

船舶交通システムの研究

—交差交通の研究 その3—

渡辺健次*・浜島金司*

Studies on the Marine Traffic Systems

—On the Intersection Traffic III—

By

Kenji WATANABE and Kinji HAMAJIMA

Abstract

In this paper, the following results in previous papers are verified;

Encounter number per unit time $QQ(\bar{\tau} + \bar{\tau}')$

Total delay per unit time $QQ(\bar{\tau}^2 + \bar{\tau}'^2)/2$

(1) The mean characteristic time $\bar{\tau}$ is calculated from the encounter number observed at Bisan Seto. The reasonable value of $\bar{\tau}$ is obtained.

(2) By means of "manual" simulation, it is shown that the encounter number is proportional to the product of traffic volumes. The formula for total delay is also verified, but there is a large deviation in the case of dense traffic.

1. は し が き

前報 (交差交通の研究 その1¹⁾ およびその2²⁾ では、船舶交通において特に重要である交差する航路での混雑や事故発生、また管制の必要となる条件の決定などが理論的に研究され有用な諸結果が得られた。ここでは、交差水域にランダムに到着する各船舶がそのままの速度および方向を保って直進するとき、他船舶と衝突をするような幾何学的ともいべき衝突すなわちそこで encounter と名づけたものの単位時間あたりの期待値および encounter の結果生ずる衝突を回避するための航行時間のおくれのふたつを基本的な量と考えて、いろいろな条件の下でその値を求めるべく解析をおこなった。その中で、特に基礎的と考えられる交通量のすくない場合、ふたつの航路が交差するときの結果をここに再録すれば

単位時間あたり encounter の期待値

$$QQ(\bar{\tau} + \bar{\tau}')$$

単位時間あたりの時間おくれの総和

$$\frac{1}{2} QQ(\bar{\tau}^2 + \bar{\tau}'^2)$$

となる。ここで、 Q 、 Q' はそれぞれの航路における単位時間あたりの交通量、 τ は船の長さを L 、速度を v としたとき、 L/v で求められる特性時間で、 $\bar{\tau}$ 、 $\bar{\tau}'$ 等はすべての船舶にわたっての単純平均および2乗平均である。

まず、実際の交差交通のある水域において、上のような結果がはたして得られるかどうかをたしかめる必要がある。

また、これら基礎式をもちいて交差する航路がふたつ以上あるとか、交通量の大きい場合とかなどの複雑な条件における結果を求めることができそうであるが、前報において述べたように事柄はそれほど簡単でない。

そこで、実際水路での観測の結果を理論の観点から整理すること、また逆に実際の交通流が理論計算のと

* 共通工学部 原稿受付: 昭和49年1月24日

きに仮定した条件に厳密にしたがうとき結果が基礎式と一致するかどうか、しないとすればどのような場合かを知るこのふたとおりの方法で研究をすすめることにする。後者の方法はたとえばシミュレーションによって実行され得る。シミュレーションの方法は解析の結果をみちびくのに困難な交通量の大きな場合にも有用である。

本報告では、まず備讃瀬戸西部においてレーダを用いて観測した結果得られた船舶航跡写真より交通量と encounter の回数をしらべ、基礎式のチェックをおこなう。つぎに、京浜運河において観測された交通量・到着時刻・速度・船の長さ・種類などをもとにして簡単なシミュレーションをおこない、基礎式の成立をたしかめる。最後に架空水路を設定し、交通量増加にともないどのように基礎式からのずれがみられるかを同様にシミュレーションによってしらべ、この基礎式からのずれの理論的導出をこころみる。

2. 備讃瀬戸西部における観測

この観測は、当研究所において開発されたレーダ連続撮影装置をもちい、昭和46年8月、海上保安庁によっておこなわれたもので、整理に使用したデータはその一部である。また、撮影プログラムの改良の結果、細かい動きまで観測できるようになっている。

図-1 に観測のおこなわれた海域をしめす。○印はレーダの位置で、島が多数存在するため電波がさえぎられて届かず、観測範囲が制約されている。主要な航路としては図にしめした A, B, C があり、A, B はほとんど交差しておらず、航路 A を航路 C をとる船舶はレーダ画面の左側でかなり合流している。したがって完全な交差交通としては B, C のみであり、整理は

