		56	41	78	69	108	19	3	2	4	3	4	387
②	58		9	17	15	33	4	1	1	1	1	0	140
③	36	8		13	9	20	0	0	0	0	0	0	86
④	81	18	15		25	46	7	1	0	2	1	2	198
⑤	62	14	9	23		36	4	0	1	1	0	2	152
⑥	110	32	23	45	39		11	2	1	2	2	2	269
⑦	16	3	0	6	4	9		0	0	0	0	0	38
⑧	3	1	0	1	0	2	0		0	0	0	0	7
⑨	2	1	0	1	0	1	0	0		0	0	0	5
⑩	4	1	0	2	1	2	0	0	0		0	0	10
⑪	3	0	0	1	1	2	0	0	0	0		0	7
⑫	4	0	0	2	2	2	0	0	0	0	0		10
計	379	134	97	189	165	261	45	7	5	10	7	10	1309

表-1 OD表(6.00～17.00) 単位隻数

表-3 船舶モデル諸元

船種 (船の大きさ)	全長 m	全幅 m	最適速度 m/sec	旋回半径m	停止距離m
1. 引き船	25~150	5	2.8	10	12
2. 100トン	25	6	4.3	47	96
3. 500トン	46	9	5.0*(5.1)	87	223
4. 1,000トン	59~89	11	5.0*(5.5)	114	320
5. 3,000トン以上	90~200	16	5.0*(6.2)	175	570

* 制限速度

表-2 船種構成表

船種 (船の大きさ)	隻数	構成率%
1. 引き船	66	5.0
2. 100トン	1,139	87.1
3. 500トン	54	4.1
4. 1,000トン	23	1.7
5. 3,000トン以上	27	2.1

分岐点で各船の進路方向がほぼ求められたので、このデータをもとにし、これに多少の推定値を挿入して、交通量(混合交通)のOD構成の概要を求めた。このようにして得られたOD表を表-1に示す。この表におけるたてよこの①~⑩はいずれも図-1に示されているモデル化された水域の入出航口に対応した番号を示したものである。また、表-2には、この観測から得られた船種(主として船の大きさ)の構成隻数と構成率を分類して示してある。

シミュレータの構成要素としての船舶モデルは、船舶情報表示装置の大きさにならって縮尺1/1000とし、厚紙を用いて作成し、その上面に、船舶の一連通し番号(船番号)およびODを表わす数字記号を明記し操船オペレータの操作が便利になるようにした。この場合の船舶諸元は表-3に示されるようなものであり、これらの値は文献2)の計算式により求めた。

シミュレーションは入航船の交通量および信号管制施行の有無をパラメータとして実行された。交通量はOD表における隻数割合および船種構成率をそれぞれ一定にして、標準交通量(119隻/時)の1倍、1.5倍、2倍および4倍の場合のものを与えた。ここで、交通量が4倍で、管制施行時の場合は、シミュレーションの実行が困難となることが、交通量2倍のシミュレーションの実行で分かったので割愛した(すなわち、シミュレーションは7通りについて実行した)。

また、モデル水域の航行船舶には、船舶航行管制の実態を参考にして次の制限を課した。

- (1) 引き船は⑧~⑩のバースに接岸しない。
- (2) 管制対象船(船舶モデル4および5の大型船)は①、⑥の入出航口のいずれか一方のみを通る。
- (3) さらに、信号管制に関しては、管制施行時、前記の第1、第4の両管制区では、それぞれ管制対象船の入航に際して、他のすべての船舶がこれらの管制区内で、この管制対象船と行き会わないように、管制区入口で適宜減速、回避して停船を行うこととした。この停船を義務づけた制約は現行の規制に対して、いくぶん苛酷なものであった。

なお、このシミュレーションのステップ時間は4T=1分、操船オペレータは常時6名、交通制御オペレータは1名とし、当所の研究員が当たった。これらのオペレータは予め演習を通じて、それぞれのオペレーションに熟達させるようにして、シミュレーションの実行に臨んだ。

4. シミュレーションの実行結果と交通制御法の考察

4.1 シミュレーションの実行

このシミュレーションでは、モデル水域内に全く船の無い状態から、予めプログラムされた順序に従って、各入出航口に独立に各船が出現し、その船はそれ以後操船オペレータが行う他船、陸岸などの障害物の回避操作に伴う操船オペレーションによって所定の入出航口まで運航される行程をたどる。したがって、この各船の初期条件としては、入航口に現われたときの位置座標と初速度(ベクトル)が与えられる。設定の交通量ごとに管制施行時のシミュレーションがこの状態から開始され、十分な時間(100ステップ以上)を経過して、この条件での必要な交通流特性諸量の把握が行われたのち、この管制施行を解除して、管制のない場合の状態、同様な諸量の把握ができるまで継続させることとした。したがって、シミュレーション開始時および管制施行解除時の過渡的な交通現象は当然

表-4 平均遅れ率統計表

シミュレーションの 目標交通量 (119隻/時)	管 制 あ り					管 制 な し				
	標準 交通量 (119隻/時)	シミュレ ン時間 分	船種 <i>l</i> (船の 大 きさ)	隻数 <i>n_l</i>	船種別の <i>k_l</i> の平均	船種別の <i>k_l</i> の平均 の標準偏 差	シミュレ ン時間 分	船種 <i>l</i> (船の 大 きさ)	隻数 <i>n_l</i>	船種別の <i>k_l</i> の平均
1	199	1	16	0.188	0.266	101	1	9	0.079	0.089
		2	373	0.271	0.485		2	183	0.120	0.132
		3	16	0.392	0.363		3	11	0.300	0.257
		4	8	0.474	0.254		4	2	0.247	0.269
		5	13	0.402	0.431		5	3	0.099	0.016
		*	426	0.280	0.472		*	208	0.129	0.147
1.5	155	1	25	0.178	0.187	106	1	13	0.074	0.096
		2	445	0.280	0.412		2	337	0.139	0.552
		3	17	0.350	0.299		3	27	0.102	0.116
		4	8	0.616	0.651		4	11	0.167	0.235
		5	10	0.293	0.196		5	12	0.234	0.221
		*	505	0.283	0.405		*	400	0.138	0.484
2	37	1	4	0.167	0.233	109	1	30	0.080	0.075
		2	49	0.181	0.346		2	451	0.141	0.154
		3	2	0.318	0.197		3	27	0.190	0.134
		4	1	0.516	0.000		4	10	0.275	0.190
		5	6	1.083	0.856		5	11	0.205	0.177
		*	62	0.277	0.492		*	529	0.144	0.153
4						94	1	28	0.062	0.198
							2	637	0.148	0.233
							3	31	0.245	0.259
							4	23	0.354	0.356
							5	26	0.325	0.223
							*	745	0.161	0.243

