海上交通事故の研究—V.

—損害の程度—

藤井 弥平*

Study on Marine Traffic Accident—V.

—The Degree of Damage—

Yahei FUJII

Abstract

3,238 vessels involved in collisions and 1,841 stranded vessels are surveyed and the results give the probabilities of collision and stranding as functions of ship size and degree of damage.

Analitical representation of the probability of collision, $f_{(x,y)}$ is studied where y is the ratio of gross tonnages of collided vessels and x is the degree of damage. $f_{(x,y)}$ yields the average value of x as $0.015y^{0.6}$ and this allows the estimation of the total amount of economical loss due to collision in a certain water area where traffic has been surveyed.

1. はじめに

これまで避航と衝突の確率⁽¹⁾, 衝突直径⁽²⁾, 水域の衝突危険度⁽³⁾⁽⁴⁾, 乗揚確率⁽⁵⁾, 明るさ及び視程の事故率に及ぼす影響⁽⁶⁾と海上交通事故に関して統計的調査に基づいて一連の研究を進めてきた。これらはすべて接触など軽微な損害の場合まで含めた資料を調査の対象としている。また, 塩原・藤井・神鳥・杉崎・原・山口・長沢・原・大橋・黒田・鞠谷の各氏の研究により海上交通事故の発生構造は次第に明らかになってきている⁽⁷⁾。

しかし, 海上交通事故の損害に関しては, ミノルスキーの研究⁽⁸⁾につづく衝突・乗揚による船の損傷の解析以外はあまり見当たらない⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これらには衝突時の船首の平均貫入量が5 m前後, 乗揚の貫入の深さが0.5 m前後などという結果が得られ, またミノルスキーの解析の方法には学ぶべき点が多い。しかし衝突・乗揚でも貫入にいたらない場合が大部分であり, 特に衝突で両船のトン数に大きな開きのある場合, 小さい船がはねとばされ, あるいは転覆となる場合が少なくない。

今回, ここに海上交通事故, 特に船と船との衝突について, 損害の程度と頻度, 行会関係, 港内と港外, 二船の総トン数の比などについて定量的な解析を行なった結果について報告する。この研究は, 前回の海上交通管制と海上交通事故の研究⁽¹¹⁾につづくものであり, 海上交通管制の効果を評価するのに必要であり, 管制の費用便益の解析にも応用できる。

2. 調 査

資料として昭和44年から46年の3年間の海難調査票(海上保安庁原票)を用い, 救助を要したものも要しなかったものもあわせたが, 距岸20海里程度以上(ほとんどが漁船, 操業中の衝突)を除いた。資料数は船と船の衝突が3,238隻, 船と物の衝突が280隻, 乗揚が1,841隻である。この数と, 同じ期間の海難統計等の隻数を表1に比較して示す。このように各調査によりデータ数が大きく異なる。船と船の衝突は軽微な損傷を含めると年平均8千隻, その約1/6が海上保安庁で調査され, 要救助と判定されるのが年平均400隻, 全体の1/20程度であった。船と物の衝突は年平均3千隻と少なくないが, その1/50弱が要救助とされている。一方, 乗揚では約1/5が要救助とされた。

* 正会員 電子航法研究所(東京都三鷹市新川6-38-1)

表1 各種統計における3年間の衝突と乗揚の隻数

	海難統計	海難審判 理事所調査	要救助海難統計		今回の調査
			要 + 不要	要	
船と船の衝突	24,954	23,936	4,084	1,397	3,238
船と物との衝突		11,631			280
乗 揚	8,026	8,934	1,864	1,698	1,841

図1 海難のタイプによる船体損害率と運航障害度の関係、○は港内、×は港外の今回の調査による。

難は衝突より右にくるものと推定される。

船体の損害のほかに乗組員の死傷、積荷の損失、あるいは油流出等による損害があるが後にのべるようにこれらを船体損害率と関係づけることも無理ではない。

3. 調査結果

資料を、事故の種類、港内・港外の別、総トン数別あるいは船体損害率別に分類した結果を表2に示す。ま

表2 事故隻数の分類集計

2(A) 総トン数別集計

		~20 t	~100 t	~500 t	~3千 t	~2万 t	2万 t ~	小 計
船と船の衝突	港内	267	235	517	167	143	9	1,338
	港外	437	281	705	285	171	20	1,900
乗 揚	港内	111	153	340	55	39	6	704
	港外	219	270	519	76	39	14	1,137
船と物との衝突		50	52	86	52	34	6	280