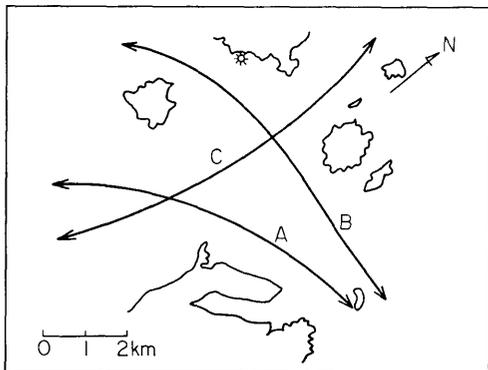


図-1 備讃瀬戸西部

このふたつの航路に限ることとした。整理対象時間は8月17日12時より8月20日4時までの64時間である。

整理方法はつぎのようである。まずフィルムの各コマには、はじめは1分間隔、つぎは2分間隔でそれぞれの船の位置が合計3点重ねて撮影されている。さらに各点はそのあいだの航跡をしめす細い線でつながれている。フィルムの各コマは5分間に相当し、これら各コマをさらに重ねてゆくと全航跡が得られ、各航路での交通量が得られる。つぎに各コマ上で回避をおこなっている船の存在をチェックする。回避をおこなうことは encounter を前提としているから、それをひとつの encounter とみなしてかぞえることができる。図-2 はその一例であって、B と C, A と C の回避航跡をしめす。

このようにして、表-1 に時間ごとの交通量および encounter 回数をまとめてある。

全データの合計をもちいて基礎式をたしかめてみよう。統計的結果であるからサンプル数は多いほどよく1時間だけのデータなどでは不足なことが明らかである。さて

$$\bar{r} = \bar{r}'$$

とおけない理由はいまのところない。したがって encounter の回数は

$$2\bar{r}QQ'$$

となり

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{1}{2} \frac{27/64 \text{ 時間}}{774/64 \text{ 時間} \times 293/64 \text{ 時間}} \\ &= 13.7 \text{ sec} \end{aligned}$$

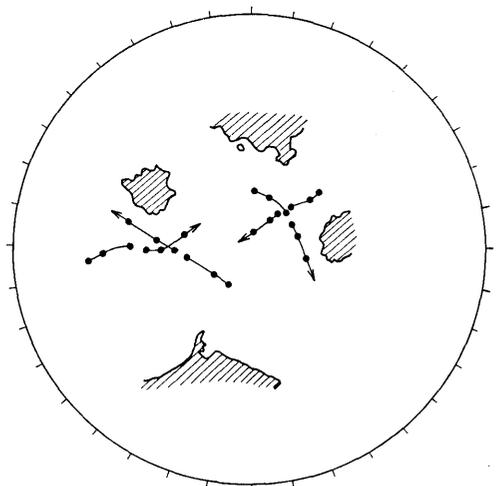


図-2 encounter の例

表-1 備讃瀬戸における2航路の交通量, encounter 回数

月 日	時 刻	Q_B	Q_C	encounter	月 日	時 刻	Q_B	Q_C	encounter
8.17	12	3	6	1	8.19	21	23	6	1
	13	8	6	1		22	29	3	1
	14	11	4	1		23	11	5	
	15	11	9			0	22	7	
	16	10	6			1	18	4	
	17	9	0			2	12	1	
	18	13	4			3	13	5	2
	19	13	9	1		4	13	1	
	20	13	5	1		5	9	4	
	21	22	6	3		6	15	6	
8.18	22	13	5		7	11	5	1	
	23	22	5	2	8	7	5		
	0	13	7		9	4	8		
	1	22	4		10	12	2	1	
	2	11	3	1	11	8	6		
	3	12	3		12	5	4		
	4	8	2		13	5	3		
	5	9	3		14	8	8	1	
	6	12	6		15	7	4		
	7	10	3		16	10	4	1	
	8	18	9	1	17	13	3		
	9	10	3		18	12	4	1	
	10	9	3		19	13	5		
	11	13	7		20	13	5		
	12	7	6	1	21	15	6		
	13	12	6	1	22	20	5		
	14	12	4	1	23	17	6	1	
	15	6	4		8.20	0	13	5	1
	16	13	1		1	12	3		
	17	6	4		2	7	1		
18	12	6		3	7	3			
19	12	2							
20	15	5	1						
					計		774	293	27

