避航操船における視認方法の信頼性について

翁 長 一 彦*

Reliability of Watch Systems in Collision Avoidance

Kazuhiko OHNAGA

Abstract

The author assumed that collision of ships shall be caused by failure of watch system which is composed between the time of discovering a ship and the time of collision. Therefore, the interval of the time is a life of the system.

Data of the times were collected, and the reliabilities of watch systems were analyzed by Weibull distribution. Watch systems were classified into watching vessels in day time, watching lights in night, and watching by radar.

The conclusions are as follows.

- 1) The assumption that collision of ships is caused by failure of watch system is acceptable.
- 2) Motarity of watching vessels system in day time is caused by fatigue failure until the time of 5 minutes, motarity after the time of 5 minutes is caused by random failure.
- 3) Motarity of watching lights system in night is complexed of fatigue failure and random failure.
- 4) The watching system with human's eye and radar image may has the superior reliability.

1. ま え が き

操船者が相手船を認めて避航の判断を行う場合、頼りとなる情報は相手船の針路、速度、相手船との距離等であり、これに自船の航行状態や航法上の制約条件等を加えて総合的な判断がなされる。しかし、相手船の情報はすべて視認作業によって得られるから、かなり不確実なものであり、天候の条件や航路の条件等によっても左右される。

このような避航操船の信頼性については幾つかの研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が行われており、また視認作業や船灯の判別に関しても多くの研究^{(5),(6)}があるが、視認対象物の性質を視認方法に関連づけて統計的に取扱ったものは少い。一方、船舶設備の要件として、船灯の光到達距離や配光性能等については厳密な基準が要求されているが、これらの性能が避航操船時の情報にとってどの位寄与しているか検討された例も少い。

本研究は、避航操船時において相手船を視認する方法によってその信頼性が異なるのではないかと、いう予想のもとに、視認システムの信頼性について検討を行ったものである。

すなわち、相手船を初認した時点から相手船が与える情報と、それを受け取って判断する操船者とのマン・マシン系が形成される。これを視認システムとすれば、視認方法別にシステムの性質が異なり、衝突の発生状態が異なると考えられる。昼間に肉眼で相手船を視認したとすれば、相手船の視認対象物は船影を始めとして船首尾の波、掲しょう信号等であろう。夜間であればマスト灯、舷灯を始めとする船灯が視認対象物の主なものとなり、船影等からの情報は殆んど得られなくなる。一方、レーダーの映像により視認した場合には、相手船の船型、船種等の情報は殆んど得られないかわりに、方位や距離はかなり精確に把握できる。これ以外にも音響信号等に

* 正会員 船舶技術研究所 (三鷹市新川 6-38-1)

より、相手船の意図が判断できるが、一方では他船の動きや陸岸、航路標識等の制約があり、さらに視程、気象条件、他の灯火等が外乱として存在し、これらが視認システムの信頼性に影響を与える。

したがって、これらの影響によって視認システムが故障した結果、衝突が発生するという仮定がなりたつ。この仮定にたてば、相手船を初認した時点から衝突に至るまでの時間（衝突時間、または視認時間とよぶ）は視認システムの寿命であり、この時間を検討することにより視認システムの信頼性や故障（衝突）の発生原因を推定することが出来る。筆者はかつて船舶火災事故について、火災に関係する燃焼系が故障によって鎮火する、という考えから火災の寿命について検討を行ったが⁽⁷⁾、衝突についても同様な考え方で検討を行ったのでその結果について報告する。

2. 視認方法による分類

昭和 49 年から 51 年に至る間の海難審判庁裁決録より、各衝突事故における視認方法、初認時刻及びその距離、衝突時刻等の資料を集めた。この 3 年間の裁決録に記載されている衝突事故は合計 202 件であり、これより

表 1 視認方法別の衝突件数

Watching System	Total	$t < 1 \text{ min}$	$t \geq 1 \text{ min}$
Vessels	87 (0.233)	24 (0.064)	63 (0.168)
Lights	129 (0.345)	5 (0.013)	124 (0.332)
By Radar	158 (0.422)	0 (0)	158 (0.428)
Total	374 (1.000)	29 (0.078)	345 (0.922)

収集した資料は 374 点である。1 件の事故から両船の 2 データが得られるが、うち 30 点は視認方法か時刻が不明なものである。この 374 データを初認方法で分類して表 1 に示す。