2(B) 船体損害率別集計 第1行 0.31は0.31%まで、0.62は0.31~0.62%を表す。

x		0.31	0.62	1.25	2.50	5%	10%	20%	40%	80%	100%	小 計
船と船の衝突	港 内	572	91	121	86	72	80	71	73	80	92	1,338
	港 外	725	95	151	165	144	137	124	103	95	161	1,900
乗 場	港 内	313	30	37	35	48	45	48	43	30	75	704
	港 外	339	34	52	91	76	98	97	64	62	237	1,137
船と物との衝突		40	7	25	25	28	28	27	21	10	69	280

表3 船体損害率が x 以上となる確率

単位：％／隻・年

総トン x	船と船との衝突			乗 揚			船と物の衝突		
	0～100%	1～100%	10～100%	0～100%	1～100%	10～100%	0～100%	1～100%	10～100%
20～100 t	3.2%	0.65%	0.38%	3.2%	0.64%	0.40%	1.6%	0.10%	0.07%
100～500 t	36%	1.9%	0.59%	18%	1.5%	0.74%	16%	0.21%	0.07%
500～3000 t	60%	3.1%	0.39%	18%	0.78%	0.32%	55%	0.69%	0.47%
3000 t 以上	66%	1.8%	0.27%	11%	0.59%	0.20%	58%	0.66%	0.53%

ず、このデータと日本在籍隻数から x がある値以上となる確率のおよその値(事故資料には日本沿岸の外国船の事故を含み外国沿岸の日本船を含まないため)を求めることができ、これを表3に示す。ただし軽微な損傷まで含めた全事故隻数は海難審判理事所の資料によった。なお、昭和45年の在籍隻数は漁船を含めて20～100トンが14,985隻、～500トンが10,129隻、～3,000トンが1,970隻、3,000トン以上が1,364隻であった。

なお、3,000トン以上の船の乗揚及び船と物との衝突で損害の大きい場合の大部分は荒天によるもので交通事故とやや異なる意味のものであることに注意されたい。

表3に見られるように、損害率10%以上のひどい交通事故のかげにはその100倍程度もの軽微な事故が起っているのである。

4. 船と船との衝突による損害の解析

つぎに船と船との衝突についてその船体損害率が x である場合の相対頻度分布関数 $f_{(x)}$ を求める。いうまでもなく $f_{(x)}$ は2船の総トン数の比、 γ 、や相対速力、交差角度、衝突部位などの関数であるが、 γ は別として海難調査票からよみとれるデータはかぎられている。そしてその量に関して不記載例の割合が多いと処理結果の信頼性が落ちる。

この点で総トン比 γ と港内港外の区別はほとんどすべて海難調査票より求められる(あて逃げなどを除いて)。また、一部の外国船などをのぞいて x も求められる。このほか衝突水域と仕向港、あるいは航行状態から行会関係も件数のほぼ8割程度は求めることができる。

なお、運動力学から見ると、総トン比よりも衝突時の二船の質量比をとる方が目的にかなっているが、そのためには載荷量バラスト等を考えにいれなければならない。ここでは最も計算しやすい総トン比を用いることにしたが、実際の質量比の2倍から1/2位の範囲、悪くても3倍から1/3程度におさまっているものと考えている。

船体の損害の評価もむづかしく、たとえば第十雄洋丸の船体の損害は海難調査票には80億円と記載されているが、損害保険は36億円とか聞いている。このように x の値もその精度は10%とか20%というのでなくてむしろ2倍から1/2という程度のもと考えられる。従って x も γ も、そして $f_{(x, \gamma, \dots)}$ も対数をとったり、区分するときにも対数軸上等間隔になるようにした。