* の欄は、出航船の全隻数および全船舶に関する k_l の総平均と、その標準偏差。

$$k_l = \frac{T_l}{T_l^0} - 1, \quad T_l^0 = L_\gamma / V_{0l},$$

L_γ : 各入航口出航口間の航路長,

T_l : 船種別の通過時間 (分),

V_{0l} : 各種の最適速度。ただし、 V_{0l} がこの水域の制限速度より大きい場合はこの制限速度の値とする。

存在することになる。しかし、入航口が各所に存在し、そこでの入出航船がたえずあることや交通流における均一化、整流化の作用が働くためと思われるが、4~6ステップで、ほぼ定常とみなされる状態に達しているようである。

シミュレーションは、このような手順で実行に移されたが、特別の支障をきたすこともなく進捗し、表-4に示される実際の船舶交通の運用に当たるシミュレ

ーション時間のあいだ実行された。このシミュレーションに要した実行時間は1つの条件のもとで本機種の場合20~100時間程度であった。大型電子計算機を用いた在来のシミュレーションで必要とするコンピュータ時間に比べて、このような過大な実行時間を要することは、機種改善などにより、短縮化が計られるものの、オペレータの人数に制限がある以上、必然的につきまとう短所であるというべきであろう。なお、前

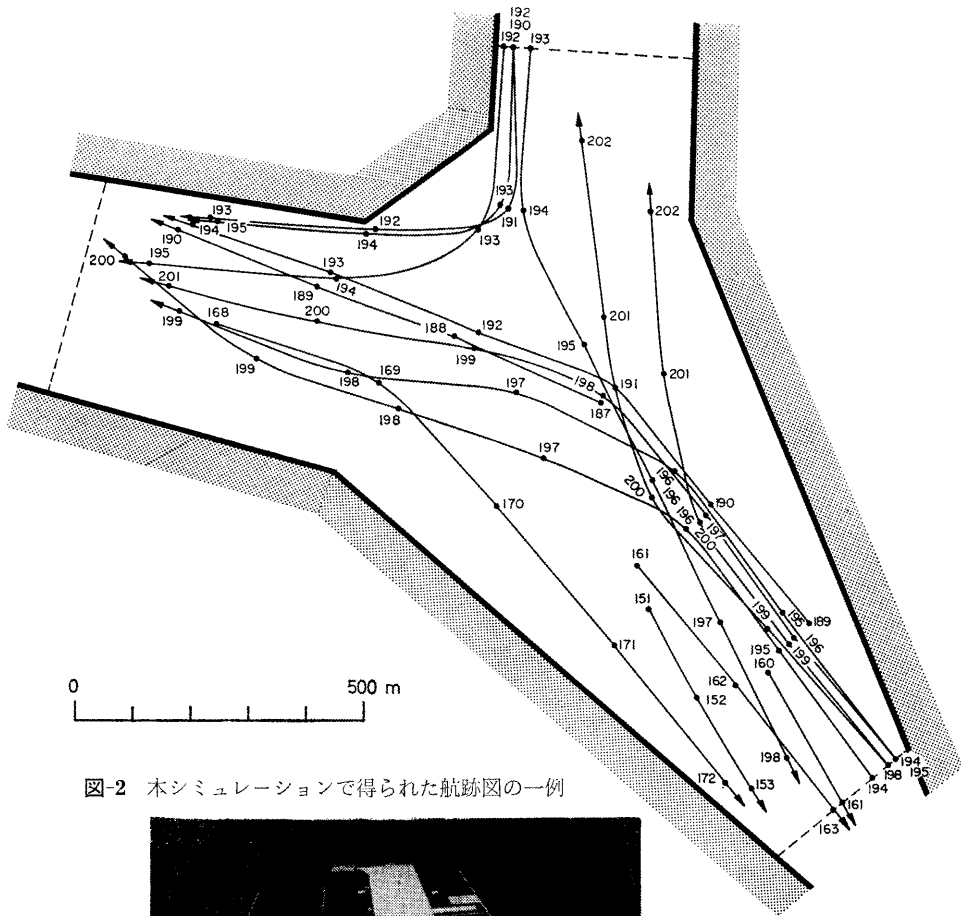


図-2 本シミュレーションで得られた航跡図の一例

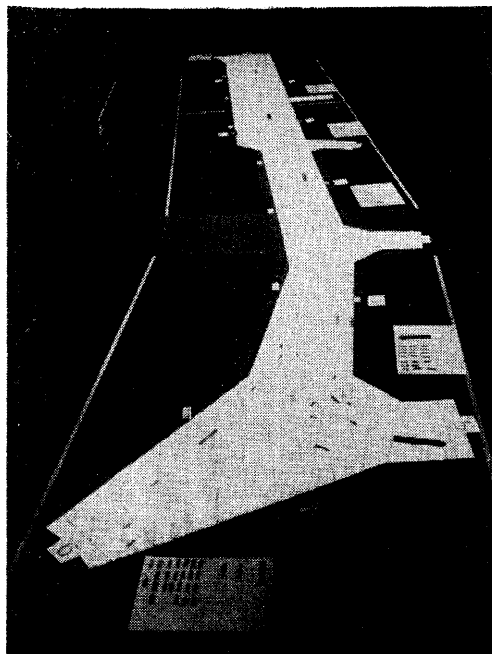


図-3 シミュレーションにおける船舶交通流の状況

述のように、2倍交通量、管制施行の場合は、途中で船舶の通過不能が明らかになったので、その時点でシミュレーションの実行を打切った。

図-2は、このシミュレーションで得られた航跡図の一例である。これは、各時刻における船ごとの位置座標を滑らかな曲線で結んで得られたものであり、図中の数字はステップ数(時刻)を示している。極端な航行状況を示す航跡は認められず、各船の操船はほぼ妥当であることが窺い知られる。

