

船舶交通システムの研究

—交差交通の研究 その4—

渡辺 健次*・浜島 金司*・富田 宏*

Studies on the Marine Traffic Systems

—On the Intersection Traffic IV—

By

Kenji WATANABE, Kinji HAMAJIMA and Hiroshi TOMITA

Abstract

It is important to predict the probability of ship accident for the traffic control plannings. In this paper, the probability of ship collision at intersection is investigated by means of "graphical" simulations. The results are explainable under the following hypotheses.

- (1) Number of collisions is proportional to third power of ship density.
- (2) A collision happens, when a ship encounters with two ships during the passage of a distance, d .

Furthermore, the others results are obtained-

- (1) personal and training effects to collisions are not important,
- (2) as a result of collisions, time delay increases seriously, and,
- (3) operation frequency is proportional to encounter expectation.

1. はしがき

第1報¹⁾において、筆者は交差交通における主要な問題としてつぎの4項をあげた。

(1) 交差点における渋滞、および交差が原因である航行時間おくれの予測。

(2) 交差点における事故発生の予測。

(3) どのような状況になったとき、管制をおこなうべきか。

(4) 最適な管制システムの設計。

これらは、一般に船舶にかぎらず、どのような交差交通においても問題となるし、かなり共通な考え方もできる。そこで、これらについてごく簡単に触れることにとどめ、第2報²⁾・第3報³⁾においても、(1)に述

べられている点についてくわしく理論計算および観測データ整理解析とシミュレーションをおこなったにすぎない。

しかし、交通事故のおき方は交通手段(船舶・航空機・鉄道・自動車)によって本質的に異なると思われること、事故発生もまた航行時間のおくれをひきおこすこと。その結果、管制問題の考察において事故発生の確率が重要な因子となること、これらの理由で船舶交通における事故発生の予測の研究が必要となってくる。

事故、とくに船舶同士の衝突についての研究としては、気体分子衝突理論を機械的に適用した試みはあるが、実証されたわけではなく、気体分子と船舶の相似性の保証も単にイメージからくるもの以上のものではない。航行船舶のあいだには斥力のようなものがはたら

* 共通工学部 原稿受付：昭和53年2月3日

いているようにみえるが、それから直ちにポテンシャルのようなものを仮定できるとは思えないし、そうする意味もない。

また、気体分子と船舶の類似性をみとめるにせよ否にせよ、統計された船舶衝突のデータはすくないし、その際の操船の仕方・心理的要因・外部諸条件の細目について知ることは非常に困難であるから、実際における衝突を集計してなんらかの統計的結論を帰納することはできても、それは重要な要因もそうでない要因も一諸にした上での結論ということになる。

すなわち、あたえられた条件から、あたえられた水路交差点における衝突の予想をおこなうためには、適当な「理論」もないし、十分に条件を特定づけたデータがすくなくすぎる。

こういった障害をのりこえて、ある程度の見とおしを得るためには、まず気体分子とは当然ことなるはずの船舶「分子」の衝突時におけるふるまいを知り、船舶の集団が全体として形成する「ガス」の特性を把握することが必要である。その方法としては、物理学と同じように多くの衝突実験をくりかえすのがよい。つまり方法論としては、分子と船舶を同様にとりあつかっていくわけである。

具体的には、実際に衝突をさせてみるわけにはゆかず、また、いつおこるかかわからない衝突にそなえて計測の準備をしておくわけにもいかない。そうすれば、あとはシミュレーションしかない。

本研究は、船舶技術研究所において開発されたシミュレーション方式⁴⁾を用いて、直角に交差する水路における衝突回数を、船の大きさ・種類・混合比・避航方式・水路巾・交通量などの諸条件を種々変えて組合せた各場合について集計し、これらの条件がどのように衝突回数に影響するかを考察したものである。

シミュレーション実行の過程において、人間の判断がはいることが、この方式⁴⁾の特長である。したがって往々にしてみられるところのシミュレーション実行前に結果が決まっているという事態はさけられるが、得られた結果が一般的なものであるという判断は保留せねばならぬ。

定性的な結論として衝突回数は3体 encounter の期待値にほぼひとしいことが得られた。これは、ここでえらんだ交通量の範囲では、単位時間あたりの衝突発生数が交通量の3乗に比例することを意味する。この比例定数は諸条件によって変る。

2. シミュレーションの実行

船の種類・大きさ・諸性能は、同じ方式でなされた管制シミュレーション⁵⁾において採用されたものと、ほぼ一致するよう表-1のようにえらんだ。

表-1 船舶諸元

種類	長さ(m)	速度(m/sec)	旋回半径(m)	停止距離(m)
1	~150	2.8	10	12
2	30	4.3	47	96
3	50	5.1	87	223
4	50~100	5.5	114	320
5	100~200	6.2	175	570

簡単なものから複雑なものへと条件を変えてゆくことが望ましいので、最初に基準として、種類5の大型船で長さ100mのもののみを用い、巾400mの水路が2本直交しているところでシミュレーションを実行した。交通量のえらび方としては次のように考えた。すなわち、encounter¹⁾*を考えると、これは衝突の可能性をしめすものであり、全船舶がすくなくとも1回 encounter をおこなうように交通量をえらぶと衝突実験として効率がよいものとなる。全 encounter 回数は Q, Q' を交通量、 $\tau = L/v$ 、 L を船の長さ、 v を速度とすれば

$$QQ'(\tau + \tau')$$

であり $Q \approx Q' \approx 100$ 隻/3000秒

にえらぶと、全 encounter 回数は

$$107.5 \text{ 回/3000秒}$$

すなわち、すべての船が交差点通過にさいして平均1回程度の encounter をおこなうことになる。そこでこれを基準の交通量とする。

この基準交通量において、まず操船者による差異・避航方式による差異などをしらべてみた。次に交通量を3/4, 1/2にした場合、水路の巾を2倍、4倍にした場合を実行した。直交する2本の水路の巾を両方とも2倍、4倍にしたので水路交差点の面積は、4倍、16倍になることに注意すべきである。長さ50mの種類3の中型船；長さ30mの種類2の小型船についても同様に、すべての船が平均1回の encounter をおこなうように基準交通量をえらんで実行し、それから交通量を種々変化させて実行した。ただし、水路巾は船の長さと同様に、それぞれ200m, 120mにえらんだ。これ

* 「そのまま直進すると衝突するような位置関係が生ずること」と定義

は、大型船の場合と同じ基準交通量でも水路巾が大きくなると衝突回数が減少するので、中・小型船の基準交通量における結果が、大型船の場合と比較できるようにするためである。云いかえれば相似則が成立するかどうかをしらべるためである。

次に、これら各種類（5, 3, 2）の船を種々の割合で混合した場合を実行した。この場合、基準交通量になんらかの意味があるかどうかかわからないので、種類ごとに上述の基準交通量を発生できるようにし、それぞれの交通量を1/2, 1/4などにして加えるという方法をとった。