が得られる。

このレーダフィルムからは船の長さは求めることができない。また

$$\bar{\tau} = \bar{L}/\bar{v}$$

とは一般になり得ない。しかし、長さ 50m の船の巡航速度は 10 ノット、長さ 100m の船は 12.3 ノットぐらいであることが知られており、それぞれ、 $\tau=10$ sec, 16 sec が得られるから、この水域で巡航速度で航行していると見てよいことを考えあわせて $\bar{\tau}=13.7$ sec と

いう結果は基礎式の成立をしめしていることになる。

3. 京浜運河における観測および交差交通シミュレーション

昭和47年9月、筆者らのグループによって京浜運河交通流観測がおこなわれた。同運河は 図-3 のように、長さ約8キロメートルの主運河と6個の枝運河とからなっている。観測は、主運河に沿ってえらんだ6個所での通過時刻および各枝運河への出入時刻・船の

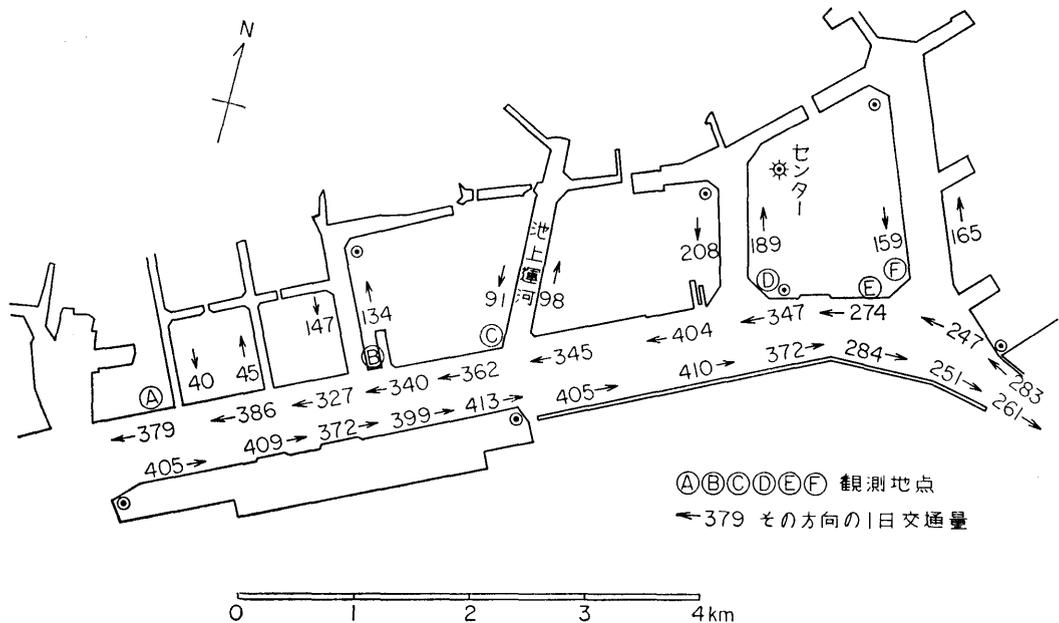


図-3 京浜運河観測実施図

種類・進路などを記録することによりおこなわれた。この観測の目的は、水路全体での船舶の動態を総合的に把握することであった。

一方、枝運河への分岐点は T 字型の三差路とみなされ、交差交通のモデルとしてえらぶことができる。その例として 図-4 の池上運河分岐付近をえらび、ここでの観測データをもとにしてシミュレーションをお