レーダーの映像で初認したものは、いずれ肉眼による視認方法に移行するが、肉眼による初認時刻は不明なものが多く、したがってある視認システムから他の視認システムへと

移行する場合については今回は特に検討を加えていない。船影視認と船灯視認の比率は約 4:6 であり、一般に報告⁽⁸⁾されている昼間、夜間の衝突発生比率に近い。しかし船影視認の場合の約 28% は衝突時間 t が 1 min. 未満であり、これは船灯視認の場合の 4% 弱、レーダーの場合のゼロに較べて著しく高い。このように衝突時間が 1 min. 未満の場合（裁決録で衝突直前に視認、または初認直後に衝突、というように表現されている）は、視認システムという仮定が成立しないと考えられるが、船影を視認できる昼間にこの率が高いことは、システムとして問題があるように思われる。

図 1 は衝突時間と初認時刻における両船の相対距離を示すが、 $t < 1 \text{ min.}$ のものは除外してある。船影視認の場合は衝突時間、相対距離ともに低い処に分布し、船灯視認、レーダー視認の順に高い範囲に分布する。この結果から判断する限り、船灯の光到達距離が問題になるとは思われない。

この分布の上限値は視認方法に拘わらずほぼ一定であり、約 14.5 m/sec の相対速度となる。すなわちこの相対速度は初認してから最短時間で衝突する場合であって、両船の速度が等しいとすれば、それぞれの船速は 14.1 kt に相当する。一方、普通に避航した場合も初認時の相対距離と交叉終了時迄の時間は同じ関係にあると考えられるから、 $1/14.5 \text{ sec/m}$ という値は単位相対距離当りの避航所要時間の最小限界値を示すと考えられる。

さらに、自船の大きさ、または相手船の大きさと衝突時間との関係を種々検討してみたが、全くランダムであって規則性が認められなかった。すなわち視認システムの故障に対しては船の大きさは影響しないと考えられる。

図 1 衝突時間と相対距離

3. 視認システムの信頼性

視認システムの信頼性を検討する手段として、衝突時間に対する衝突確率密度についてワイブル分布との適合性を検討する。ワイブル分布を用いた理由は、shape parameter m の値によって故障の性質が判別しやすく、異なる性質の3パラメーターによってどんな形の故障発生確率に対しても同一数式でよく適合する、といわれているためである。

故障確率密度関数を $f(t)$ 、信頼度関数(残存確率)を $R(t)$ 、故障率関数を $\lambda(t)$ とすると、ワイブル分布は次式で与えられる。

$$f(t) = \frac{m}{\alpha} (t-\gamma)^{m-1} \exp \left\{ -\frac{(t-\gamma)^m}{\alpha} \right\} \quad (1)$$

$$R(t) = \exp \left\{ -\frac{(t-\gamma)^m}{\alpha} \right\} \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{m}{\alpha} (t-\gamma)^{m-1} \quad (3)$$

ここで α は scale parameter, γ は location parameter, m は shape parameter であり, m の値で分布形が変化し, $m=1$ では指数分布と一致し, $m>1$ では正規分布に近づく。このため m の値に応じて次のように対応づけができる。

- $m>1$ 摩耗故障
- $m<1$ 初期 "
- $m=1$ 偶発 "

$m<1$ の場合に $t-\gamma$ が低い範囲を初期故障期と言うが, $m \approx 1$ のときある程度以上 t が大きくなれば $\lambda(t)$ はほぼ一定になるため偶発的な故障に近づく。偶発故障とは、故障が一回生じても次にいつ生じるかは全くランダムで予測できないような場合をいう。

そこで横軸に $\ln t$ 、縦軸に衝突の累積確率を $\ln \ln$ で目盛ったワイブル確率紙上に $t \geq 1$ min. のデータをプロットしたものを図 2~4 に示す。船影を視認した場合の衝突(故障)確率密度は2つのワイブル分布の複合形であり、かつ $t < 5$ min. の場合には直線とはならず, location parameter $\gamma \neq 0$ であることを示している。またレーダー映像による場合も $\gamma \neq 0$ である。図中に丸印で示したものは生デ