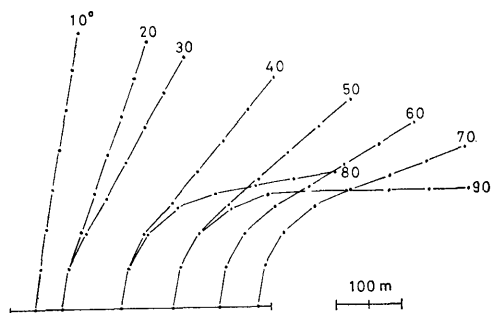


図-1(a) 各レベル針路変更命令後の航跡

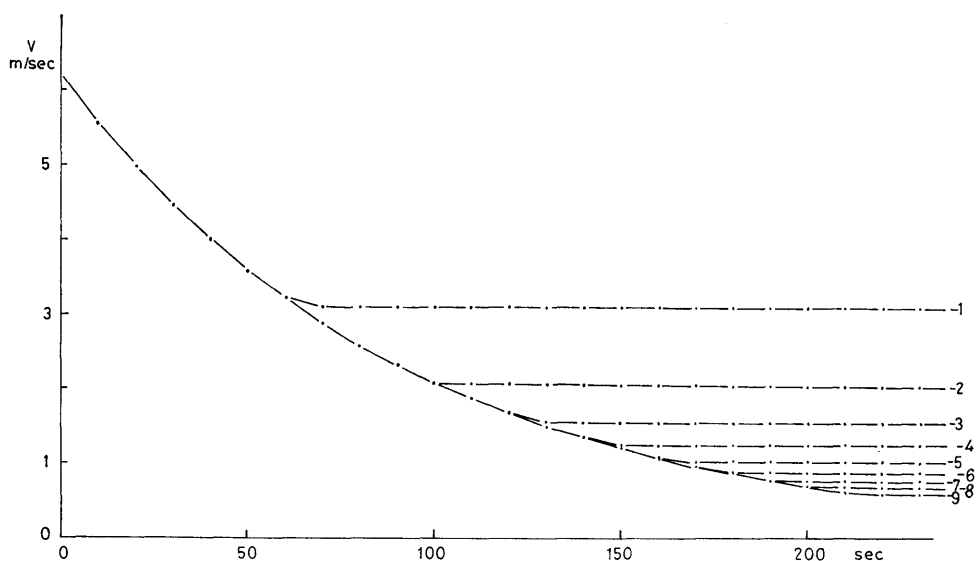


図-1(b) 各レベル減速命令後の速度変化

最後に実在航路への適用を考え、第3報³⁾においてデータ整理をおこなったところの備讃瀬戸西部の水域をえらんでシミュレーションを実施した。

シミュレーション実行にあたって、交差しあう2本の水路はともに一方交通とし、右折左折せず直進するのみとした。それぞれの水路には、交差部に到達するまでに適当な助走区間があり、それぞれの水路を進む船のすべてを1人のオペレーターが担当し、衝突や乗揚げすなわち水路からの離脱をさけながら、できるだけ早く水路交差部を通して出口に達するよう操船する。

操船命令は離散的ないくつかのレベルに分けられてあり、針路変更の場合は 10° おき、加減速の場合はそれぞれ9ステップずつある。通常の状態では、針路変更は $\pm 30^\circ$ まで加減速も ± 3 までの操船をおこない、

緊急の場合これを超えることが許される。図-1(a)は、速度6.2m/sec種類5の大型船に針路変更命令をおこなったのち10秒おきの航跡である。図-1(b)は同じ船に減速命令をおこなったのち10秒おきの速度の変化をあらわす。

避航の必要性・衝突や乗揚げの判定は、管制シミュレーション⁵⁾と同じように図上でおこない、衝突や乗揚げは記録しておいて後で再現し、船の大きさを考慮して定めた。衝突の中には単なる接触から正面衝突までであることに注意しなければならない。衝突をおこした後はその船を取り除くことはせず、衝突は回避されたものとしてそのまま進行させるという取扱いをした。これは前述のように、後での判定をまっはじめて衝突と決定しなければならないこともあるが、取り

表-2 シミュレーション実行結果

番号	ステップ数	全隻数		水路幅 (m)	船の長さ (m)	ステップ間隔 (sec)	平均 おくれ (sec)	平均操 作回数 (回)	衝突 (回)	乗揚 (回)	備 考
1	300	95	118	400	100	10	17.9	3.35	44	17	(No. 3 以下オペレーターはA, B)
2	"	"	"	"	"	"	11.0	2.41	56	13	
3	"	"	"	"	"	"	24.5	1.44	49	0	
4	"	"	"	"	"	"	3.6	1.80	42	3	
5	"	44	63	"	"	"	3.1	1.04	3	1	
6	"	68	92	"	"	"	6.0	1.44	15	5	
7	"	100	112	"	"	"	22.9	2.81	45	5	
8	"	"	"	800	"	"	29.0	3.40	30	3	
9	"	"	"	1600	"	"	17.9	2.80	11	1	
10	140	13	14	120	30	5	1.3	0.59	0	0	
11	"	10	27	"	"	"	1.9	0.95	0	0	
12	"	53	57	"	"	"	4.3	1.37	3	3	
13	"	68	80	"	"	"	7.0	1.90	12	1	
14	"	86	101	"	"	"	8.2	1.98	21	2	
15	"	101	120	"	"	"	11.0	2.30	44	8	
16	200	39	58	200	50	10	2.0	0.88	2	0	
17	"	79	115	"	"	"	7.1	1.95	19	6	
18	100	7 7 3	4 3 2	400	30 50 100	5	2.3	1.35	0	0	以下混合交通
19	178	18 15 13	18 13 9	400	30 50 100	5	7.9	2.78	12	1	
20	84	75 13	89 19	400	30 100	10	30.2	3.17	124	3	
21	84	45 28	42 35	400	30 100	10	18.3	2.61	80	7	

除くことによって交通量が減少しひいては衝突の確率が減少するという一種の非線形効果をさけるためである。むしろ逆に、衝突による交通流の混乱のために他の船の衝突の確率が増えることを考えると、この取扱いの方が実際に近いであろう。

実時間3000秒、両方の水路で100隻の交通量によるシミュレーションを実行するのに、15~20時間を必要とした。装置の機械化によってこの時間は少なくすることができる。すなわち計算後、次のステップでの船の位置をタイプアウトし、位置ぎめをするのに時間がかかることによる。1人のオペレーターが同時に多数の船の操船をうけもつことを考えれば、1隻あたりの操船を判断する時間は実時間とくらべて過大ではないと

思われる。

3. 実行結果と考察

3.1 個人差練習効果

表-2に主な実行結果をかかげる。

シミュレーションの一要素として人間の判断がはいる以上、結果に個人差が出てくることが予想される。

No. 1とNo. 2はオペレーターの組合せを変えて実行したものである。No. 2の方は、時間おくれや操船命令回数がよりすくないが、衝突の回数はより多くなっている。安全性と交通効率とは相反する要素であり、個人差は主としてこの両者の組合せの差として出てくるといふ仮説が立てられそうである。図-2は、

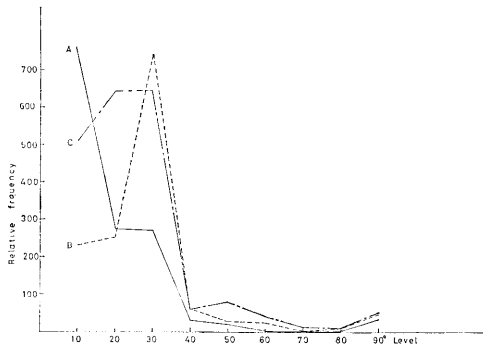


図-2 オペレーターごとの変針レベル分布

オペレーターごとにとった操船レベルの分布である。あきらかに個人差が出ており、これがどのような影響をおよぼすのか不明であるが、残りの実行はすべて同じオペレーターの組合せで行う方がよいと判断した。しかし No. 3 や No. 4 のように操船方法にかなり制限を加えて、個人差よりも大きい差が出ると予想されるにもかかわらず、衝突回数に大きい違いはなかった。これから考えて、個人の不注意によるものはしばらくおき、相当交通量が大きく混雑している場合には個人差をあまり強調する必要がないと思う。