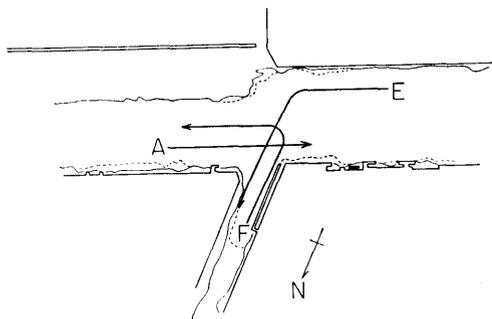


図-4 池上運河分岐付近

こなうこととした。この付近すなわち 図-3 の ③ 地点での観測によって得られたデータをつぎにしめす。

図-5 は上記分岐付近での 1 時間あたり交通量の変化である。観測は 3 日にわたり、毎日 6 時より 16 時ま

での 11 時間おこなわれた。図-5 は各日ごと東行すなわち東京方面、西行すなわち横浜方面および枝運河出入の 3 とおりに分けて図示してある。図-6 はこの分岐に、つぎつぎに到着する各船の時間間隔分布を 3 日間総合してとったもので、典型的な指数分布とみなされ、到着はランダムであると考えてよい。図-7、図-8 は、それぞれ船の種類ごとの長さおよび速度分布であって、別の時期におこなわれた観測結果*をもちいた。この観測結果* からまた特性時間 τ の平均値を計算できるが、その値は

$$\bar{\tau} = 13.0 \text{ sec}$$

である。

これらのデータからつぎのようにシミュレーション用のデータをつくりあげる。まず、図-7、図-8 の分布をもつように各時刻に到着する船に、種類ごとに長さ、速度をわりあてる。これは、計算機で乱数を発生させ、累積分布関数と比較する標準的方法で容易におこなわれる。各船はそれぞれ到着時刻・長さ・速度が指定されているわけであるが、これらの到着時刻をそのままにして、第 1 日と第 2 日のデータを重ね合わせ、さらに第 3 日のデータを重ね合わせて、交通量が約 2