図-3の写真は、このシミュレーション実行時における水路内の船舶交通流の状況を示したものである。

4.2 シミュレーション結果

このシミュレーションにおいては、各時間ステップにおける各船に関する多くの交通流特性を示す統計量が集計された。これらの主な集計結果を以下に示す。

(1) 平均通過遅れ率とその標準偏差

このシミュレーションで取扱われた各船はそれぞれのODに応じて通過時間(水域を通過するのに要する時間)を持つが、この通過時間の統計量が、管制施行の有無、交通量をパラメータとして、どのように変化するかを検討した。この問題に関しては、すでに、その一部を発表した³⁾が、そこではODについての重みづけがなされていないので、結果は必ずしも合理的であるとはいいがたく、傾向を知るのに止まるものと考えられた。

そこで、ここでは、通過遅れ率を定義し、その集計結果の統計表を表-4に示した。

いま、番号 η であるODのO-D間の航路長 L_η 、その大きさを示すタイプ番号 l である船舶の最適速度(最適速度が対象水域の制限速度より大きい場合はその制限速度) V_{ol} のとき、推定通過時間 T_l° は $T_l^\circ = L_\eta / V_{ol}$ で表わされる。一方、シミュレーションから得られた l の大きさの船舶の通過時間を T_l とする。これらから、通過遅れ率 k_l は $k_l = T_l / T_l^\circ - 1$ と定義する。

このようにしておけば、通過時間が基準化されるので、各ODについて重みづけが行われたと考えてよいであろう。

また、前に述べたように、シミュレーションから得られた通過時間には、シミュレーション開始時および管制解除時の過渡的影響が含まれるので、これらの影響に対する補正も行った。

すなわち、シミュレーション開始時の影響については、水域内の全船舶数が十分多くなった時点(開始後

4~6ステップ)以後の通過時間からそれ以前もこのような通過時間の割合で航行したものとし、また、管制解除時の影響についても、同様に、それ以後の通過時間の割合でそれ以前も航行したものとした。

表-4は、これらの配慮を行って、船舶別に k_l の平均とその平均の標準偏差を表示したものである。

サンプル数(隻数)の少ない場合は一概にいえないが、その多い $l=2$ などの場合についていえば、管制の有無によるこの k_l の平均の違いは顕著に出ていると考えられる。これは、管制のない場合の遭遇(encounter)による通過時間の増加より、管制施行による停船の待ち時間が余計に利いてくるためであろう。管制施行の有無にかかわらず、交通量の増加に従って、遭遇回数が増し、その結果、通過時間は増大すると考えられるが、この統計表における k_l の平均の推移からは、この傾向が示されているものの、標準偏