練習効果は明確にあらわすことはできないが存在している。それは実行を重ねるごとに、乗揚げが減少する傾向および操船命令回数が減少する傾向によってみとめられる。しかし、衝突回数に練習効果がおよぼす影響は、はっきりみとめることができなかった。この

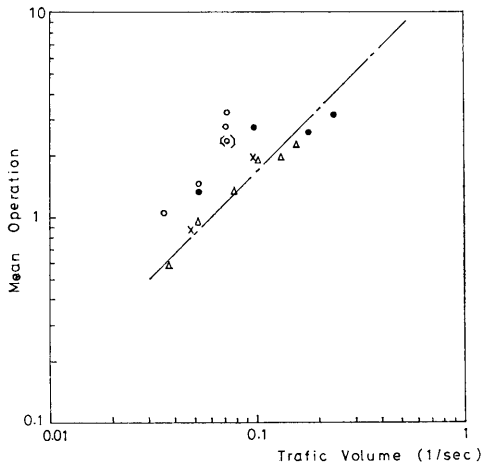


図-3 交通量と1隻あたり平均操船命令回数の関係
○大型×中型△小型●混合 [○] は異なるオペレーター

場合でも、交通量が大きく混雑しているときは練習効果が発揮できないのではないと思われる。このことは逆に No. 3, No. 4 のように、操船の仕方に制限をつけて練習効果がまったく無駄になるようにしておいても、衝突回数あまり変っていないことからみて妥当のようである。

以上のことから、実行結果の再現性には、ある程度のみとおしが得られたと思われる。

3.2 操船命令回数

図-3 は交通量と1隻あたりの平均操船命令回数の

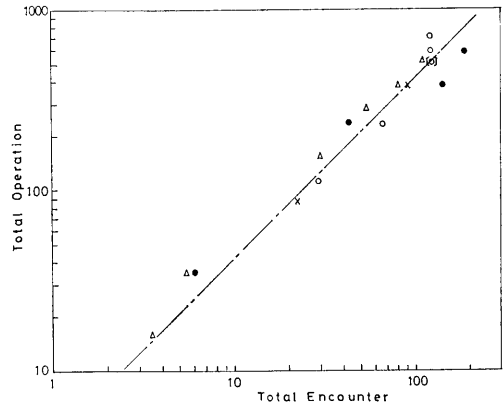


図-4 全 encounter と操船命令総数の関係、○大型×中型△小型●混合

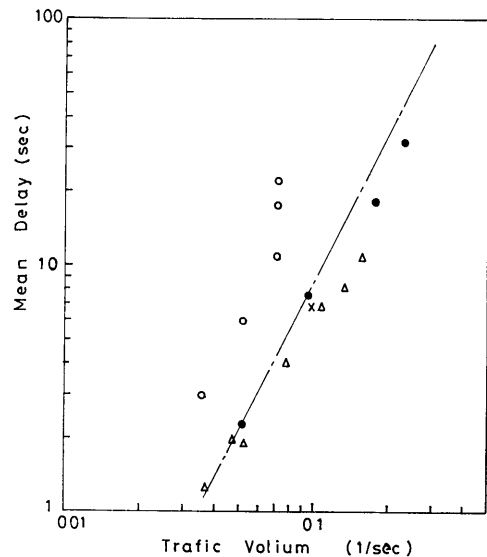


図-5 交通量と1隻あたり平均時間おくれの関係、○大型×中型△小型●混合

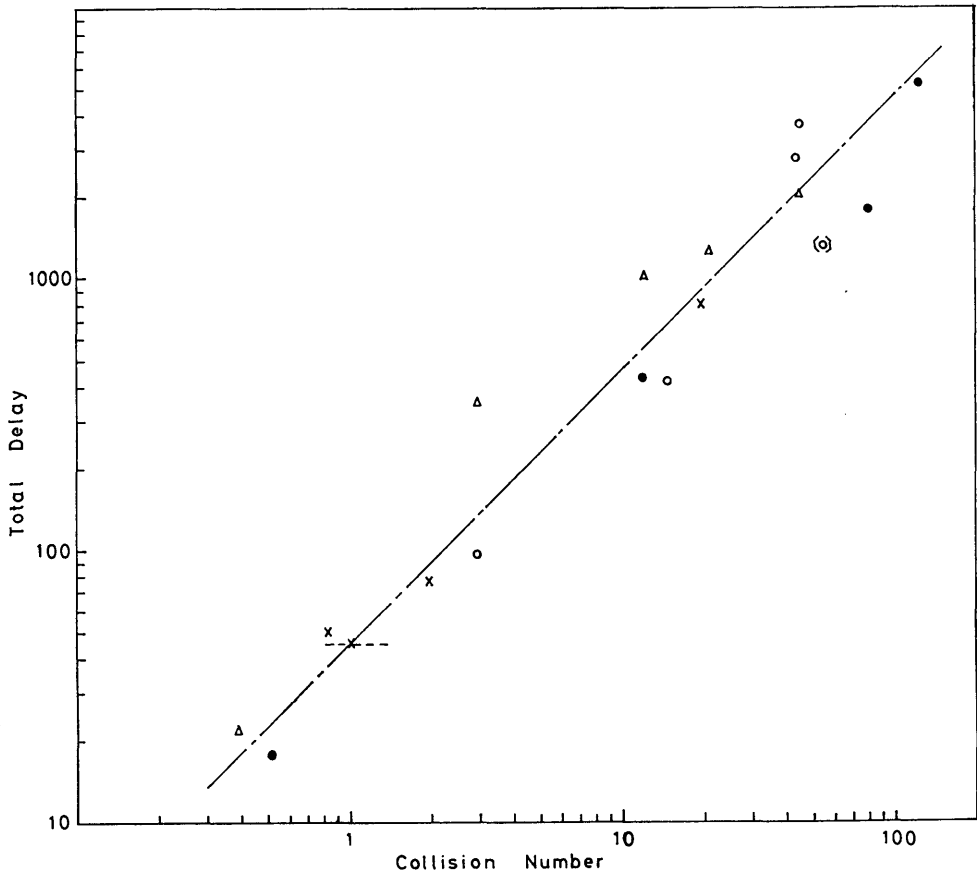


図-6 全衝突回数と（時間おくれ総和—encounter による理論的時間おくれ総和）の関係、○大型×中型△小型●混合

関係をプロットしたものである。船の種類ごとにほぼ比例関係があるが、この意味をもっとはっきりさせるために全 encounter の期待値

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

と操船命令総数の関係を図-4 にしめす。比例関係は船の種類によらなくなってくる。これは、練習効果もあるが、大局的にオペレーターの操船の仕方が、実行するごとにそれほど変わっていないことを示している。なお、平均すると encounter 1 回あたり 4.2 回の操船命令をおこなっている。2 隻の船が介在し回避動作とその加減速および針路変更を回復する動作も必要なることを考えれば、それぞれについて 1 回あての操船命令しか出していないことになり、かなりぎりぎりの操船をおこなっていると云えよう。同時に、練習効果は急速に限界に達したとも考えられる。

3.3 時間おくれ

(184)

図-5 は交通量と 1 隻あたりの平均時間おくれの関係である。ただし、前節の図-3、4 とともに、水路巾のことなる場合や操船に制限をつけた場合は、比較の対象とならないと思われるので除いた。この図からは平均おくれが交通量の 2 乗にほぼ比例していることがわかるが、そうすると時間おくれの総和は交通量の 3 乗に比例することになり、encounter による時間おくれの総和の理論式