* 昭和 39 年

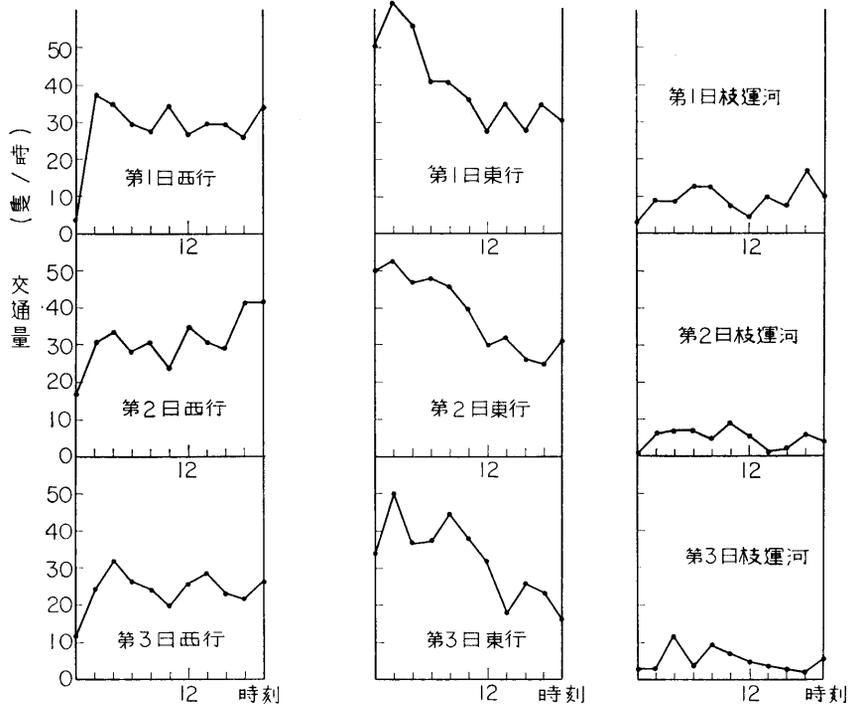


図-5 交通量時間変化

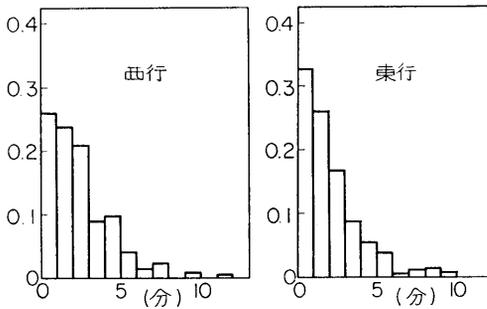


図-6 到着間隔分布

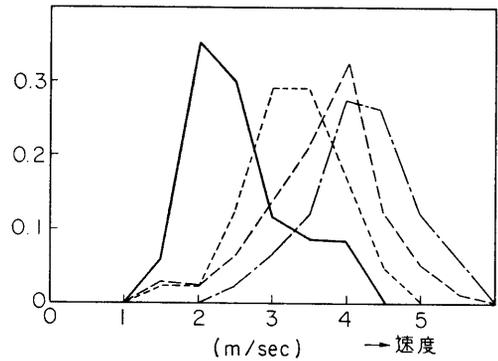


図-8 船の速度分布

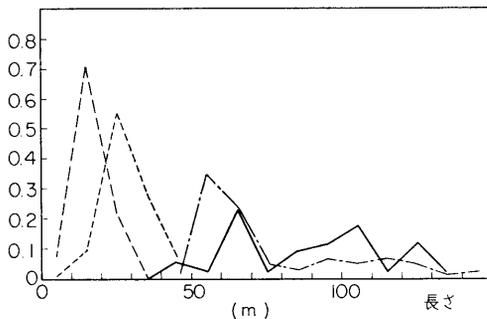


図-7 船の長さ分布

倍および3倍の場合を発生させた。

統計的結果を得ることが目的であるので、シミュレーションはつぎのような初歩的方法によった。すなわち、各船の到着時刻・長さ・速度を記入したカードを一定縮尺の航路図上で実際に動かす。encounter は目視で判定し、それが発生したとき、一方の船は他船が通過するまでその場所に停止する。優先順位はつけない。encounter の回数と航行時間のおくれを統計的に

表-2 シミュレーション結果

	航 路	A		E		F	
		交 通 量	encounter	交 通 量	encounter	交 通 量	encounter
I	小 型	434	66	68	23	33	18
	中 型	18	6	5	6	3	2
	大 型	5	0	0	0	0	0
	曳 船	70	15	25	33	5	3
	交 通 艇	86	12	45	17	0	0
	計	613	99	143	84	41	23
II	小 型	609	128	90	65	43	31
	中 型	21	6	11	15	7	6
	大 型	6	1	1	2	0	0
	曳 船	98	33	47	48	5	12
	交 通 艇	127	21	62	36	0	0
	計	861	189	211	166	55	49

しらべるためには、この方法で充分であり心理的あいまいさが適当にはいってくるということ、また全体の状況を一見して知ることができるという利点をもつ。

三分岐交差点では全部で6本の航路が存在するが、そのうち交差しあうものは図-4のA・E・Fの3本であるので、これらについてのみ交通量および encounter を集計する。また多体 encounter は2体 encounter に分解して考える。たとえばひとつの3体 encounter は2ないし3個の2体 encounter に分けることができる。このようにして得られた結果を表-2に各航路ごと、各船種ごとに分けてしめす。ひとつの encounter には2隻の船が関係するから全 encounter 数は各航路の encounter 数の和の半分になる。

基礎式によれば、単位時間あたりの encounter の期待値は交差しあふたつの航路のあいだで

$$QQ'(\bar{r} + \bar{r}')$$

である。したがって交通量があらゆる航路で一様に2倍になれば、この期待値は4倍になる。すなわち交通量の2乗に比例する。図-9は全航路にわたっての総和がちょうど放物線の上に乗ることをしめし、この関係の正しさを証明している。さらに、各航路間の組み合わせを取り、それぞれの交通量の積、たとえば $QAQB$ とそれぞれのあいだの encounter 数の関係を図-10のように対数方眼紙にとるとほぼ一直線となる。ただしデータのすくないE・F間の値はこの直線からずれている。これは交通量がちいさいからではない。充分