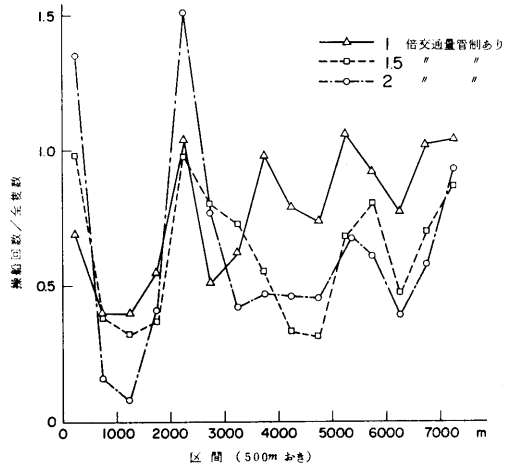


図-4(a) 区間別操船回数分布

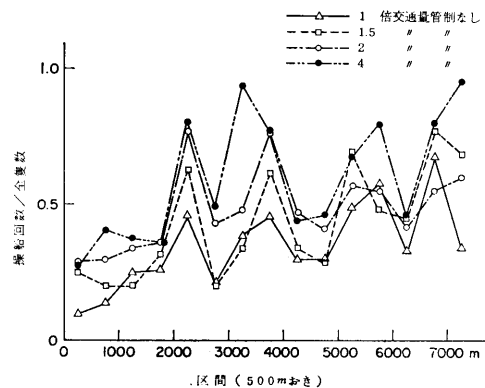


図-4(b) 区間別操船回数分布

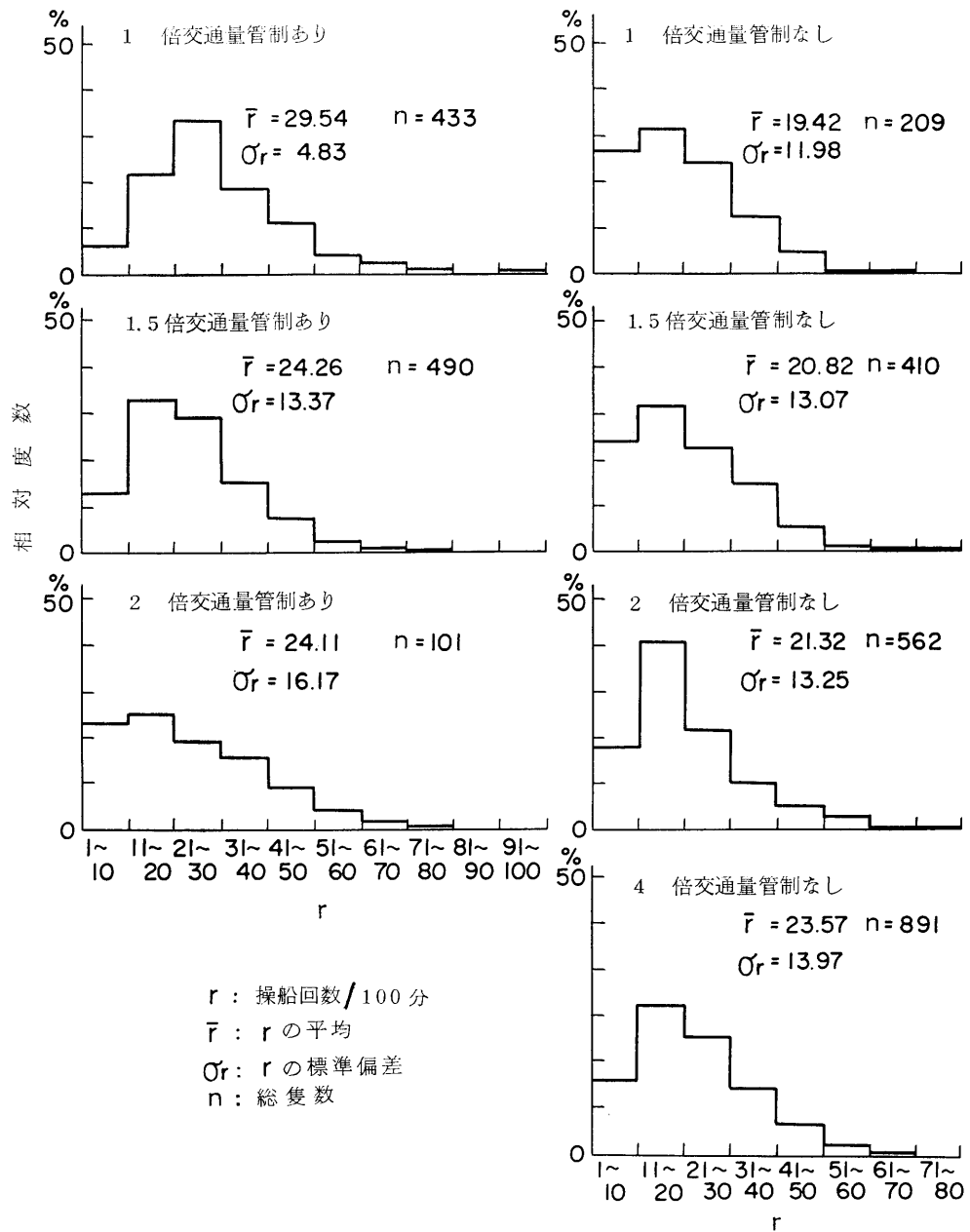


図-5 操船回数の度数分布

差の大きさからいって、このことが確定的であるとはいい難いようである。なお、ここで注意すべきことは、 $T_i - T_i^0$ の符号、したがって k_i の符号は必ずしも正であるとは限らいことである。

この表では、参考までに、* 欄に、同一条件出航船

の全隻数について、船舶の大きさに関する重みづけが一定であると仮定したときの k_i の平均とその標準偏差を載せておいた。この仮定の上に立つものであるが、前述の管制施行の有無や交通量の影響の傾向は割合よく示されているようである。

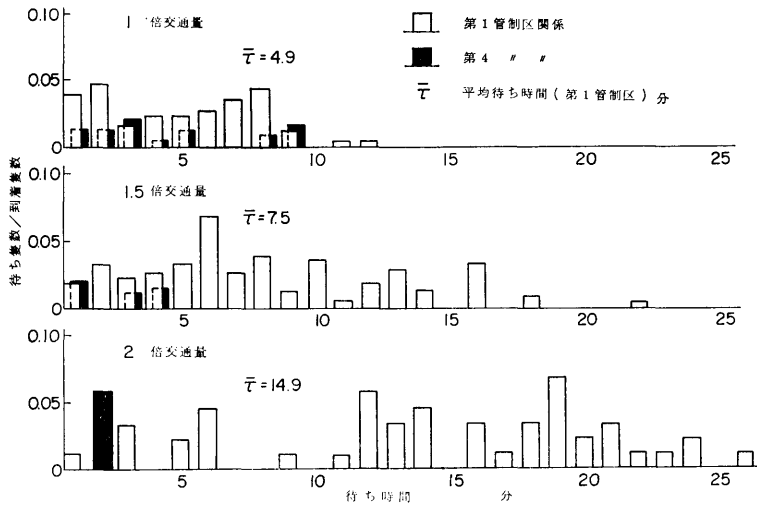


図-6 管制区入口における船舶の待ち時間分布

なお、本報告の末尾の方に、付録として、この表に用いられた通過時間に関するシミュレーション結果の詳細な表を示しておく。

(2) 操船回数

図-4(a), (b)は、図-1の直角座標の原点から、矢印の方向に500mおきに、水域を区切ったとき、各区间における操船回数の分布状況を図示したものである。ここでいう操船回数は、前報¹⁾で述べたように実船で数回の操作を必要とする回頭または変速の操船操作を便宜上1回の操船操作として纏めた形で表わしたものである。したがって、直接実船の操作に結びつくものではないが、ほぼ実船の操船回数に比例するものとみて大過なからう。図-4(a)に示される管制施行時、0~500mおよび2000~2500mの区間に、この条件のもとにおけるシミュレーション時間中の総隻数当り操船回数のピークが集中しているのは、第1管制区での船待ちのための減速・回避・停船の諸操作によるものと思われる。第4管制区で、このピークが顕著に出ないのは、管制対象船との行き会いが少なく、したがって、ここでの待ち船が少なかったためであろう。また、図-4(b)の管制なしの場合の操船回数分布の状況は、概して交通量の増加に比例して、この操船回数が増加しているようであり、この傾向の現われるのは、船舶相互の遭遇による避航のためと推定される。また、交通量にかかわらずほぼ一定の場所にいくつかのピークが現われているのも、そこでの遭遇が多いことを示しているように思われる。

一方、図-5では、水域全体として、交通量、管制施行の有無をパラメータとして、操船回数の度数分布を示したが、管制施行時の方が、操船の度数が多くなる傾向や管制なしの場合、交通量の増加に伴い同様に度数が多くなる傾向が顕著に出ている。これらは、図-3と対応して当然のことではあろうが、前述のように遭遇増加の傾向によるとみてよからう。

(3) 船舶の待ち時間分布

図-6は管制施行時、第1および第4の管制区での管制対象船の通過を待つ船舶のその待ち時間分布を示したもので、当然平均待ち時間は交通量の増加にしたがって増大し、ある交通量に達すると水域の通過が不可能となる待ち時間無限大という事態に至るという結果が得られている。なお、この統計量と待合わせ理論との対比(第1管制区のみ)を付録2に示した。それによると、管制対象船(大型船)の入航により、他のすべての船舶がこの区域外に出て、その通り抜けるのを待つという管制方式の待ち時間の理論計算がかなりよくシミュレーション結果に合うようであり、このような理論の適用は妥当であると考えてよからう。