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

のように交通量の 2 乗に比例する要因以外のものを考えなければならぬ。

encounter によるおくれは、それが発生したとき一方の船が通過し終るまでの時間を集計したものであった。衝突がおこる際、回避のため最大限の変針ないし減速がおこなわれ、さらにその回復のための時間が

かかるから、衝突によるおくれも無視できないと思われる。それで全衝突回数と、時間おくれ総和から上の encounter による理論的時間おくれをさしひいたものとの関係を図-6に示した。これらのあいだにはほぼ比例関係が成立し、衝突による時間おくれがかなり比重を占めていると推定できる。

1回の衝突あたり平均約45秒のおくれが生じている。操船方法に制限を加えた場合、特に方向変更のみに制限した場合さしひいたものがマイナスになってしまうように、この衝突による時間おくれは操船方法の個人差指標と思われる。逆に、図-6のようにほぼ比例関係があることは、常に同じような反応をするという意味で、オペレーターの操船の仕方の一様性をしめすものと考えられる。

衝突が増大するにともなって時間おくれも増大する。そして水路交差部分にある船の密度が大きくなり、さらに衝突の確率が増大するという非線型効果が予想される。

3.4 衝突に関する種々の統計結果

衝突位置の分布を図-7に示す。水路の端で衝突がすくないという傾向以外に、特別衝突のおきやすいあるいはおきにくい場所はみとめられない。

平面上の位置分布を表現するために、平均位置を中心とし標準偏差を動径とする楕円をもちいる。楕円の主軸は、それを座標軸 ξ, η にえらんだとき

$$\int \xi \cdot \eta f(\xi, \eta) d\xi d\eta = 0$$

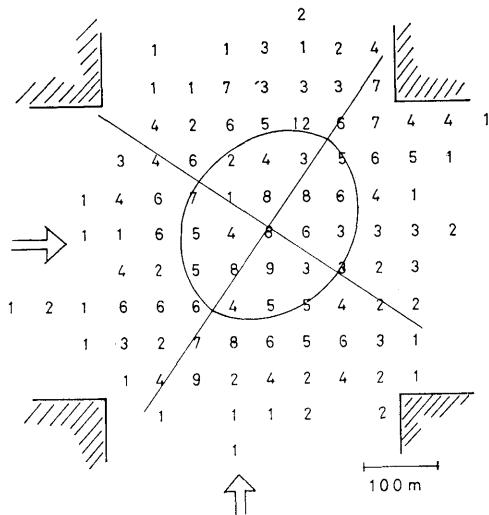


図-7(a) 衝突位置分布；大型船

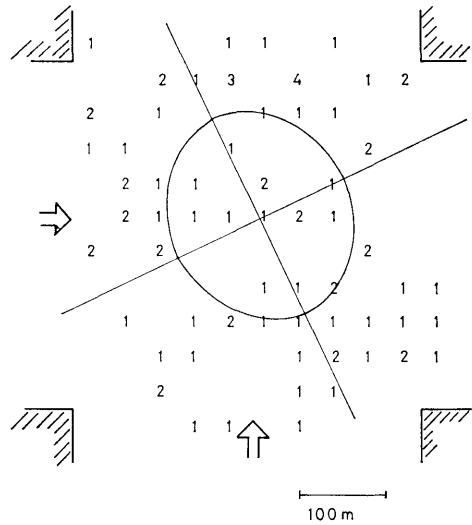


図-7(b) 衝突位置分布；針路変更のみ

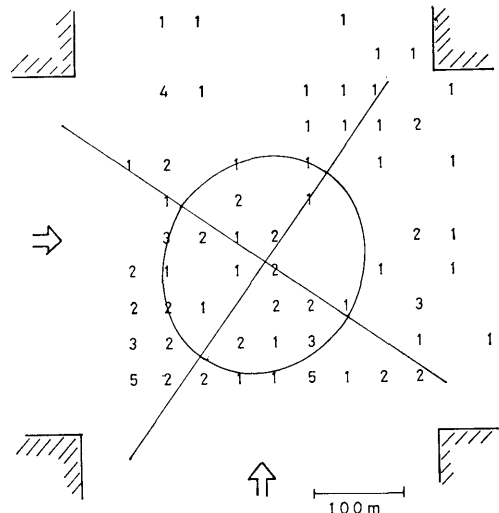


図-7(c) 衝突位置分布；加減速のみ

なるような方向である。ここで $f(\xi, \eta)$ は位置分布をあらわす関数である。水路方向を座標軸 x, y にえらんだとき \bar{x}^2 等は平均をあらわすものとして

$$\begin{cases} \xi = x \cos \theta + y \sin \theta \\ \eta = -x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}$$

$$\tan 2\theta = 2\bar{x} \cdot \bar{y} / (\bar{x}^2 - \bar{y}^2)$$

$$\begin{cases} \bar{\xi}^2 = \bar{x}^2 \cos^2 \theta + \bar{y}^2 \sin^2 \theta + 2\bar{x} \cdot \bar{y} \sin \theta \cos \theta \\ \bar{\eta}^2 = \bar{x}^2 \sin^2 \theta + \bar{y}^2 \cos^2 \theta - 2\bar{x} \cdot \bar{y} \sin \theta \cos \theta \end{cases}$$

が得られる。この楕円は多くの場合、中心が水路交差

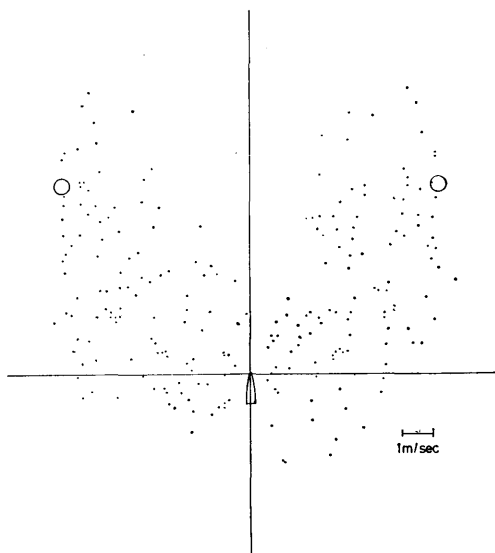


図-8(a) 衝突時相対速度分布；大型船

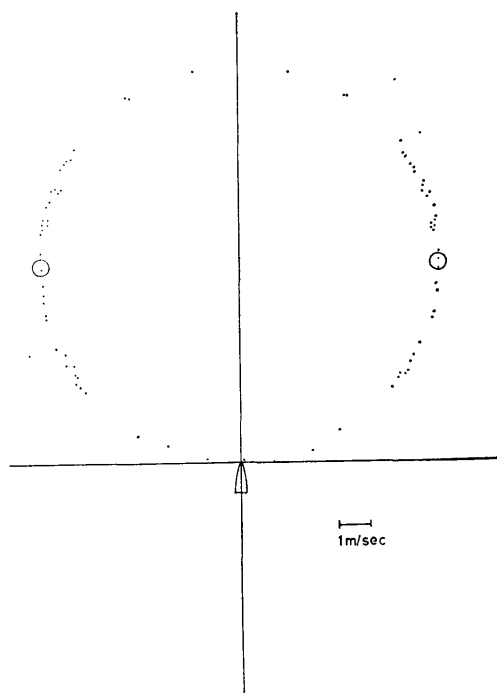


図-8(b) 衝突時相対速度分布；針路変更のみ

部の中心近くにあり、長軸は $\theta=45^\circ$ の付近にあり船舶進行方向ベクトル和方向にほぼひとしい。しかし、操船の仕方を針路変更のみにする制限をつけた場合図-7(b)のように長軸と短軸が入れかわるという結果が