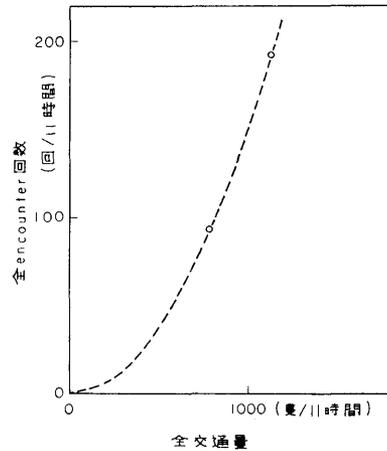


図-9 全交通量と全 encounter 数の関係

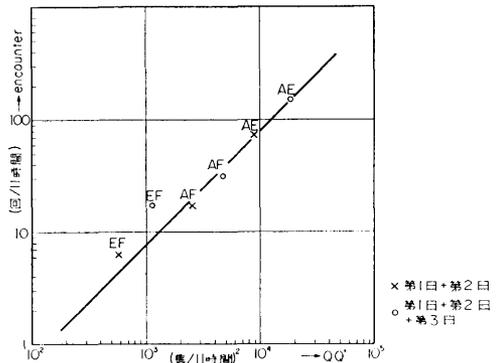


図-10 交通量の積と encounter 回数の関係

観測時間を大きくとってデータ数を増加させると、このばらつきを小さくすることができる。

そこで、A・E間の結果に基礎式を適用すると、

$$\bar{\tau}_A + \bar{\tau}_B = 31.8 \text{ sec}$$

すなわち

$$\bar{\tau}_A = \bar{\tau}_B = 15.9 \text{ sec}$$

を得る。この値は実際の

$$\bar{\tau} = 13.0 \text{ sec}$$

にほぼ一致するものとみてよいが、やや大きい。これは、このシミュレーションの特長をあらわしていると考えてもよい。すなわち $\bar{\tau}_A$ が大きいことは、船の長さ L が実際よりも大きく見積られていることをしめし encounter の判定がより過大、いいかえれば安全側でおこなわれたということになる。

4. 基礎式からのずれ

単位時間あたりの時間おくれの総和の基礎式

$$\frac{1}{2} QQ'(\bar{\tau}^2 + \tau'^2)$$

は交通量 Q , Q' の小な場合に成立し、交通量が大きくなるにしたがって、一般にこの式で与えられる値より大となる。これは第2報において多体問題や容量の影響を考慮し、特殊な条件をもつ数例についての解析的な解からも明らかと思われる。しかし、あらゆる場合について解析的な解をあたえることは困難であり、シミュレーションなどの手法によることが必要となってくる。

ここでは、第2報におけるように時間おくれについて考察する。はじめに問題をごく一般的にとりあつてみよう。筆者の提出した広域的交通にたいする解析法³⁾をここに適用してみる。交差のおこなわれている水域をひとつのブロックと考える。そこに流入流出する単位時間あたりの交通量を Q 、各船舶が流入してから流出するまでの平均旅行時間を \bar{t} 、ブロック内に存在している船舶の隻数(内在量)を S とすると

$$S = Q\bar{t}$$

なる式が成立する³⁾。

encounter の期待値の式は、ふたつの航路の間で

$$QQ'(\bar{\tau} + \bar{\tau}')$$

であるが、このうち、 $Q'\bar{\tau}$ は Q' が Q に $QQ'\bar{\tau}'$ は Q が Q' にそれぞれ encounter する期待値である。したがって1隻あたりの encounter の期待値は $Q\bar{\tau}$ である。 τ は航路中の1点を1隻の船が通過する時間で

あるから $Q\bar{\tau}$ はその1点が占有される割合をしめしている。いいかえれば平均密度のようなものである。したがってこの値は内在量 S と第1次近似において比例するとみられる。

