船の衝突直径と衝突発生率

藤井 弥平*

Effective Collision Diameter and Collision Rate of Ship.

Y. Fujii

Abstract

Effective collision diameter, D , is calculated from number of collisions on three congested waterways, Uraga Suido, Akasi kaikyo, and Kanmon kaikyo, using a simplified equation,

$$P = (1/T) \int_0^T dt \int_s \frac{1}{2} \rho^2 V_{rel} D ds$$

where P , ρ , and V_{rel} are the collision rate, the density, and the relative speed respectively. This equation is deduced from the general equation introduced by the author by assuming the lengths of all ships are equal.

The collision diameter thus obtained is

$0.4 \sim 1.8 \times 10^{-4} L$ for collision of ships going in one direction

and

$1 \sim 3 \times 10^{-4} L$ for collision of ships going in opposite directions.

These values allow estimation of collision rate on fairways where traffic quantity and distribution of ship size and density are known.

概 略

さきに船の密度・相対速力・衝突直径から対象水域の衝突発生率をもとめる式を報告したが、この衝突直径の値がえられていない。浦賀水道・明石海峡・関門海峡での衝突事故を調査し、衝突直径が、同航のとき船の長さの1万分の1前後、反航のとき1万分の2前後（ちらばり：6 dB：2倍～1/2倍）であることがもとめられた。水路条件・海象のちがいやデータ数などを考慮すると3つの狭水道での値はかなりよく一致するといえよう。

1. は し が き

さきに避航と衝突について解析をこころみ、(1)避航と衝突がおなじように取扱えること、(2)同航の場合、後方閉塞領域の値をもちいた計算値と、レーダによる観測からもとめた避航回数やコースレコーダからもとめた実際の避航回数がかなりよい一致をしめすこと、(3)避航と衝突の二つを二次元気体の分子間の斥力-引力ポテンシャルをもちいて表現できるみこみのあることをしめた[1]。なお、海外の衝突の統計や簡単な計算について紹介した[2]。

つぎに衝突直径をもとめるため海上保安庁の海難調査票を中心にしらべた。また豊田氏等[3]、山口氏等[4]、巻幡氏等[5]による交通実態調査による密度、航跡分布などをもちいて、同航の

* 電子航法研究所（三鷹市新川6-38-1）

場合と反航の場合の衝突直径をもとめることができたので報告する。

2. 衝突のデータ

衝突の調査は主として海難調査票によつたが、この票は年によりかなり形式がかわり行合の状態についてわかりにくい場合も多くこのときは保安部に保管されている電報によつた。なお、さきの解析では通常の航行中の船の衝突を対象としているので、半速以下で航行している船や係留・漁撈中の船あるいは流木などの衝突を除外し、また要救助・不要救助*の如何をとわないことにした。表1に横浜・神戸・門司各保安部のご協力をえて作成した昭和37年から43年末までの衝突件数をしめす。表中※のついている値には二船とも不要救助である衝突をふくんでいないおそれがあるので実際の数値はこれより多いと考えていただきたい。なお、要・不要の区別は完全に客観的なものといいいにくく、年により担当官により幾分の差異があるものと推定される。

表1 浦賀水道・明石海峡・関門海峡における航行中の船舶相互の年間衝突数

昭和年	37	38	39	40	41	42	43
浦賀水道	3	3	6	4	9	9	13
明石海峡	11	5	5	6	1#	4	10
関門海峡	10※	10※	8※	2※	11	18	17

注：浦賀水道は剣崎沖から第5灯浮標付近まで

明石海峡はカンタマ南灯浮標から堺川・鶴崎まで

関門海峡は部崎から六連島附近まで

#：この年の件数は平均値にくらべ異常に小さいため、以後計算からは除外する。

※：不要救助をふくまない。

衝突した2隻のうちいずれもが損傷軽微で不要救助となる件数は、浦賀・明石・関門の順にそれぞれ50%，43%，65%ぐらいである。また、通行船舶の大きさの割合と衝突した船の割合を表2にしめす。このように船が大きいくほど衝突がおこりやすく、塩原氏の調査結果[6]も考慮し、衝突直径を船の長さ L をものさしとしてあらわすことにしよう。

表2 狭水道の交通量と通行船舶の大きさの分布および衝突船舶の大きさの分布
(大きさの分布は%であらわす)

船の大きさの級		Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	1 日交通量	平 均 量
浦賀水道	通行船舶	0.1	14	22	40	20	— 4 —		%	600隻	50m
	衝突船舶	10	53	13	19	4	1	%			
明石海峡	通行船舶		3	15	25	32	—25—		%	1, 200隻	32m
	衝突船舶		4	8	50	27	5	4	2%		
関門海峡	通行船舶	0.1	3	8	29	—60—			%	900隻	28m
	衝突船舶		14	17	38	26	3	— 2 — %			