(186)

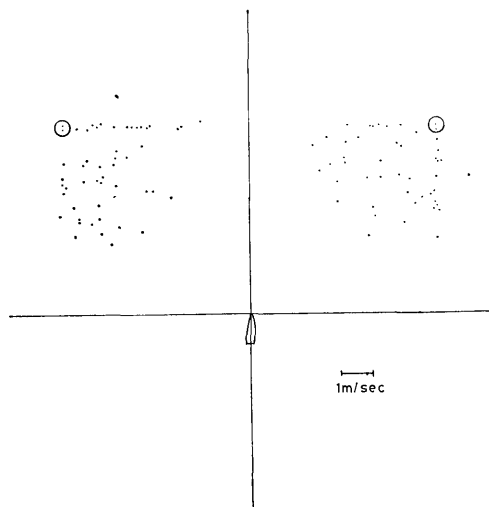


図-8(c) 衝突時相対速度分布；加減速のみ

生じた。

同じ分布であるということは、オペレーターの操船の仕方がほぼ同じであったことを示すと思われ、操船の仕方が異なればことなる結果が生ずるのであろう。また、このような単純な水路でなく複雑な場合も分布が当然異なってくる。その場合、楕円表示は重要な方法であるが、やや情報がすくなすぎる。

つぎに、衝突時の2船間の相対速度の分布を図-8にしめす。相対速度は原点から図上のプロットにむけてひかれたベクトルによってあらわされる。○印は操船命令をまったく下さないで直進して衝突した場合の相対速度であって、この近くのプロットはどちらかといえば「不注意」に因って衝突した場合と考えてよからう。

分布のパターンは図-8(a)のようなものがほとんどであり、操船に制限を加えた場合図-8(b), (c)のようになる。この場合も、操船の仕方によってははっきりとした差が出てくる。しかし、この表示から何か特別な情報が得られるかどうか今後の問題と思われる。

つぎに衝突時の被害がどうなるかをしらべてみた。単なる接触から正面衝突までいろいろの位置関係と相対速度をもって衝突した場合の被害を次のような仮定のもとに計算した。

(1) 接触から衝突までまとめて統計的に比較することが主眼なので、付加質量その他複雑な因子はとりえない。

(2) 非弾性衝突をおこない、衝突前後のエネルギー

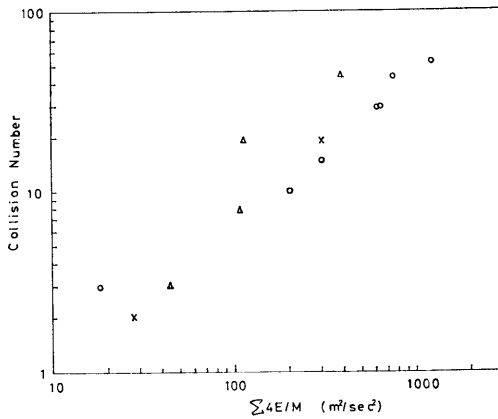


図-9 全衝突回数と被害エネルギー総和の関係、○大型×中型△小型

の差を被害のめやすとして、被害エネルギーと名づける。すなわち被害エネルギーは

$$E = \frac{M}{4}(v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos \theta) - \frac{1}{2}I\omega^2$$

となる。ただし、 M は船の質量、 v_1 、 v_2 、 θ は衝突時の速さと角度、 I は衝突後の2船を一体としての慣性モーメント、 ω は一体として回転するときの角速度であり、これらは船の重心、衝突時の位置関係、運動量と角運動量の保存則から計算できる。

全衝突回数と $\Sigma 4E/M$ の関係を図-9に示す。ただし、混合交通と操船に制限を加えた場合を除いてあり、かわりに水路巾の異なる場合をいれてある。

衝突一回あたりの平均の E/M は以下のようになる。

種類	$E/M(\text{m}^2/\text{sec}^2)$	$v^2(\text{m}^2/\text{sec}^2)$
5	5.05	38.4
3	3.9	25.0
2	2.25	19.0

比較のため、巡航時の全運動エネルギーを M で割ったもの

$$\left(\frac{1}{2}Mv^2 \times 2\right) \div M = v^2$$

をつけ加えてある。この15%ぐらいが被害エネルギーとなっている。被害エネルギーの総和を衝突回数と同じように安全性の評価量として採用することができるが、この比率もより望ましい評価量として採用できると思われる。そこで、このエネルギー比率についてす

こしくわしく考察してみよう。

この比率が船の種類に関係なく一定であったことは運動性能にほぼ相似則がなりたっている事を意味するのかもしれない。そこで、操船に制限をつけたときの結果を次のように比較してみる。

操 船	衝突回数	E/M	平均 おくれ	エネル ギー比
制限なし	(回) 44	$(\text{m}^2/\text{sec}^2)$ 5.05	(sec) 18	(%) 13.1
加減速のみ	49	9.65	24.5	25.1
変針のみ	42	18.05	3.6	47.0

衝突回数はほぼ同じであっても、被害は針路変更のみの制限をつけた場合ははるかに大きく、なんらの操船命令を下さずに衝突するままにまかせたときのエネルギー比50%に近い値をもっている。一方、時間おくれは予想されるとおり小さい。加減速のみの制限をつけるとき、エネルギー比は半分になり、平均おくれは7倍にもなる。安全性と交通効率をたしかに矛盾する。もし時間おくれを無視して減速を徹底的におこなうならば、エネルギー比はいくらでもゼロに近づけることができる。しかし時間おくれは無限に大きくなるだろう。そして、衝突の確率が増加し結局被害の総和をゼロにすることはできないだろう。被害の総和でなくエネルギー比を評価量にえらぶ方がのぞましい理由がここにもある。

「操船に制限をつけるより制限のない方が安全」とは自明の結果であるが、同時に、制限をつけるということは運動性能を低下させることと等価であるから、このエネルギー比を安全性の面からみた運動性能の評価量と考えることもできよう。

つぎに、衝突が時間的にどう分布しているかをみよう。図-10で、折れ線グラフは交差点内にある船の隻数の時間変動であり、短い棒は衝突をしめす。交差点内内の隻数は、ほぼ交通量の変動に対応して変動するが、衝突はこの隻数すなわち船舶密度が大のときに密に生じている。そこで、大型船および小型船のシミュレーションで、水路巾400mと120mの場合について、交差点内にN隻存在しているステップ数とそのときの衝突数を積算して1ステップあたりの衝突数を求める。これとNとの相関を図-11に示す。これから衝突数は密度の3乗に比例する期待値をもつことがわかる。他の条件が同じであれば、密度は交通量に比例する。そこでつぎの仮説が提出できるであろう。