(4) 衝突件数と乗揚げ件数

図-7と図-8は、それぞれ交通量に対する時間当たりの衝突件数と乗揚げ件数を図示したものである。ここでいう衝突とは、シミュレーション中、個々の操船オペレータの判断で、2船の航跡がおおむね同一時刻で交差した場合を申告させて衝突と名付けたもので、当然異常接近のデータが多く含まれていると考え

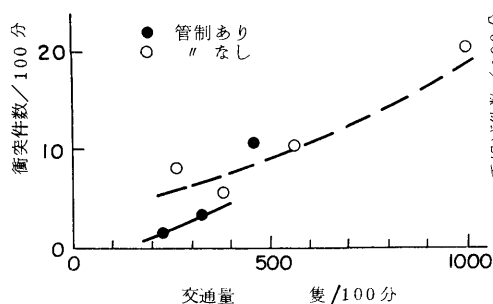


図-7 衝突件数と交通量の関係

られるものである。したがって、限定時間の範囲をか
なりせばめた場合の遭遇と考えるとよかろう。プロッ
トの数が少なく断定することはできないが、この時間
当たりの衝突件数は、割合に、交通量をパラメータと
した管制施行の効果の傾向がよく出ているように思わ
れる。すなわち、管制施行の場合は、管制対象船とは
勿論中小型船どうして遭遇の機会が減少して、結果と
して、この衝突件数が減じたものと思われる。

図一八の乗揚げも、同様該船が設定された水域内
から離脱したと個々の操船オペレータにより判断され
た場合に、そのオペレータの申告をもって乗揚げとし
ている。この場合、点のばらつきがめだち、傾向は見
出し難いようであるが、強いていえば管制施行の結果
乗揚げが増加しているようにとれる。考えられること
は、管制区入口で待ち船が多くなると、後続の入航船
がこの待ち船との追突を避けるため航路側方への回避
操作を行い勢余って乗揚げとなるケースが多くあると
いうことである。この場合、入航船に対し、十分広い
緩衝帯 (buffer zone) を設けておけば、この件数は
多くなかったかも知れない。実現象として、管制施行
時この件数が多くなることが本質的なものかどうか今
後調査研究を行う必要があるように考えられる。

4.3 本シミュレーション結果と交通流制御法に 対する考察

このシミュレーションが支障を招くことなく完了し
たことによって、システム内の閉ループ中に人間オペ
レータ (操船オペレータおよび交通制御オペレータ)
を介在させるシミュレータ方式によるシミュレーシ
ョンが手法として成立つ可能性のあることが示された
ことになる。すなわち、総延長8 km余りの対象水域の模
擬モデル中に、交通量が500隻/時に達するような交通
条件のもとでも、個々の船舶が数人の操船オペレータ

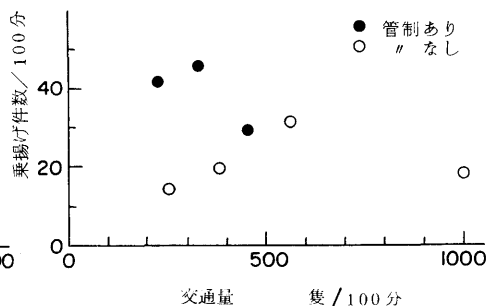


図-8 乗揚げ件数と交通量の関係

によって処理できることが示された。

また、交通流特性を示す統計量は交通条件、交通流
制御方法などによりかなり明瞭な傾向を示しており、
一部を除いてほぼ合理的と思われる結果が得られた。
したがって、これらの統計量のいくつかは、船舶交通
システムの評価量としての指標となると考えてよかろ
う。

シミュレーション結果から、管制対象船 (大型船)
の管制区の通過に際し、他船が同区の区域内で、これ
と行き会わないように、管制区入口で待機する管制方
式を採った交通流制御法は大型船とは勿論中小型どう
しの遭遇を極度に制限し航行安全の目的に十分適って
いると推論される。

しかし、同時に、予想されることではあるが、この
交通流制御法は、交通量が増加するにつれて、管制区
入口での待ち船が多くなり、遂には航行船舶の通過不
能の事態を出現する欠陥を持つ (本シミュレーション
の例では、2倍交通量のととき通過不能となった)。し
たがって、本交通流制御法適用における交通量や船種
構成などの限界も当然存在すると考えてよかろう。

5. む す び

本研究は、京浜港川崎区の管制方式による交通流制
御法を新たに製作したシミュレータを用いたシミュレ
ーションを通じて検討したものである。最初の試みと
して行ったケーススタディに過ぎないが、システム中
のオペレータとしての人間の持つ恣意的な面は、この
シミュレーションのプロセスの中で十分反映されてい
るように思われる。そして、そのシミュレーション結
果も定性的にはかなり合理性を持つものと考えられる
に至った。したがって、本手法による交通流制御法の
考察は、大局的見地から比較的妥当な結論を導き得た

ものと思われる。そこで、多大のシミュレーションの実行時間を要するにも拘らず、在来の大型電子計算機を援用した船舶交通流シミュレーションと並行して、ときにはその短所を補って、本手法活用の意義は十分存在するものと推論される。

しかし、これらはシミュレーションという実現象代替えのオペレーションの上での結果であって、実際の避航操船に伴う微妙な心理面などは必ずしも十分に模擬し得ぬこともあろうかと考えられるので、本手法の適用にもおのずと限界が存在することになるであろう。また、この手法は直接人間をシミュレータのループ中にくりこんでいるため、シミュレーション実行時、船舶交通情報を得てたえず反応せねばならない。したがって、労力負担は長時間つねにつきまとうことになる。今後、周辺装置の充実や機器の開発などによって、この労力負担の軽減化を図る必要もあるように考えられる。

終りに、本研究の遂行に当って、ご援助賜った海上保安庁警備救難部に対し、感謝の意を表する次第である。

付記：本報告は昭和50年12月当所の研究発表会で講演した内容⁹⁾に加筆したものである。

参 考 文 献

- 1) 山田一成，田中健一，渡辺健次，有村信夫，金丸貞己，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—II）船舶交通流制御シミュレータの開発，船舶技術研究所報告，第15巻第3号，昭和53—5.
- 2) 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）船舶の航行容量の試算，船舶技術研究所報告 第3巻第5号，昭41—9.
- 3) 田中健一，山田一成：シミュレータによるモデル水域船舶交通流制御シミュレーションの試み，日本航海学会論文集 第56号，昭51—12，p. 114.
- 4) 田中健一，渡辺健次，山田一成，金丸貞己，有村信夫，浜島金司：シミュレーションによる船舶交通流制御法の研究（その2）——オペレーション結果について——，船舶技術研究所研究発表会講演集 昭50—12，pp. 86—89.