注：衝突船舶の数は衝突件数の2倍であるからサンプル数は100程度、1日交通量は概数、文献(3)、(4)、(5)による。

ここで、船の大きさをあらわす級IIは総トン数1.8万～10万トンの巨大船（長さ約240m）を、III

* 海難のうち救助された海難および発生当時救助を必要としたとみられる海難を要救助海難、それ以外の海難を不要救助海難という。

は3,000~18,000トンの大型船(長さ約130m)を, IVは500~3,000トンの中型船(約70m)を, Vは100~500トンの小型鋼船・機帆船クラス(約33m)を, VIは20~100トンの小型船(約18m, 機帆船が多い)を, VIIは5~20トン, VIIIは1~5トン級をあらわす。*

つぎに同船, 反航および横切の判別を, 出港地と仕向地によつておこなつた。近年の海難調査票は記載もくわしく, 逃走した船以外は判別でき, わずかの不明のものは同航・反航などの衝突件数に比例してわりふり四捨五入した。

衝突直径をもとめるためにもちいるデータは, (1)浦賀水道では年間交通量が10年間で約3倍に増大しているため, 39年から43年のものをとる。1日交通量は41年の値をもちいる。(2)明石海峡の交通量の年変化は小さいため37年から43年のデータをすべてもちいる。(3)関門海峡は昭和40年以前の資料に二船とも不要救助と判定された衝突がふくまれているおそれがあるので41年から43年までのものをもちいたが, データ数は他の二つの水道のものと大差がない。これらのデータを行合に注目して分類したものを表3にしめす。なお, 参考のために気・海象による区分もしめしておく。ここで, 良とは視程4以上, 風力・波浪・うねりなどの階級がすべて2以下, 潮流2ノット以下の条件をすべてみたすときを良, 視程1以下, 風力・波浪・うねりのいずれかが5以上, 潮流5ノット以上の条件が一つでも該当すれば不良, それ以外をやや不良とした。

表3 衝突の行合別・気象海象別の分類(数字は件数)

	行 合			気 象 ・ 海 象			合 計	備 考
	同 航	反 航	横 切	良	やや不良	不 良		
浦賀水道	9	30	2	22	15	4	41	昭39~43
明石海峡	10	27	4	35	2	4	41	昭37~43
関門海峡	10	33	3	41	3	2	46	昭41~43

これらのデータ数は充分多いとはいいがたく, 特に横切の場合は不足である。ふつう10例ぐらいあると3dB(その値の0.7倍から1.4倍)程度のたしかさとなり, 25例あると1dB(±20%)程度のたしかさがえられるものと考えられる。

3. 交通量から計算した同航のときの衝突直径

さきに報告した衝突発生率と衝突直径の関係式,

$$(\text{対象水域の衝突発生率}, P) = [(\text{衝突直径}, D) \times (\frac{1}{2}) \times (\text{密度}, \rho)^2 \times (\text{相対速力}, V_{rel})] \text{の合計の時間平均}$$

を厳密にかくと,

$$P = (1/T) \int_0^T dt \cdot \iint_{x,y} dx dy \cdot \iiint_{L_1, L_2} dL_1 dL_2 \cdot \iint_{\vec{V}_1, \vec{V}_2} \frac{1}{2} \cdot \rho^2 D \phi_1 \phi_2 |\vec{V}_1 - \vec{V}_2| d\vec{V}_1 d\vec{V}_2 dL_1 dL_2 \cdots \cdots (1)$$

となることをさきにのべた。ここに ϕ は船の大きさと速度(針路もふくめて)の分布関数で基準化してあり, t は時間, L は船の長さ, x と y は水面の座標をあらわす。

もし, 水路の幅 W , 交通量 Q , 平均速力 V , 船の長さ L が一定で, 入港船出航船が同数かつ右側通行をまもりしかも船の密度が一定という簡単な場合を考え, 相対速力の大きさ αV が, 実際しばしばみられるように $0.3V$ のときを考えよう。

* 報告(1)とは1階級ずれているが, これは総トン数が10万トン以上の船があらわれ, 10万~50万トンの級をもうけてこれを級Iとしたためである。今後長期にわたりこの分類は変更しないつもりである。

水路の長さを A とすると、上の式は、

$$P = \frac{1}{2} \rho^2 \cdot D \cdot \alpha VWA = 0.15 \rho^2 DVAW \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