仮説；衝突回数は交通量の3乗に比例する。

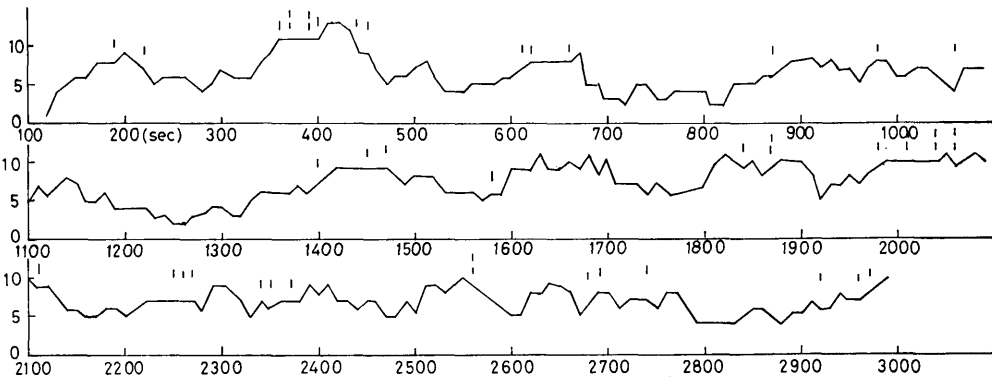


図-10 船舶密度の時間変動と衝突発生時刻

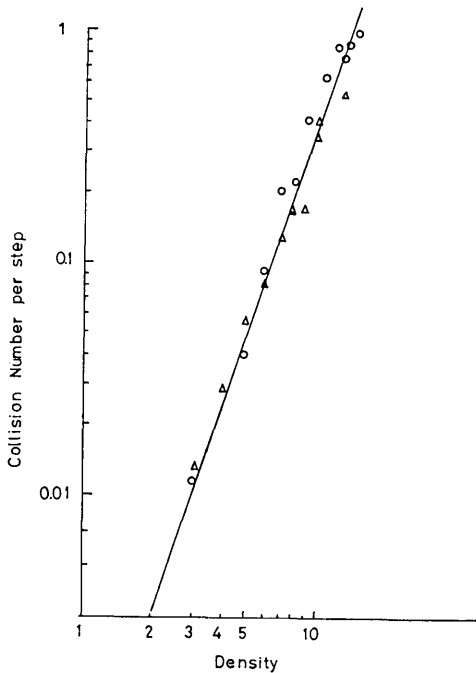


図-11 船舶密度と1ステップあたり衝突数の関係
○大型△小型

3.5 衝突回数推定の“理論”

決定論的な「理論」がこのような問題にたいして存在するわけがない。目標をなんらかの確率ないし期待値をみちびくことに限っても、多くの仮定を導入しなければならないだろうし、利用できる確実な知識は数すくない。そして、確実な知識と思われるものでも人によっては異論があることもあろう。

筆者はまず確実な知識として前報でとりあつかった

encounter の期待値をとる。そして、前節での議論のなかで述べたように、オペレーターを固定すればほぼ一樣な結果が得られ再現性も保証できるものとしよう。また、前節の最後で強調した仮説を採用する。

事故がある程度人間の不注意によっておこることは否めない。不注意の生ずる確率を一定とすれば、事故は encounter の期待値に、すなわち交通量の2乗に比例する。しかし、このシミュレーションでは交通量のほぼ3乗に比例している。

したがって次のように考えるのが妥当であろう。交通量がちいさいとき事故は不注意が主要な原因であって交通量の2乗に比例する。もっとも交通量が大きくなると、注意力が集中して事故は相対的に減少する。さらに大きくなると、密度の増大そのものが原因で交通量の3乗に比例する事故が発生する。

さて、われわれのシミュレーションにおいて、衝突時の状況を再現して注意深く原因を判定したところ、次のような結果が得られた。(大型船の一部)

A 高密度に原因	90
B AとCの中間	84
C 操船に問題あり	71
D CとEの中間	15
E 不注意と思われるもの	9

「操船に問題あり」という場合でも、完全な誤操作でなく高い密度に影響をうけているから、結局圧倒的に高密度による衝突が多いと考えてよい。

前節の最後の仮説は、そうなるとまさに交通量が大きいことによっておきる事故のしたがう法則を示しているように思われる。交通量の3乗に比例する現象でわれわれの持つ確実な知識は、3体 encounter であ

る。

そこで、逆に3体 encounter がおこらない場合を考えてみる。すなわち、ある船が交差点を通過するとき、たかだか1隻と encounter する確率を考えてみるのである。このときは、かならず衝突が回避できるはずであるから、衝突しない船の隻数の期待値が得られる。前報によれば、長さ L 速度 v の船が交差点を通過するとき、 L' , v' の船 i 隻と encounter する確率は、他方の水路の面積

$$S = w \left(L + \frac{v}{v'} L' \right) \frac{v'}{v}$$

の部分に i 隻の船が存在する確率である。この確率を $\rho'S$ なる平均値をもつようなポアソン分布と仮定し $i \leq 1$ について和をとり交通量 Q をかけると、たかだか1隻と encounter する船の隻数の期待値は

$$Q e^{-Q'(\tau+\tau')} [1 + Q'(\tau+\tau')] - Q' e^{-Q'(\tau+\tau')} [1 + Q(\tau+\tau')]$$

とあらわされる。ここで $\tau = L/v$, w は水路巾, ρ は船舶密度である。

衝突しないで交差点を通過する隻数を衝突非関与隻数とよぶ。図-12は、衝突非関与隻数の上記の方法による計算値と実験値との比較である。混合交通の場合と水路巾の異なる場合の一部をのぞいて、かなりよく一致している。

一方、1隻の船が何回も衝突するので衝突回数 2 倍と衝突に関与する隻数はかならずしも一致しないが

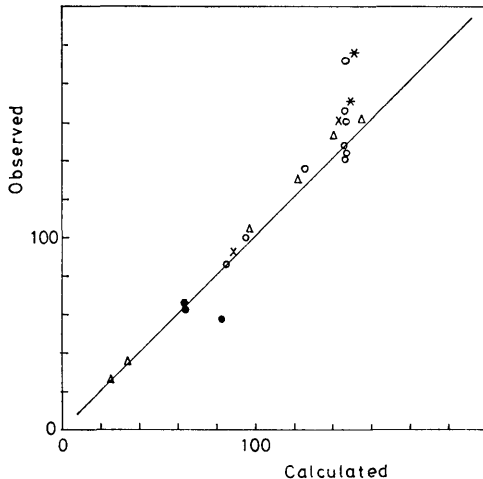


図-12 計算値と実測値の比較；衝突非関与隻数，
○大型×中型△小型●混合○*水路幅がことなる場合

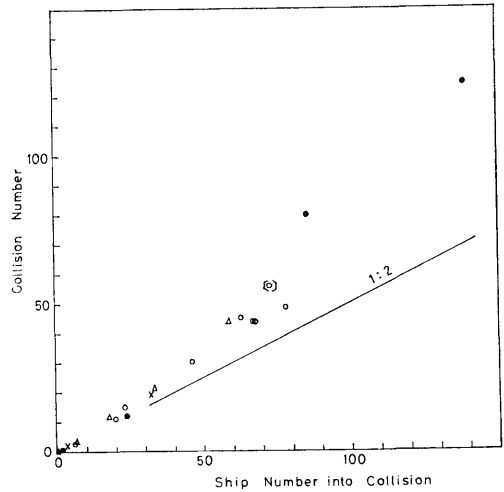


図-13 衝突関与隻数と衝突回数の相関，○大型×中型△小型●混合[○]オペレータが異なる場合

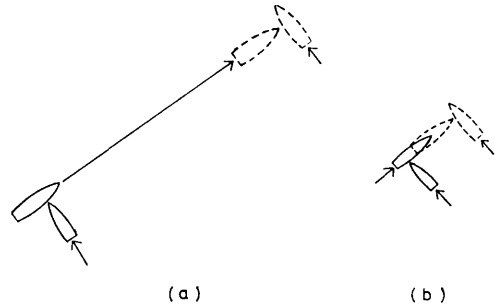


図-14 2通りの3体 encounter

図-13のようになんかよく相関があるから、議論をさらに進める必要がある。

まず3体 encounter の中には、図-14(a)のようになんか離れた位置で別々に2隻の船と encounter をおこなう場合もふくまれていることに注意する。これは独立の2体 encounter と解釈できる。すなわち衝突の回避が可能である。衝突がおこり得る3体 encounter は図-14(b)のようになんか近い位置で2船とおこなう場合である。そこである距離 d を仮定して、その距離を進むあいだに2船以上と encounter しなければ衝突しないと考える。したがって、ある船が i 隻の船と encounter しても、この i 隻の船がおたがいにすべて d より大きい距離をもっていれば、その船は衝突非関与と考えることになる。