また、港内港外別、損害率別というように小さい区分にすると小区分内のデータ数は小さくなる。一般に事故数の頻度分布はポアソン分布に従い、そのためデータの数が多いとデータの「ゆらぎ」が大きくなる。これを避けるため相対頻度分布関数 f の代りにその積分である相対累積頻度関数 F を用いて傾向を見やすくするようにした。一般に事故の規模とそれに対する累積頻度を両対数目盛上にプロットすると直線上に乗る場合が多い。この直線はパレート線と呼ばれる。ここではデータの整理にあたりこのパレート線を用いて解析することにした。

また、ここでは海難調査票を用いているが損害の軽微なものなどは調査されていない場合が多く、調査資料の5倍ものデータがもれていると考えられる。

先に昭和41～43年について軽微損傷も含めた全事故を調査し、船と船との衝突隻数として港内では8,440隻、港外では4,210隻を得ている。しかもこれは今回の調査と同じように距岸距離の大きい場合や外国の港での事故を除外してある。なお、港難審判理事所の資料によると昭和44～46年の船と船の衝突は昭和41～43年のものの1.2倍となっているため昭和44～46年の3年間で港内では $8,440 \times 1.2 = 10,130$ 隻、港外では $4,210 \times 1.2 = 5,050$ 隻の衝突があったものとする。また、今回の調査の港内衝突隻数1,338隻と10,130隻あるいは港外の1,900隻と5,050

隻との差にあたるものはすべて損害が軽微であったものとする。

まず、船体損害率 x と行会関係のデータを表 4 に、相対累積頻度と船体損害率 x との関係を図 2 に示す。ただ

表 4 行会別、港内外別、船体損害別衝突隻数。表中の船体損害率 x の欄の表示は、その左の値からその値 (2.5% なら x が 1.25~2.5% の範囲) までの範囲をあらわす。

	x	0.31 %	0.62 %	1.25 %	2.5 %	5 %	10 %	20 %	40 %	80 %	100 %	小 計
反 航	港 内	129	26	50	27	24	30	19	23	23	31	382
	港 外	183	44	78	82	73	62	44	25	13	60	664
横 切	港 内	56	11	8	15	3	6	6	10	12	13	140
	港 外	66	14	13	11	16	8	15	15	11	7	176
同 航	港 内	81	9	15	7	10	9	12	8	14	17	182
	港 外	134	21	28	28	19	13	13	12	16	20	304
停 漁	港 内	256	40	40	29	38	26	27	23	20	23	522
	港 外	279	11	23	33	25	45	47	46	55	54	618

図 2 行会別の船体損害率の相対累積頻度、補正済み
△印：反航，○印：同航，×印：横切，◎印：停泊・操業等。

し、港内では F に 0.132 ($=1,338/10,138$) を乗じ、港外では 0.38 ($=1,900/5,050$) を乗じて補正を行なっている。この図のように (主として補正係数のためではあるが) 港内港外の差は大きく、それに比べて行会条件による相違はやや小さい。

別のデータとして東京湾内の船と船の衝突を調査しているが、3,000 トン以上の船の衝突では海上保安庁ではあまりもれることなく調査しているものと考えられる。最近の 9 年間のデータで総トン比が 2 から 1/2 のものをしらべたが、平均損害率が港外では 2.3%、港内で 1.1% を得ている。

このように港内と港外では損害率が 1:2 から 1:3 程度のひらきがあることは注目されてよいと考える。つぎに総トン比 y について区分し、 x に関する頻度分布を求めこれを表 5 に示す。また、データの数の多い y が 0.316 から 3.16 のものについて港内と港外のちがいを示す。表 6 から平均損害率が求められるが、港内では 1.1%、港外では 4.0% (共に補正済み) で、

表 5 総トン数比 (y) 別、船体損害率 (x) 別頻度分布。 x の表示は表 4 と同様。

$y \backslash x$	0.31 %	0.62 %	1.25 %	2.5 %	5 %	10 %	20 %	40 %	80 %	100 %	小 計
~0.0316	8	3	8	14	21	44	50	60	74	88	370
~0.1	20	14	12	12	24	18	20	34	30	41	225
~0.316	43	17	24	42	29	47	39	29	29	50	350
~1	129	47	75	81	82	67	64	42	33	52	672
~3.16	323	59	97	66	48	30	15	8	7	19	672
~10	239	20	34	24	10	10	7	3	0	3	350
~31.6	185	14	15	72	1	0	0	0	1	0	225
31.6以上	349	10	7	4	0	0	0	0	0	0	370