また交通量と密度の関係はの場合、

$$Q = \rho VW \quad \dots\dots\dots (3)$$

とかける。したがって(2), (3)式から、

$$D = PVW / 0.15 Q^2 A \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。この式をもちいて、三つの水域で同航の場合の衝突直径のおよその値をもとめてみよう。

浦賀水道では推薦航路を中心とした幅 2.4km の帯状の水路に全船舶の80%が航行しているので、 W を 3km とする。また平均速力は11ノットで単位をあわせると 20km/時、平均長は50m である。剣崎から第5灯浮標附近までとると A は25km で、 P は $9/5 \times 8,760 \text{時}^{-1}$ となる。ここに $5 \times 8,760$ は昭和39年初から43年末までの時間数である。

(4)式にこれらを代入すると、 Q は 600隻/日 = 25隻/時であるから、

$$D = 9 \cdot 20 \cdot 3/5 \cdot 8,760 \cdot 25 \cdot 25 \cdot 25 \text{ km} = 0.5 \text{ cm} = 1 \times 10^{-4} L$$

となる。観音崎前面から第5灯浮標までにすると衝突数が9から7にへり、 A は 12 km と半減し、

$$D = 0.8 \text{ cm} = 1.6 \times 10^{-4} L$$

となる。

同様の計算を他の海峡についておこない、それを表4にしめす。

表4 交通量から求めた同航のときの衝突直径, D_{co}

項目 水道名	Q 隻/時	A km	W km	ρ km^{-2}	P $10^{-4}/\text{時}$	V km/時	L m	D_{co}
浦賀水道	25	25	3	0.42	0.21	20	50	$0.5 \text{ cm} = 1 \times 10^{-4} L$
明石海峡	50	10	3	1.1	0.16	15	32	$0.22 \text{ cm} = 0.7 \times 10^{-4} L$
関門海峡	38	15	0.6	4.5	0.38	14	20	$0.11 \text{ cm} = 0.4 \times 10^{-4} L$

同航の場合、このような大まかな計算をしても、衝突直径がかなりよい一致をしめす。いいかえると水路の条件、海・気象条件、航行船舶の大きさなどが大きくことなる水域でも、おなじ位の値: $0.8 \times 10^{-4} L$ でちらばりは 6dB (2倍から $\frac{1}{2}$):をしめす。

4. 船の密度から求めた同航および反航のときの衝突直径, D_{co} と D_{op}

豊田氏ら[3] は昭和41年末に浦賀水道の観音崎附近から第5灯浮標附近までの水域でミリ波レーダの写真観測をおこない、報告書の P97 と P98 に北航船と南航船の密度, ρ_N と ρ_S を、P99 に $\rho_N + \rho_S$ を、また P100 に行合率として $\rho_N \times \rho_S$ をしめしている。この一部分を図1に再掲した。

数字は画枚286枚分で、 0.04 km^2 の中の船の数をあらわしているから、密度を km^{-2} であらわすためにはこれらの数字に $1/(286 \times 0.04)$ を乗じ、または行合率には $1/(286 \times 0.04)^2$ を乗じなければならない。なお、この密度は輻輳時のもので、平均密度はこれに交通量の時間変化を考慮して、0.65倍する。

なお、対象水域が小さくなり、昭和39年から43年の5年間でここでの衝突件数は同航のときで7、反航のときで22件となる。

図1 浦賀水道附近の南航船の密度（左）および行合率（右）（豊田氏らによる）

厳密な式(1)を、船の大きさが一定で平均速力が V 、相対速力が αV である場合に適用すると、

$$P_{co} = (\alpha_{co} V D_{co}) \times \left[(1/T) \int_0^T dt \int_x \int_y \frac{1}{2} \cdot (\rho_N^2 + \rho_S^2) dx dy \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

および

$$P_{op} = (\alpha_{op} V D_{op}) \times \left[(1/T) \int_0^T dt \int_x \int_y \rho_N \rho_S dx dy \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここに添字 co (codirectional) は同航を、op (opposite-directional) は反航を意味し、 α_{co} はふつう約0.3、 α_{op} は約2となる。また、 ρ^2 の平均は ρ の平均の2乗より大きく（等しいこともあるが）、たとえば浦賀水道の場合、 ρ^2 の時間平均は、 ρ の時間平均の2乗の1.4倍（南航）ないし1.1倍（北航）となる。

この時間による補正もおこなつて、水域（面積約 40km^2 ）での $\frac{1}{2}(\rho_N^2 + \rho_S^2)$ の積分は 4.5km^{-2} 、 $\rho_N \rho_S$ の積分は 0.8km^{-2} となる。後者の前者に対する比が少ないほど右側通行がよく守られていることになる。