ブロック内において encounter が生ずると、それにもなう時間おくれが生ずる。そして内在量 S が増加して、さらに encounter が増加するようになる。いま交差すなわち encounter がないときの平均旅行時間を \bar{t}_0 としよう。交差が存在するとき encounter の総和は前に述べたように、交通量 Q と内在量 S の積に比例すると考えられ、全時間おくれは

$$kQS\bar{\tau} \quad k \text{ は比例定数}$$

であらわされると考えられる。ここではブロック内の交差のシステム、すなわち、どのように航路が交差しているかは追求せず、全体的にとりあつている。平均時間おくれはこれを交通量 Q で割った

$$kS\bar{\tau}$$

にひとしく、encounter 増加のメカニズムが平衡に達したとき

$$S = Q(t_0 + kS\bar{\tau})$$

が成立することになる。

この式から

$$S = \frac{Qt_0}{1 - kQ\bar{\tau}}$$

が得られ、実効的には平均時間おくれは

$$\frac{S}{Q} - t_0 = \frac{k\bar{\tau}Qt_0}{1 - k\bar{\tau}Q}$$

となる。 Q が小のとき

$$k\bar{\tau}Qt_0$$

となり、基礎式との比較によって、 k は $\bar{\tau}^2/t_0\bar{\tau}$ に比例しなければならない。また

$$1 = k\bar{\tau}Q \quad Q\bar{\tau} = 1/k$$

において平均時間おくれは無限大となる。

ふたつの航路が交差する場合には、ことなる航路に属する船とのみ encounter がおこなわれることから

$$\begin{cases} S = Q(t_0 + kS\bar{\tau}) \\ S' = Q'(t'_0 + k'S'\bar{\tau}') \end{cases}$$

となる。ただし $\bar{\tau}$ は両航路とも同じとした。この式から

$$\frac{S+S'}{Q+Q'} = \frac{Qt_0 + Q't'_0 + \bar{\tau}QQ'(kt'_0 + k't_0)}{(Q+Q')[1 - k\bar{\tau}Q - k'\bar{\tau}'Q']}$$

が得られるが、もし両航路がまったく同じ構造、同じ交通量をもつならば $Q=Q'$, $k=k'$ とおいて

$$\frac{t_0}{1 - k\bar{\tau}Q}$$

となり、同じ結果が得られる。

以上の結果は、ごく一般的なものであって、基礎式からのずれはここで考えられていない他の機構からも生ずると思われる。そこで、定性的にたしかめることだけを目的として、シミュレーションを実施してみる。前節と同様の方法で、幅 400m に相応する直交水路上で、ほぼ同じ交通量をもつふたつの交通流を交差させ、全体の交通量を変化させながら、シミュレーションを数回おこなった。交通流の発生は、京浜運河観

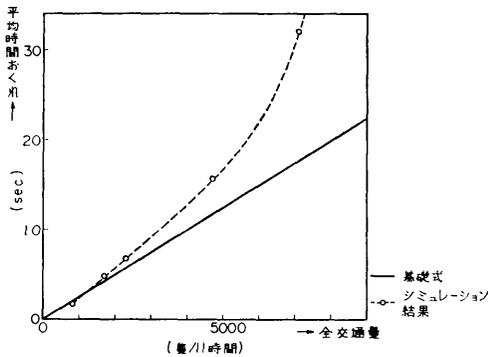


図-11 時間おくれの基礎式よりのずれ

測のデータもちい、それをほぼ同じ交通量、同じ速度および長さの分布になるよう配分した。

シミュレーションの結果を図-11 にしめす。横軸は全交通量、縦軸は船一隻あたりの平均時間おくれであり、直線は基礎式

$$\frac{1}{2} Q Q' (\bar{\tau}^2 + \tau'^2)$$

を全交通量 $Q+Q'$ で割ったものをあらわす。交通量の増加とともに、この直線からのずれは大きくなり、ある値において無限に増加することも推定できる。さきに述べたように、このずれの原因は他にもいろいろ考えられる（たとえば τ の値の過大評価）ので、定性的な確認の目的は達せられたといえる。

図-12 は時間おくれの分布が、交通量の変化とともにどのように変化してゆくかをしめしている。この分布はおなじみの指数分布とみることができ、さらに交通量増加とともに山が右側へくずれてゆく傾向をもつことがわかる。この現象は待ち行列論における待ち時間分布の現象と似ている。交差交通と待ち行列論との類似性をしめすひとつの例と考えられる。