付録1. 通過時間に関するデータ一覧表

この表に用いた記号は以下のようである。

O-D : 入航口-出航口 (番号は図-1の番号に対応)

L : O-D間の航路長 (km)

n_l : 船舶の通過隻数

(1) 管制あり (1倍交通量)

O-D	L	$\sum n_l$	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i					
1--2	2.91	18					11.3	14	0.42	0.41													
1--3	4.23	11					13.4	13	0.34	0.31													
1--4	6.12	27	36.4	1	0.17	0.00	23.9	26	0.15	0.18	23.5	1	0.17	0.00			20.5	1	0.27	0.00			
1--5	7.63	19					22.6	17	0.23	0.19	23.7	1	0.16	0.00			21.4	1	0.02	0.00			
1--6	8.00	32					21.0	31	0.06	0.12	22.7	1	0.05	0.00					5.5	1	0.63	0.00	
1--7	1.64	6					6.4	5	1.03	0.77													
1--9	4.37	1					19.3	1	0.04	0.00													
1--11	2.97	1					11.1	1	0.21	0.00													
2--1	2.19	17					10.1	15	0.27	0.23	8.6	1	0.25	0.00	8.6	1	0.25	0.00					
2--3	2.10	2					9.7	2	0.08	0.05													
2--4	4.41	3					17.1	3	0.27	0.23													
2--5	5.94	1					23.0	1	0.09	0.00													
2--6	6.23	12					24.2	12	0.16	0.13													
2--7	1.03	1					4.2	1	0.18	0.00													
3--1	4.07	11	23.4	1	0.27	0.00	13.4	8	0.19	0.15	13.2	1	0.21	0.00			13.2	1	0.06	0.00			
3--2	2.03	4					8.1	4	0.14	0.05													
3--4	3.00	6	17.3	1	1.07	0.00	11.6	3	0.20	0.24													
3--5	4.07	6					17.3	6	0.28	0.13													
4--1	1.81	17	34.3	2	0.14	0.10	22.3	15	0.17	0.13													
4--3	3.01	11					13.1	11	0.13	0.22													
4--5	4.41	6					8.3	6	0.41	0.46													
4--6	5.10	3					10.3	3	0.20	0.09													
4--7	2.01	16					10.9	14	0.47	0.36					9.4	1	0.17	0.00	9.4	1	0.28	0.00	
4--9	4.33	6					16.3	4	0.31	0.25													
4--11	7.81	12	47.1	1	0.09	0.00	26.7	10	0.12	0.30	24.7	1	0.13	0.00									
5--2	1.71	4					21.1	2	0.30	0.17	16.1	2	0.32	0.17									
5--3	3.01	2	23.3	1	0.03	0.00	11.1	1	0.00	0.00													
5--4	2.00	10	14.1	2	0.12	0.04	7.9	6	0.64	0.71													
5--6	1.47	10					5.7	9	0.23	0.12													
5--11	6.12	36	48.4	2	0.11	0.07	31.3	30	0.08	0.18	27.1	1	0.03	0.00									
6--2	6.06	11					23.5	19	0.13	0.06	20.2	1	0.14	0.00									
6--3	4.72	1					13.3	2	0.09	0.00													
6--4	2.07	12	19.7	1	0.00	0.00	11.2	10	0.16	0.12													
6--5	1.10	10					4.6	12	0.50	0.16	4.6	1	0.52	0.00	4.0	2	0.52	0.00	4.0	1	0.52	0.00	
6--7	6.64	2					21.8	2	0.14	0.12													
6--8	3.00	3					19.6	3	0.19	0.17													
6--9	3.10	1					13.6	1	0.64	0.00													
6--10	1.69	1					6.2	1	1.60	0.00													
6--11	7.03	1					27.3	1	0.26	0.00													
7--1	1.10	5	6.9	1	0.12	0.00	5.3	4	0.29	0.09													
7--4	4.00	2					18.9	2	0.06	0.06													
7--5	7.10	2					29.1	2	0.33	0.22													
7--6	6.69	2					23.9	2	0.20	0.04													
8--1	2.97	7					11.3	5	0.11	0.29					9.9	2	0.21	0.00					
8--2	1.00	2					4.1	2	0.70	0.49													
8--4	3.23	3					12.7	3	0.21	0.04													
8--6	5.09	1					19.7	1	0.27	0.00													
8--9	4.69	4					16.2	2	0.22	0.03													
8--11	2.71	3					10.7	3	0.22	0.20										15.6	2	0.70	0.29
9--4	1.78	2					6.9	2	2.16	1.51													
9--6	3.00	3					13.7	3	0.18	0.18													
10--1	6.47	2					25.1	2	0.00	0.00													
10--4	1.13	3					4.4	3	1.37	0.71													
10--6	1.70	3					6.9	2	0.45	0.00					5.9	1	0.25	0.00					
11--1	3.19	6					12.4	3	0.14	0.34													
11--4	3.16	2					12.2	2	0.09	0.20													
11--5	4.69	3					16.2	3	0.19	0.09													
11--6	5.06	2					19.6	2	0.04	0.06													
12--1	1.44	3					4.6	1	0.44	0.00	4.8	1	0.46	0.00	4.8	1	0.46	0.00					
12--4	5.00	3					19.4	3	0.20	0.13													
12--6	6.78	1					26.3	1	0.03	0.00													

(2) 管制なし (1倍交通量)