i 隻の間の距離がすべて d より大きくなる確率を

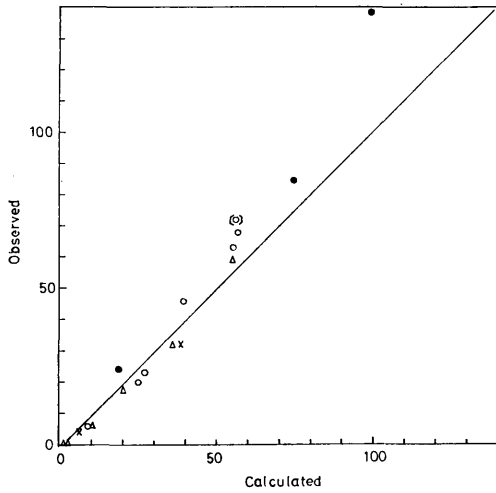


図-15 計算値と実測値の比較；衝突関与隻数，○ 大型×中型△小型●混合

計算するのに、まず i 隻の船の水路中 w のあいだの配置総数 Γ を計算すると

$$\Gamma = w^i / i!$$

となる。となりあう距離がどれも d より大きいような配置総数は、 w から各船の間隔それぞれに対する d を除いたものすなわち $w - (i-1)d$ の巾での配置総数となる。ただし $w > (i-1)d$ であって、この条件が成立しないとき、すべて d より大きく離れることはできない。結局、確率は

$$w > (i-1)d \text{ のとき } \left[1 - \frac{(i-1)d}{w} \right]^i,$$

$$w < (i-1)d \text{ のとき } 0,$$

となる。

1 隻の船が交差点を通過するとき、距離 d を進むあいだに 2 隻以上の船と encounter しない確率は

$$\sum_{i=0}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{\lambda^i}{i!} \left[1 - \frac{(i-1)d}{w} \right]^i$$

である。ただし $(i-1) < w/d$ $\lambda = Q'(\tau + \tau')$ である。これを衝突に関与しない確率とする。 d の値をえらぶ自由度が残っているが、たとえば換算長さ $l = 2L$ すなわち船の長さの 2 倍をとるのが適当と考えられる。混合交通の場合にはどうすればよいか問題であるが、一応大型船にたいするものを使ってみることにする。このようにして、衝突関与隻数を全隻数からひいた残り、すなわち衝突関与隻数の計算値と実際の値の比較を図-15にしめす。水路中の異なる場合の説明はこれで行った。混合交通の一例をのぞき、計算値とほぼよ

く一致している。

図-13で衝突関与隻数が衝突回数の 2 倍にならないのは、1 隻が何回も衝突するからであって、議論をさらに進めて、次のような仮説のもとに衝突回数を計算してみよう。

「交差点を通過するとき、前述の 3 体 encounter おおきごとに 1 回の衝突がおおきる。」

1 隻の船が交差点を通過するとき、他方の水路の i 隻の船と encounter をなし、その i 隻のとなり合う距離のうち j 個が距離 d より小であれば、この船は j 回衝突することになる。このことがおきる確率に j をかけて i について総和したものに i 隻の船と encounter する確率をかけて i について総和すれば、その結果は 1 隻の船が交差点を通過するときの衝突回数の期待値である。これに交通量をかけたものを、もう一方の水路について同様におこなったものと加えて 2 で割れば全衝突回数の期待値が計算できる。

i 隻のとなりあう距離のうち j 個が d より小である確率は

$$P_{ij} = (i-1) C_j \sum_{k=0}^{k'} (-1)^k C_k \left(1 - \frac{i-j+k-1}{w} d \right)^i$$

である。ただし $i \geq 2$ で、和の上限 k' は

$$\begin{cases} w > (i-1)d & k' = j \\ (i-m)d > w > (i-m-1)d & k' = j - m \\ (i-j)d > w > (i-j-1)d & k' = 0 \end{cases}$$

である。

1 隻の船が交差点を通過するときの衝突回数の期待

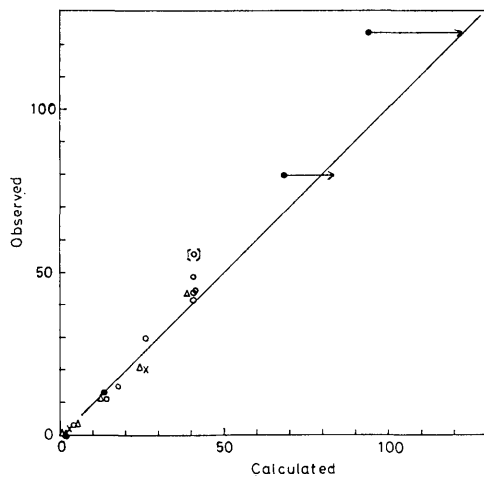


図-16 計算値と実測値の比較；衝突回数，○ 大型 × 中型 △ 小型 ● 混合

値は

$$\sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i!} e^{-\lambda} \lambda^i (\sum_j P_{ij})$$

となる。これに交通量 Q をかけて前述の計算をおこない全衝突回数をもとめ、計算値と実際の値の比較をおこなったのが図-16である。ここでも混合交通をのぞいてよく一致している。

そこで、混合交通の場合をもうすこし考察してみる。

まず、オペレーターの操船の仕方が、混合交通になったときかなり変わるのではないかという疑問がある。たしかに、操船命令回数などは平均よりちいさく出ているが、根本的に変化しているといえるほどの差ではない。一方において、距離 d については大型船にたいする換算長さ 200m を採用したので、小型船同士の 3体 encounter にたいしては確率の計算結果が過大に出るものと思わなければならない。したがって混合交通にたいする図-16の計算値は過大であって、実測値の差がますます大きくなる。この差は、操船の仕方のちがいがいなどでは説明困難である。

つぎに、交通量が小で衝突回数が小の場合、計算値はよく一致しているが、交通量大で衝突回数大のとき実際の値が計算値より大きい傾向が混合交通以外の場合にあらわれていることに注意する。図-16で比較的良好に一致している場合は、前述した基準交通量すなわちすべての船が平均1回の encounter をおこなうことが期待される交通量よりすくない交通量に対応していることも注意すべきである。一致のわるい2回のシミュレーションは、混合交通であって交通量も多く、1隻あたり平均2回に近い encounter の期待値をもっているのである。この位混雑している場合、他の効果が発生するのではないかと思われる。

混雑している場合、その影響でさらに encounter が増加する一種の非線型効果を考えてみる。混雑あるいは衝突のため多くの船が減速をおこなう。その結果特性時間 $\tau = L/v$ が増加し、encounter の期待値

$$QQ'(\tau + \tau')$$

が増加する。いま問題となっている混合交通の2つの場合において、比較的小数の大型船の $\tau = 16.13 \text{ sec}$ はそのままとし、小型船の $\tau = 7 \text{ sec}$ を 8.8 sec に増加させてみる。 $d = 200 \text{ m}$ のままで計算してみると衝突回数の計算値は図-15の矢印のように、それぞれ 68.9から83.2および94.1から122.7と変わり実際の値