5. むすび

以上のように、実際水路における観測結果の整理、

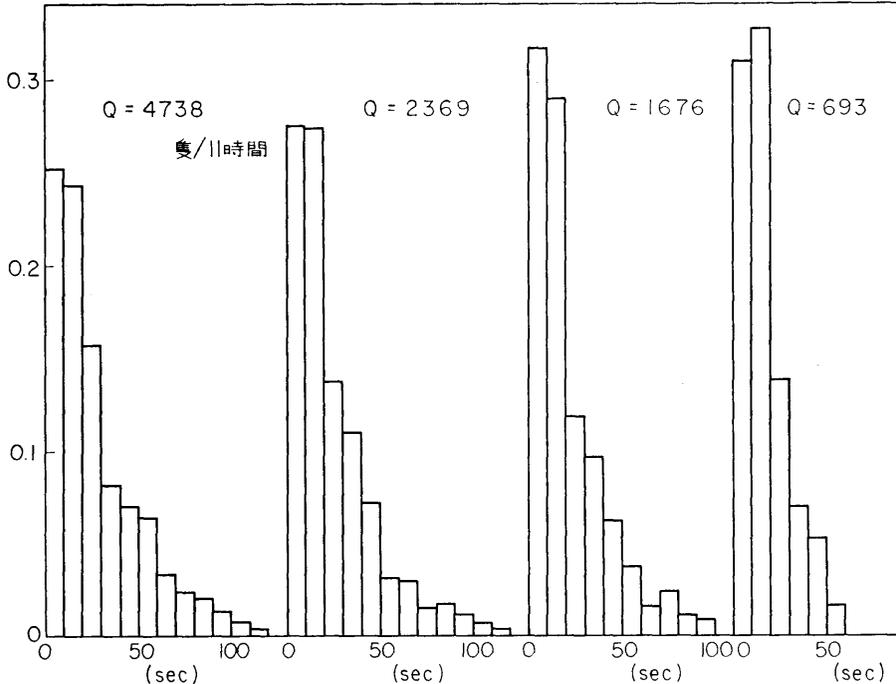


図-12 時間おくれ分布

また簡単なシミュレーションを通じて、交差交通のとりあつかいとして encounter を中心においた方法はかなりの成功を期待できることがわかった。

この方法を実際の水域に適用し、交通管制の一助とするためにとるべき基本的なふたつの方向がある。ひとつは、安全性の見地から衝突など事故を中心とした問題へむかうものであり、他は能率の見地から渋滞・時間おくれなどの問題へむかうものである。前者については encounter が実際の衝突発生の前段階として必要条件であるということにとどまり、さらに先へ進むためには別の方法を導入する必要がある。後者については、平均時間おくれ、平均の渋滞などが求められれば、それで終りのように見える。ただ前節でみたように、平均時間おくれなどが無視できない大きさになるためには交通量が相当大きくなければならない。それは、たとえば 400 m 幅の航路に 1 時間 300 隻といったような交通量であり、現実にはごく短い時間内にしか存在しない。単にひとつの交差点があるという単純

な状況では、ドラスチックな変化は発生し得ない。より広い水域にわたる航行能率の問題にすむとき、その一部分をうけもつことによってはじめて適用の意味がでてくるように思われる。

最後に、レーダ写真フィルムの提供をいただいた海上保安庁警備救難部航行安全課に厚く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 渡辺健次; 船舶交通システムの研究, 一交差交通の研究 その 1—, 船舶技術研究所報告 Vol. 9, No. 3 (昭和 47 年 5 月)
- 2) 渡辺健次; 船舶交通システムの研究, 一交差交通の研究 その 2—, 船舶技術研究所報告 Vol. 9, No. 4 (昭和 47 年 7 月)
- 3) 渡辺健次, 浜島金司; 船舶交通システムの研究, 一広域交通の一解析法—, 船舶技術研究所報告 Vol. 10, No. 2 (昭和 48 年 3 月)