O-D	L	$\sum n_l$	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i	T_i^*	n_i	\bar{k}_i	σ_i
1--2	2.91	7					11.3	7	0.06	0.06								
1--3	4.23	5					13.6	5	0.07	0.05								
1--4	6.12	9	45.4	1	0.01	0.00	26.9	8	0.06	0.03								
1--5	7.63	10					29.6	9	0.05	0.05								
1--6	8.00	10					31.0	12	0.03	0.02	26.7	1	0.16	0.00				
1--7	1.64	3	9.9	1	0.22	0.00	6.4	2	0.15	0.00								
1--11	6.75	1																
2--1	2.19	1					5.1	1	0.15	0.00					22.3	1	0.02	0.00
2--3	2.10	4					10.1	3	0.09	0.00	8.6	1	0.16	0.00				
2--4	4.41	1					9.7	1	0.03	0.00								
2--5	5.94	1	26.4	1	0.00	0.00												
2--6	6.23	10	37.2	1	0.06	0.00	23.0	1	0.03	0.00	20.8	1	0.10	0.00				
2--7	1.03	2					4.2	2	0.23	0.12								
2--9	4.34	1					3.2	1	0.03	0.00								
2--10	4.91	1					19.0	1	0.05	0.00								
3--1	3.97	6					13.4	6	0.07	0.03								
3--2	2.03	4					8.1	2	0.21	0.03			</					

6-- 1 8.12 59	48.4 2 0.03 0.00	31.5 57 0.04 0.12	70.2 3 0.11 0.05		
6-- 2 6.06 9	36.1 1 0.01 0.00	25.5 5 0.09 0.02	18.7 1 0.07 0.00		
6-- 3 4.72 17		18.3 16 0.10 0.02	15.9 1 0.07 0.00		
6-- 4 2.97 16	17.7 1 0.30 0.00	11.5 12 0.07 0.00	9.9 1 0.07 0.00		4.0 1 0.52 0.00
6-- 5 1.19 32	7.1 2 0.27 0.00	6.27 0.49 0.17	4.3 2 0.12 0.00		
6-- 6 5.06 1		21.8 3 0.14 0.13			
6-- 7 3.50 1		19.6 1 0.07 0.00			
6-- 8 1.69 2		13.0 1 0.15 0.00		5.6 1 0.42 0.00	
6-- 9 5.41 1		6.5 1 0.28 0.00			
6-- 10 1.10 8		21.0 1 0.00 0.00			5.0 1 0.60 0.00
7-- 1 1.72 1		5.8 7 0.20 0.00			
7-- 2 4.48 2		6.7 1 0.25 0.00			
7-- 3 7.50 3		18.9 2 0.06 0.00			
7-- 4 6.69 2		29.1 3 0.11 0.00			
7-- 5 2.97 5		21.9 2 0.06 0.02			
7-- 6 1.06 3		11.5 3 0.04 0.00		9.9 2 0.62 0.20	
7-- 7 3.28 4		4.1 3 0.18 0.11			
7-- 8 5.03 6		12.7 4 0.43 0.15			
7-- 9 2.75 6		19.7 6 0.23 0.14			15.6 2 0.26 0.13
7-- 10 1.76 9		18.2 3 0.05 0.03			
8-- 1 6.47 7		10.7 6 0.11 0.14			
8-- 2 4.41 5		6.9 9 0.46 0.40			
8-- 3 1.15 5		13.7 2 0.24 0.07			
8-- 4 1.46 1		21.1 7 0.01 0.03			
8-- 5 1.76 9		17.1 3 0.21 0.18			
8-- 6 3.19 14		4.2 5 0.19 0.17			
8-- 7 3.16 1		5.1 3 0.49 0.00			
8-- 8 4.69 4		6.9 5 0.74 0.13		5.9 4 0.94 0.30	
8-- 9 5.06 5		12.4 7 0.41 0.22			10.6 7 0.51 0.19
8-- 10 1.44 7		12.2 1 0.23 0.00			
12-- 1 5.00 3		13.2 4 0.16 0.10			
12-- 2 6.47 1		19.6 5 0.03 0.04			
12-- 3 6.70 3		6.6 4 0.73 0.22	4.8 2 0.96 0.31	4.8 1 0.67 0.00	
		19.4 3 0.04 0.10			
		23.1 5 0.08 0.04			
		26.3 3 0.05 0.02			

付録2. 管制区における待ち時間の計算

本シミュレーションにおいては、京浜運河の両端に管制区を設け、大型船（管制対象船）がこの管制区にはいる瞬間から他の大型船をふくめてすべての船はこの区域内にはいることを禁じられ、区域内にあった中小船はすみやかにこの区域外に出なければならぬという管制方式をとった。

この管制方式による他船の待ち時間を計算してみる。管制区は大型船の通過する時間 T のあいだ閉塞されていると考えられる。そこで、この閉塞時間の分布をもとめ、次にこの時間内に到着する船の分布を考慮すれば、待ち時間が求められる。しかし、この区域が連続して数隻の大型船によって閉塞されることも考慮にいれなければならない。はじめに、大型船が管制区に到着する間隔が $t \sim t+dt$ である確率を

$$Qe^{-Qt} dt$$

と仮定する。

任意の大型船1隻をとりあげたとき、それが待たされない確率を p_0 とする。そうすると、

大型船1隻のみによって区域が閉塞する確率

$$= p_0 \times \text{次の到着船が待たされない確率}$$

$$= p_0 \times \text{Probability } (t_1 > T)$$

$$= p_0 e^{-QT}$$

となり、これを続けると、

大型船 n 隻によって区域が連続的に閉塞される確率

$$p_n = p_0 \times \text{Probability } [t_1 < T, 0 < t_2 < 2T - t_1,$$

$$\dots, 0 < t_{n-1} < (n-1)T - t_1 - t_2 - \dots]$$

$$t_{n-2}, t_n > nT - t_1 - t_2 - \dots - t_{n-1}]$$

$$= p_0 \int_0^T Qe^{-Qt_1} dt_1 \int_0^{2T-t_1} Qe^{-Qt_2} dt_2 \dots$$

$$\dots \int_0^{(n-1)T-t_1-t_2-\dots-t_{n-2}} Qe^{-Qt_{n-1}} dt_{n-1}$$

$$\times \int_{nT-t_1-t_2-\dots-t_{n-1}}^{\infty} Qe^{-Qt_n} dt_n.$$

t_n について積分すると

$$p_n = p_0 \int_0^T Qe^{-Qt_1} dt_1 \int_0^{2T-t_1} Qe^{-Qt_2} dt_2 \dots$$

$$\int_0^{(n-1)T-t_1-t_2-\dots-t_{n-2}} Qe^{-WQT+Qt_1+Qt_2+\dots+Qt_{n-2}} dt_{n-1}$$