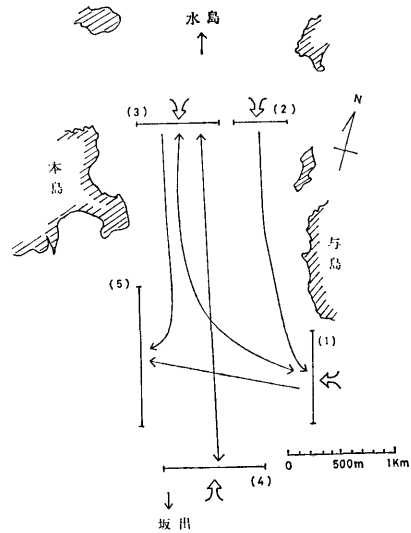


図-17 備讃瀬戸西部海域

とよく一致するようになる。

このやり方が正しいと主張できる根拠はないが、ごくわずかな減速ひいてはわずかな特性時間の変化で、大きな効果が得られるわけで、説明としては有力である。いずれにせよ、混合交通に関しては問題が残っている。

4. 備讃瀬戸西部でのシミュレーション

以上、かなり簡単な条件の下でのシミュレーションを実行して多くの知識を得た。つづいて現実の海域でのシミュレーションをおこなう前に、もう少し条件を複雑化した場合を実行する必要があるが、しめくりとして、備讃瀬戸西部におけるシミュレーションを計画した。瀬戸内海の東西にのびる主航路と水島一坂出航路の交差するところで本四架橋の予定地となっている。水路は図-17のようになっていて速力制限と一方通行が義務となっている。

昭和50年度の海上保安庁通航船舶実態調査報告書を参考にし、図-17のように(1)から(5)までの出入口を設定した。航路は矢印でしめしたようになっていて、とくに(1)→(5)は一方通行である。実態調査の交通量を数倍して過密状態をつくり出し、大型船の割合を多くしてシミュレーションを実行した。各種の船の各水路への配分は表-3のとおりである。

ステップ間隔は 10 sec おきでステップ数 634、オペレーターは違う人間が担当した。合流する部分がある

表-3 水路ごとの交通量配分

種類 \ OD	1→5	1→2	1→3	3→1	2→1	3→4	4→3	3→5	5→3	計
1	16		2			11				29
2	293	11	12	3	6	32	18	8	2	385
3	70	1	18			26	8	3	1	127
4	42		3			5		1		51
5	28		6			3				37
計	449	12	41	3	6	77	26	12	3	629

表-4 encounter の水路別・種類別の期待値

水路別	1~5	1~2	1~3	3~4	3~5
1~5		5.7	18.3	179.4	5.1
1~2			0.6	0.0	0.0
1~3				4.7	0.5
3~4					1.3
3~5					

種類別	1	2	3	4	5
1	3.0	40.0	15.0	5.9	4.8
2		40.0	44.8	15.0	14.0
3			9.2	8.5	8.3
4				1.2	2.6
5					1.1

し、水路も直線となっていないため、操船命令回数は前節の場合と比較できないが、ほぼ直線コースがある(1)~(5)と(3)~(4)に限ってみても encounter 1回あたり8回の操船命令が出されている。衝突1回あたりの時間おくれも約100秒であって、共に前節の場合より大きい。また乗揚げは全くなかった。

この交通量配分にたいして、あらかじめ encounter の期待値は表-4のとおり計算できる。合計は水路別にたいし215.6、種類別には213.4で丸めの誤差がある。1隻あたり encounter は平均0.69回である。

衝突の統計は表-5のとおりである。衝突回数は合計54回である。混合交通であるばかりでなく合流する場合もあるので、前節と同じような計算ができるかどうか問題であるが、一応交差している1~5、3~4の両水路のみをとりあげる。この両水路のあいだでは46回の衝突がおこっている。計算式の中には水路巾 w と距離 d が d/w の形ではいっているので、この値をいくらにえらぶか問題である。たとえば

$d/w=1/4$ のとき計算値 31.2

(192)

表-5 水路別種類別の衝突回数と全隻数に対する衝突数

水路別	1~5	3~4	1~3	1~2	計
隻数	63	25	5	2	95
回数	68	32	6	2	108

種類	1	2	3	4	5
衝突数	8	35	24	8	15
隻数	29	385	127	51	37
衝突比	0.28	0.09	0.19	0.16	0.41

種類別	1	2	3	4	5
1	0	2	3	0	3
2		11	11	4	7
3			5	3	2
4				0	1
5					2

$d/w=1/2$ のとき計算値 47.3

となる。 $d/w=1/2$ とすると結果が一致しているようであるが、そうすると $d \approx 400 \sim 500\text{m}$ となってしまう。200m近い長さの船もかなり存在(175m以上21隻)するし、相対的には長さの大きい船の衝突が多いから、この d の値ももっともらしいが、やや過大と思われる。一方 $d/w=1/4$ は、混合交通であることやここでは無視した他水路の影響をうけて実際の衝突が大なることを考え合わせれば妥当と思われる。

ただ計算結果からわかるように、 d/w の変動は、 τ の値の変動ほど計算値に影響をおよぼさない。したがって、この方法によってかなり近い計算値が得られることは確かである。

5. む す び

交差点における船舶事故を実験的に再現するシミュレーションをおこない、衝突のおこる条件についての定性的な結論と「実験室」内に限って与えられた条件から衝突回数を予測する方法を確立した。主な結論は以下のようなものである。

(1) オペレーターによって結果が異なるが、それは安全性（衝突最小化）と交通効率（通過時間最小化）の組合せの差として出てくる。

(2) 練習効果は、操船命令回数の減少・乗揚げの減少という形で表われるが、衝突回数には交通量ほどの影響をおよぼさない。

(3) 衝突によって、かなりの時間おくれが生ずる。

(4) 衝突による被害エネルギーと衝突前の運動エネルギーの比は、安全性の面からみた操船性能の評価量とみることができる。

(5) 同一種類の船の交差のとき、単位時間あたりの衝突回数は、交差部内船舶密度の3乗に比例する。

(6) 「ある距離 d を通過するあいだに2隻の船と encounter する場合1回の衝突が生ずる」という仮定の下に計算した衝突回数の期待値は、実際の衝突回数とかなりよく一致する。

さらに、瀬戸内海備讃瀬戸西部海域をえらんでシミュレーションをおこなって、すくなくとも「実験室」

内での衝突回数の予測に成功した。

ただし、この研究が応用できる交通量などの範囲を考慮して、実際海域における現象への適用については慎重であらねばならぬと考える。交通量小の場合の事故の原因はほぼ不注意と考えられているからである。しかし、高密度が原因の事故は、かならずしも高密度の交通流が定常的に存在するという条件を必要としない。交通量が小の場合でも、いつかはある場所に本研究で述べた「制限つき」3体 encounter が発生するはずである。このあたりに、本研究の結果を適用する余地があると思われる。

参 考 文 献

- 1) 渡辺健次；交差交通の研究 その1，船舶技術研究所研究報告 Vol. 9, No. 3, 昭和47年5月
- 2) 渡辺健次；交差交通の研究 その2，船舶技術研究所研究報告, Vol. 9, No. 4, 昭和47年7月
- 3) 渡辺健次・浜島金司；交差交通の研究 その3，船舶技術研究所研究報告, Vol. 11, No. 4, 昭和49年7月
- 4) 山田一成ほか；船舶交通流制御シミュレータの開発，船舶技術研究所研究報告, Vol. 15, No. 3, 昭和53年5月
- 5) 田中健一ほか；シミュレータによる船舶交通流制御法の研究，船舶技術研究所研究報告, Vol. 15, No.3, 昭和53年5月