表6 総トン比 y が0.316~3.16の範囲の港内港外別船体損害率頻度, 相対累積頻度及び補正係数
(港内は0.132, 港外は0.38) を乗じたもの

x (%)	0.31	0.62	1.25	2.5	5	10	20	40	80	100
港内 隻数	224	61	79	54	46	39	32	24	21	22
相対累積頻度%	100	62.8	52.6	39.6	30.6	22.1	16.4	10.3	7.1	3.6
同上, 補正済%	13.2	8.3	6.9	5.2	4.0	2.9	2.2	1.4	0.94	0.48
港外 隻数	228	45	93	93	84	58	47	26	19	49
相対累積頻度%	100	69.3	63.2	50.8	38.2	26.8	19.4	12.7	9.2	6.6
同上, 補正済%	38.0	26.3	24.0	19.3	14.5	10.2	7.4	4.8	3.5	2.5

港内と港外をあわせた場合の平均値は2.1%である。

表5の y の区分ごとに x について相対累積頻度を求め、これを図3に示す。 x が大きいときはパレート線に乗っているが x が小さくなるとその線から離れてゆく。これは先にのべたように x , すなわち損害が小さい場合の事故が今回の調査にはいっていないためと考えられる。

また、たとえば $y=1$ のパレート線は y が0.316~1の区分のパレート線と、1~3.16の区分の線の丁度中間にあるというようにして $y=0.1, 1, 10$ などのパレート線をもとめ、次に補正係数

図3 総トン比(y)別船体損害率相対累積頻度
 $F(x, y)$, 補正前。

$x_{0(y)}$ とすると、 $F(x, y)$ は、 x が1から $x_{0(y)}$ まではそのパレート線、 x がそれより小さいときは $F=1$ という折れ線で近似させることができる。

港内と港外にわけた場合、 y が1より離れたところでは、港内港外のデータを合わせてもたりない位なのに一層たりなくなってしまう。また、補正係数のちがいが大きく影響するので、大まかな見積りとして、港外では上記の値の1.8倍(=0.38/0.21), 港内では0.63倍(=0.132/0.21)を用いればよい。

5. 衝突による損害の近似式

船体損害率が x 以上である相対頻度累積関数は、 x が $x_{0(y)}$ より大きいとき、図4から

$$F(x, y=100) = 0.056 x^{-0.51}$$

$$F(x, y=10) = 0.33 x^{-0.60}$$

図4 総トン比別船体損害率累積頻度,
補正済, 港内+港外。

$$0.21 = \frac{(1,338 \text{ 隻} + 1,900 \text{ 隻})}{(10,130 \text{ 隻} + 5,050 \text{ 隻})}$$

を乗じて得たパレート線を図4に示す。

相対頻度累積分布関数 $F(x, y)$ は、これらのパレート線と、 $F=1$ の線をなめらかな曲線でつないだものである。

パレート線が $E=1$ の線と交わる場所の x の値を

$$F_{(x,y=1)} = 0.0080 x^{-0.68}$$

$$F_{(x,y=0.1)} = 0.0040 x^{-0.90} \quad \text{及び}$$

$$F_{(x,y=0.01)} = 0.00001 x^{-1.1}$$

という近似式が得られ、 $F_{(x,y)} = ax^{-b}$ という形をしている。ここに a と b は y の関数である。相対頻度密度関数を $f_{(x,y)}$ とすると、

$$F_{(x,y)} = \int_x^1 F_{(x,y)} dx = ax^{-b}$$

で近似できるから、平均損害率 $x_{(y)}$ は

$$x_{(y)} = \int_{x_0}^1 xf_{(x,y)} dx + a = a + ab \left(1 - x_0^{1-b}\right) / (1-b)$$