つぎに、式(5)または(6)をもちいて衝突直径を計算すると、 V は 20km/時 であるから、

$$D_{co} = 0.55\text{cm} = 1.1 \times 10^{-4}L \quad \text{および} \quad D_{op} = 1.6\text{cm} = 3 \times 10^{-4}L$$

となる。 D_{co} は先に試算した値に近い。

つぎに明石海峡についてしらべてみよう。図2は文献[4]のP65の図である。交通量に棒グラフであらわされる百分率をかけ、各セクションについて、その大きさに応じた速力の値と式(3)をもちいて密度を計算す。つぎにこの計算を大型船・中型船・機帆船などについておこない、その和をとつて東航船と西航船の密度分布をもとめ、時間平均の補正もおこなつて、 $\frac{1}{2}(\rho_E^2 + \rho_W^2)$ の

図2 100~1,000トンの小型鋼船の通過分布図（東行船，百分率，交通量3.1隻/時），（山口氏らによる）

積分として 6.3km^{-2} ， $\rho_E\rho_W$ の積分として 5.5km^{-2} をえた。

この水域での昭和37年から43年までの衝突件数は同航の場合が10件，反航の場合が27件である。式(5)と(6)をもちい，速力を 15km/時 として，

$$D_{eo}=0.57\text{cm}=1.8\times 10^{-4} \text{ および } D_{op}=0.26\text{cm}=0.8\times 10^{-4}$$

となる。ここに L として 32m をもちいている。

浦賀水道の場合にくらべて反航の場合の衝突直径がかなり小さくでていることは，反航の場合の密度の積の積分が大きく，同航の場合の積分の90%ほどもあるためによる。浦賀水道の場合は18%程度である。これは明石海峡で右側通行がよく守られていないということではなく，交通量観測のためのゲートラインのセクション幅が $600\text{m}\sim 1\text{km}$ と大きくて $20L\sim 30L$ 位もあり（浦賀水道では $4L$ 程度で後方閉塞領域の幅程度）そのセクション内で東航と西航の航跡がわかれていても，それが積分の値に反映しないためと考えられる。かりに反航のときの航跡が浦賀水道のように18%程度と小さければ， D_{eo} も $4\times 10^{-4}L$ と浦賀水道での値に近いものになる。

行合率または反航の場合の密度積をもとめるとき単位面積の一辺，またはセクション幅は，航跡の分離が認められるほど $\sim 3L$ 程度—充分小さくないと衝突直径 D_{op} をもとめることが困難であることは容易にうなづけよう。一方，同航の場合には観測のセクション幅を小さくすると，求められる衝突直径の値は小さくなるが，その変化は小さく，前節のような大まかなとりあつかいでもかなりよい値がえられる。

関門海峡の場合も，セクション幅が $7L$ 程度で，航跡図は潮流の大きさによつて分類されている。潮流が2ノットをこえる時間は全体の30%程度であり，航跡のパターンも憩流時と大きくはことならないので，0~2ノットの航跡図をもちいて概算した。交通量から，速力を 14km/時 と

して密度をもとめて計算すると、 $\rho_E \rho_W$ の積分は 16km^{-2} 、 $\frac{1}{2}(\rho_E^2 + \rho_W^2)$ の積分は 40km^{-2} で、両者の比は40%程度である。衝突直径は、

$$D_{co}=0.11\text{cm}=0.4\times 10^{-4}L \text{ および } D_{op}=0.28\text{cm}=1\times 10^{-4}L$$

となる。同航の場合、前節の大まかな見積りがかなりよくあっている。 D_{op} は、セクション幅が小さくなるともう少し大きい値となるものと考えられる。

以上を総合して、同航の場合は、

$$D_{op}=0.4\sim 1.8\times 10^{-4}L \text{ でほぼ1万分の1}L \text{ 程度}$$

反航の場合で、

$$D_{op}=0.8\sim 3\times 10^{-4}L \text{ で1万分の2}L \text{ 程度}$$

という値がえられた。

5. む す び

狭水道のうちでも交通の輻輳している浦賀水道・明石海峡・関門海峡の3つについて、前回に報告した船の衝突発生率をもとめる関係式一般の密度または交通量、水域の幅と長さ、平均速力、衝突直径から水域での衝突発生率をもとめる式一をもちいて衝突直径をもとめた。