$$= p_0 Q^{n-1} e^{-nQT} \int_0^T dt_1 \int_0^{2T-t_1} dt_2 \dots$$

$$\times \int_0^{(n-1)T-t_1-t_2-\dots-t_{n-2}} dt_{n-1}.$$

$t_1 + t_2 + \dots + t_r = x_r T$ とおくと、

$$p_n = p_0 Q^{n-1} T^{n-1} e^{-nQT} \cdot I(n-1),$$

$$I(n-1) \equiv \int_0^1 dx_1 \int_0^2 dx_2 \dots \int_{x_{n-2}}^{n-1} dx_{n-1}.$$

$I(n)$ を計算する。

$$I(n) = \int_0^1 dx_1 \int_0^2 dx_2 \dots \int_{x_{n-2}}^{n-1} dx_{n-1}$$

$$\times \left[\int_0^n dx_n - \int_0^{x_{n-1}} dx_n \right]$$

$$= nI(n-1) - \int_0^1 dx_1 \dots \int_{x_{n-2}}^{n-1} dx_{n-1} \int_0^{x_{n-1}} dx_n$$

$$= nI(n-1) - \int_0^1 dx_1 \dots \int_{x_{n-3}}^{n-2} dx_{n-2}$$

$$\times \left[\int_0^{n-1} x_{n-1} dx_{n-1} - \int_0^{x_{n-2}} x_{n-1} dx_{n-1} \right]$$

$$= nI(n-1) - \frac{(n-1)^2}{2} I(n-2) + \int_0^1 dx_1 \dots$$

$$\times \int_{x_{n-3}}^{x_{n-2}} dx_{n-2} \int_0^{x_{n-2}} x_{n-1} dx_{n-1}.$$

これを続けると、

$$\begin{aligned} I(n) &= nI(n-1) - \frac{(n-1)^2}{2} I(n-2) + \dots \\ &\dots (-1)^{r+1} \frac{(n-r+1)^r}{r!} I(n-r) + \\ &\dots (-1)^n \frac{2^{n-1}}{(n-1)!} I(1) + \frac{(-1)^{n+1}}{n!}. \end{aligned}$$

数学的帰納法により、

$$\frac{I(n)}{I(n-1)} = \left(\frac{n+1}{n} \right)^{n-1}$$

が証明できる。ゆえに、

$$I(n) = \frac{(n+1)^{n-1}}{n!}.$$

結局、 n 隻の大型船によって区域が連続的に閉塞される確率は

$$p_0 \frac{n^{n-2}}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT}.$$

この確率は、ある時間内で連続 n 隻による区域閉塞のおきる割合を示す。その連続 n 隻の先頭船だけが待たされない船である。単位時間当たりの大型船交通量は Q であるから、 Qp_0 は待たされない船の単位時間あたりの隻数であり、同時に連続 n 隻 ($n=1 \sim \infty$) をひとつのブロックと考えたときのそのブロックの数でもある。したがって単位時間当たりの閉塞時間は

$$\sum_{n=1}^{\infty} Qp_0 \cdot nT \cdot \frac{n^{n-2}}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT}.$$

同時にこれは、交通量と区域内通過時間の積 QT

に等しい。ゆえに、

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT}}.$$

また、今までの議論から、

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-2}}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT} = 1, \text{ ただし } QT \neq 1 \text{ も}$$

容易に証明される。

つぎに待ち時間を計算する。大型船自身の待ち時間については、サービス時間 T の一般の待ち行列問題に帰着される。単位時間当たりの待ち時間総和は、

$$\frac{Q^2 T^2}{1-QT}$$

である。

中小型船の単位時間当たり交通量を Q' とすると、中小型船の待ち時間総和は、大型船 n 隻による連続閉

塞期待値と、閉塞時間内の中小型船到着隻数 $Q'nT$ と、その時間内での待ち時間の平均 $nT/2$ との積をつくり

$$\frac{p_0}{2} QQ'T^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT}$$

となる。 p_0 および級数和の計算はつぎのようにする。

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-2}}{(n-1)!} (QT)^{n-1} e^{-nQT} = 1 \text{ (前出)}$$

において、 $QT e^{-QT} \equiv x$ とおくと、

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-2}}{(n-1)!} x^n = QT$$

$$d(QT)/dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{n-1}}{(n-1)!} x^{n-1} = e^{QT}/p_0.$$

ゆえに、

$$p_0 = 1 - QT$$

という簡単な結果となる。同様な手法をもちいて級数 and を計算し、結局、

$$\frac{QQ'T^2}{2(1-QT)^2}$$

となり、大型船自体のものとおわせて、待ち時間総和

$$S = \frac{QT^2}{2(1-QT)^2} [Q' + 2Q - 2Q^2 T]$$

となる。平均待ち時間は、 $S/(Q+Q')$ であるが大型船の数は中小型船にくらべてはるかに小さいので

$$\frac{S}{Q'} = \frac{QT^2}{2(1-QT)^2}$$

と近似し、大型船それ自体による待ち時間は無視してよい。

つぎに管制施行時のシミュレーションに対応する平均待ち時間の計算結果と、シミュレーション結果をかかげる (第1管制区のみ)。

	シミュレーション時間 (ステップ)	大型船全隻数	観測平均待ち時間 (ステップ)	計算平均待ち時間 (ステップ)
1倍交通量	199	14	4.9	4.55
1.5倍交通量	156	13	7.5	7.20
2倍交通量	37	9	14.9	∞

ただし、 $T=20/3$ (ステップ) とした。2倍交通量では、船待ちが増大しはじめた時点でシミュレーションを打ち切ったので、待ち時間平均は小さくなっているが、実際には待ち時間は無限に大きいと考えてよからう。