として計算できる。

図5 平均船体損害率 x と総トン比 y との関係。○は調査値で×は計算値(港内+港外)。港内と港外に分離した線は推定。

視程に反比例する。

(2) 船の総トン数はほぼ船の長さ L の 2.7 乗に比例すること、日本損害保険協会の松岡秀次氏の調査によれば(未発表) 1970年前後の全損船舶 1 総トンあたりの損害保険支払額は約 10 万円で貨物は 5 万円程度、このほか日本船主責任相互保険組合 (Protection for Indemnity) の分が 1 総トンあたり 7 千円程度であること、昭和 44 年～46 年の要救助海難統計から積荷の損害は船体損害の 2 割強であること、及び物価上昇を考慮すると、衝突による長さ L_m の船の損害額は

$$6 \times (L/100)^{2.7} \text{ 億円}$$

と見積ることができる。ここで、3,000 総トン長さ 100_m の船を基準にして計算した。

(3) 長さ L_1 の船と L_2 の船が衝突した場合の平均船体損害率 x は、船 1 の方では前節の結果を用いて

$$0.015 \times 5 [L_2/L_1]^{1.6} (L_1/100)^{2.7} + (L_1/L_2)^{1.6} (L_2/100)^{2.7} \text{ 億円} = 36 L_1^{1.1} L_2^{1.1} (L_1^{0.5} + L_2^{0.5}) \text{ 円}$$

とあらわせる。

もう少し一般的に書くとすれば、船の価格と積荷の価格、それに推定される汚染処理費用の分もいれて $G(L)$ とあらわし、平均船体損害率を $x_{(y)}$ をとすると、上式は

$$G(L_1)x_{(L_2/L_1)} + G(L_2)x_{(L_1/L_2)}$$

となる。

(4) 以上の(1), (2), (3)をあわせて、ある水域、ある期間の衝突による損害額は、 $\phi(L, \vec{V})$ を水域のある部分 dS 、時間 t における長さ L 、速度 $\vec{V}$ の分布関数として

$$\iiint \int_{S} \int_{t} \int_{L_1} \int_{L_2} \int_{\vec{V}_1} \int_{\vec{V}_2} P_{(x)} (\rho^2/2) \phi(L_1, \vec{V}_1) \phi(L_2, \vec{V}_2) |\vec{V}_1 - \vec{V}_2| [(L_1 + L_2)/2] \times [G(L_1)x_{(L_2/L_1)} + G(L_2)x_{(L_1/L_2)}] dL_1 dL_2 d\vec{V}_1 d\vec{V}_2 dS dt$$

このようにして求めた x と y の関係を図 5 に示す。なおこの積分式に図 4 で求めた a 、 b 及び x_0 の値をいれた計算値のほかに、直接データからも求めることができるのでこれを図 5 にあわせて示した。計算値と調査値はいうまでもなくかなりよくあう。

平均損害率 x は総トン比 y の単調増加関数で y が 10 より小さいとき $0.015 y^{0.6}$ で近似できる。 y が 100 あたりになるとこの近似値よりある程度が小さくなる。

なお、図 5 に港内と港外の値を推定して示す。

この結果を用いて、ある水域である期間に起る衝突によってこうむる損害額を推定することができる。この計算の手順を次に示す。

(1) 軽微な損傷まで含めた衝突の件数については今までの研究により $P \times (\rho/2) \times [(L_1 + L_2)/2] \times |\vec{V}_1 - \vec{V}_2|$

の積分として求められる。ここに ρ 、 L_1 と L_2 、及び $\vec{V}_1$ と $\vec{V}_2$ は船の密度、二船の長さ及び二船の速度ベクトル ($\vec{V}_1 - \vec{V}_2$ は相対速度でその絶対値は相対速力) であり、 P は操船の誤りの確率で 1 万分の 1 程度、昼間はその 1/2 程度、夜間は 2 倍程度とする。また P は

として推定することができる。 $x_{(y)}$ は $x f_{(y,y)}$ を x について積分したものであり、 $f_{(x,y)}$ ははじめにものべたように両船の速力、行会の角度、衝突部位などの関数であり、今後の統計的研究と、もう一方の物理的研究を必要とする。特に核物理学の衝突微分断面積や共鳴などを用いる手法が応用できるのではないかと考えられる。ここでは、速力に関する補正として x の値を港内と港外にわけたものを採用することにとどめる。

上記の積分式はかなり複雑であるが、衝突件数を簡易に推定するために「衝突危険度推定係数」⁽⁴⁾を用いたように、この式を簡略にして「衝突損害額推定係数」を各水域ごとに求めることができる。