これらの3つの水域では交通実態がかなりよく調査されており、中でも浦賀水道では密度分布までもとめられていて、

$$\text{同航の場合 衝突直径は1万分の1}L, D_{co}\doteq 10^{-4}L$$

$$\text{反航の場合 衝突直径は1万分の3}L, D_{op}\doteq 3\times 10^{-4}L$$

という値がえられた。これは前回の避航に関する研究結果とあわせ考えると同航のとき10万回のおいこしで1回、反航のときは10万回の避航で3回位の衝突がおこることを意味する。

明石海峡・関門海峡は潮流や船の大きさ、水路の屈曲などの大きなちがいのあるにもかかわらず、いずれも浦賀水道での値の6dB(2倍 $\sim$ 1/2)の範囲にはほぼはいつている。したがって、わが国のほとんどの海峡で、

$$\text{衝突発生率}=[\frac{1}{2}\rho^2_{\text{同}}\alpha_{\text{同}}D_{\text{同}}+\rho_{\text{反}}\rho_{\text{反}}\alpha_{\text{反}}D_{\text{反}}+\rho_{\text{横}}\rho_{\text{横}}\alpha_{\text{横}}D_{\text{横}}]V \text{ の積分の時間平均}$$

として発生率が予測できよう。また、ある船が出港してから仕向地に到着するまでの経路について交通実態一般の密度・速力などがわかつていれば衝突の危険が予測できよう。横切のときの衝突直径は資料不足のため得られていないが反航の場合の値と大差ないものと考えている。

この調査からひきだせるもう一つの結論は、航路分離が衝突防止に役立つ効果を数量的に示めることである。たとえば東航・西航を完全に混合した場合と完全に分離した場合の衝突件数の比は、

$$(2D_{\text{反}}+2\alpha_{\text{同}}D_{\text{同}})/4\alpha_{\text{同}}D_{\text{同}}$$

となり、ここでえられた D の値と、 $\alpha_{\text{同}}$ として 0.3 をもちいるとこの比は 5.5 となる。交通が輻輳して $\alpha_{\text{同}}$ の値が小さくなれば一層分離の有利さがめだつ。また同航の場合の衝突は接触が多いのでなおさら損害が小さい。なお、中央分離帯を設置するメリット計算にも以上の考察が利用できよう。

以上で衝突と交通量の関係についての解析の第一段階をおえたことを報告し、研究にあたってご協力をいただいた海上保安庁の各位、ご意見をよせられた海上交通研究部会の各位にあつく謝意を表わしたいと存じます。

参 考 文 献

- [1] 藤井弥平：避航と衝突の確率について，日本航海学会創立20周年記念論文集，p. p. 63~73 (1968)

同上正誤表

ページ・行	誤	正	ページ・行	誤	正
63 11	Value	value	66 式中 25	$\int \int_{V_1 V_2}$	$\int \int_{\vec{V}_1 \vec{V}_2}$
64 11	1.2回	1.6回			
64 11	0.5回	0.7回			
66 表中 32	$3\pi/8$	$3\pi/4$	67 式中 2	$l - (\vec{V} - \vec{V}_{mean})^1/2\sigma^1$	$e - (\vec{V} - \vec{V}_{mean})^2/2\sigma^2$
67 32	σ^2	ρ^2	67 式中 19	$\sqrt{\pi} \rho_2 D_r/2$	$\sqrt{\pi} \rho_2 \bar{D}_r \sigma/2$
67 図中 33	密度 σ	密度 ρ	66 表 2	$\text{km}^{-2}\text{h}^{-1}$	km^{-2}
70 11	$\sigma L_i + \sigma L_j$	$6L_i + 6L_j$			

67式B正しい形

$$P = \frac{\rho^2}{2} (4\pi^2 \sigma^4)^{-1} \int_{\vec{V}_m} \exp\left[-\frac{(\vec{V}_m - V_{mean})^2}{\sigma^2}\right] d\vec{V}_m \int_{\vec{V}_r} D_r \cdot \exp\left[-\frac{V_r^2}{4\sigma^2}\right] \cdot V_r d\vec{V}_r$$

- [2] 藤井弥平：海上交通量と衝突についての考察，航海 28号，p. p. 103~105，(1968)
- [3] 東京商船大学船舶運航技術研究会：浦賀水道船舶交通実態調査報告書，昭和42年12月 (1967)
- [4] 神戸商船大学港湾運航技術研究会：明石海峡船舶交通実態調査報告書，昭和39年4月 (1964)
- [5] 第四港湾建設局：関門航路における通航船舶調査報告書，早瀬戸地区，昭和42年3月および大瀬戸地区，昭和43年3月
- [6] 塩原礼次郎：タンカーの海難発生率について，日本航海学会誌，39，p. p. 111...118，(1968)