また、上記積分式を用いて通航分離・船の大型化・船の大きさ別航路分離などの損害額に及ぼす影響を見積ることができる。

6. 結 び

海上交通事故、特に船と船との衝突に重点をおいて解析した。従来、海難をあらわす尺度として運航阻害の度合が用いられているが、本解析では船体損害率で損害の程度をあらわすこととし、衝突や乗揚について船体損害率がある値以上となる確率を求めた。

ついで船と船との衝突について、港内・港外別、行会条件別、及び総トン比別の船体損害率相対頻度累積関数を求め、総トン数比がこの内最も大きい影響を与える要素であることを確めた。そして調査値から平均損害率 $x_{(y)}$ をあらわす「経験式」ともいえるべき近似関数を得て、これと今までの研究で導いてあった衝突件数を推定する式と結びつけ、ある水域の一定期間における衝突による損害額を推定する式を示した。この式は、今後広い意味での海上交通管制的費用便益効果の解析に応用できるとともに、運航分離、船の大きさ別航路分離等の海上交通安全諸施策の効果をあらかじめ推定する場合にも適用できるであろう。

この研究にあたり御協力をいただいた海上保安庁航行安全指導課、日本海難防止協会、運輸経済研究センターの各位に厚く感謝します。

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. 63~73 (1968)
- (2) 藤井弥平, 船の衝突直径と衝突発生率, 日本航海学会誌, Vol. 42, p. 1~7 (1969)
- (3) 水城・山内・藤井, 海上交通事故の調査, 日本航海学会誌, Vol. 46, p. 171~180 (1970)
- (4) 藤井・山内・水城, 交通事故当量と衝突危険度, 日本航海学会誌 Vol. 46, p. 181~189 (1971)
- (5) 藤井・山内・水城, 海上交通事故の研究—Ⅲ—乗揚について, 日本航海学会論文集, Vol. 50, p. 15~20 (1973)
- (6) 同, 海上交通事故の研究—Ⅳ—, 明るさ及び視程の事故率に及ぼす影響, 日本航海学会論文集, Vol. 50, p. 21~28 (1973)
- (7) 神鳥 昭, 海上交通事故, 航海, Vol. 46, p. 39~59 (1975)
- (8) V. U. Minorsky, An Analysis of Ship Collisions with Reference to Protection of Nuclear Power Plants, J. Ship Research, p.1~4 (1959)
- (9) J. P. Comstock et al., Survival of Collision Damage vs. the 1960 Convention on Safety of Life at Sea, Trans. SNAME, Vol. 69, p.461~495 (1961)
- (10) D. M. Bovet, Preliminary Analysis of Tanker Collisions and Groundings, U. S. Coast Guard Jan. 1973
- (11) 藤井弥平, 海上交通管制の研究—1—海上交通事故と交通管制—, 日本航海学会論文集, Vol. 52, p. 149~159 (1974)

質 疑 応 答

原 潔 図2において、港内と港外で船体損害率に差があるのは速力のちがいによるということですが、図3には総トン比だけで船体損害率を説明されているのはなぜですか？

藤井弥平 損害率の相対累積頻度関数 F は損害率 x 、総トン比 y 、速力 V 、行会角 θ などいくつかの変数の関数で、図2にはそのうち行会角と、速力に関して港内港外の2レベルで示しました。図3はいくつもの総トン

比についてあらわしていますのでこみすぎて港内港外にはわけませんでしたが、表6と図5には分けて示しておきました。

鞠谷宏士 聞きもらしたかも知れませんが、図2，図3は衝突のみで図1は乗揚を含んでいるのですね？

藤井弥平 そうです。乗揚についても一応解析はしてみましたが、あまりすっきりした結果がえられていませんので衝突の解析に重点をおいて発表しました。

原 潔 反航，同航などの具体的な意味はどのようなものですか？

藤井弥平 仕向港と出発地からその水域での針路を推定してきめました。したがって衝突直前の両船針路のなす角とはちがうこともおこります。なお，反航のときの損害が大きいはずと考えられますが，大型船が小型船を追越すときに衝突して小型船を転覆させると損害率が高くなり，またこういう例の数も少なくないためもあって予想されるほど同航反航の損害率の差が大きくはないでしょう。