図 2 船影視認のワイブル・プロット

図 3 船灯視認のワイブル・プロット

図 4 レーダー初認のワイブル・プロット

表 2 ワイブル・パラメーター, 平均衝突時間など

Watching System	m	α	γ	μ	σ
Vessels $t < 5$	1.53	10.3	0.5	4.2	2.8
" $t > 5$	0.75	3.5	0	—	—
Lights	1.18	1.11	0	7.3	6.2
By Radar	1.55	76.7	1.5	14.5	9.7

メーター α, γ, m の値と平均衝突時間 μ (MTBF), 及び分散の平方根 σ を表 2 に示す。なおワイブル分布の μ, σ は次式で与えられる。ここで Γ はガンマ関数を表わす。

$$\mu = \alpha^{1/m} \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \quad (4)$$

$$\sigma = \alpha^{1/m} \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

4. 信頼度関数

上記のパラメーターを用いて (1) 式により故障確率密度関数 $f(t)$ を求めて図 5 に示す。図中にヒストグラムで示したものは資料による値であるが、計算値とは比較的良好一致を示す。

船影を視認した場合は、 $t < 5$ min. では $m > 1$ のため正規分布型に近く、 $t > 5$ min. では $m < 1$ のため偶発故障型となり、不連続の複合型ワイブル分布となる。すなわち、衝突時間が 5 min. 以内では視認システムが摩耗故障したために生じた障突であり、これはこの時間内では相手船の運動に関する情報が不充分であり判断を誤ったり、判断が遅れたりすることにより衝突が発生する、と考えられる。一方、5 min. 以上の余ゆうがある場合は偶発故障による衝突であり、これは不測の状況変化によるものと考えられる。裁決録の記述から判断すると、これは相手船の意図が不明なため、予想に反して相手船が変針する（または予想に反していつまでも変針しない）ような場合が多い。

船灯視認の場合は単一ワイブル分布であり、 $m \approx 1$ のため初期故障型に近いと共にかなり偶発性の強い故障型となり、 $t \approx 2.5$ min. で発生確率が最大となる。この場合の視認システムの故障は、情報不充分によるものと意図不明によるものだが、分離されずに重なり合ったまますべての衝突の原因となるように思われる。なお、データ数が少ない場合には船影視認の場合と同様な複合型ワイブル分布になる傾向が生じることが判ったが、このことからこの推測が成立つ。船体視認の場合は $\gamma = 0.5$ min. となり、一応 30 sec 以下の寿命の視認システムはあり得ないが、船灯視認システムにおいてはシステムの成立と同時に故障することがあり得る。

レーダーによる視認システムにおいては、まずその寿命が大変長く、MTBF で比較すれば肉眼による視認システムの 2 倍以上になる。また、レーダーで初認されたものはやがて肉眼による視認システムに移行するので、これが単一のワイブル分布になることから、一般の避航時の視認システムもワイブル分布になると考えられる。そしてレーダーの場合の shape parameter m と肉眼による船影視認 ($t < 5$ min. の場合) のそれとがほぼ等しいこともこの根拠になると思われる。したがって衝突しなかった普通の避航操船の場合も含めて故障（衝突）した確率を検討すれば、真の衝突確率が求められるのではないかと思われる。

ータ、×印と実線で示したものが $\gamma > 0$ として修正した値である。図 2~4 の結果より、衝突確率は衝突時間に対してワイブル分布をなし、それぞれの視認方法によって各パラメーターが異なることが認められる。

すなわち、衝突時間が視認システムの寿命であり、視認システムが故障したために衝突がおこる、とする仮定に一応の根拠が与えられる。パラ

図 5 故障確率密度分布

図 6 信頼度関数

図 7 故障率関数

各視認システムの信頼度関数 $R(t)$ を図 6 に示した。×印と点線で示したものはデータ値であり、実線がワイブル分布とした計算値である。信頼度関数はパラメーターの如何に拘わらず時間と共に減少するが、船影視認と船灯視認とを比較すると、2.3 min. 頃までは前者の $R(t)$ が高く、以後 13 min. 頃までは後者の $R(t)$ が高く、その後は再び僅か乍ら船影視認の方が高くなる。レーダー映像の場合の信頼度は最も高い。但し信頼度関数は残存確率であるから、避航したものも含めた場合の $R(t)$ は大きな意味を持つが本資料のような場合にはたいした意味はないと考えられる。

同様にして故障率関数 $\lambda(t)$ を図 7 に示す。故障率はすなわち衝突率であり、ある視認時間 t において衝突していないものの中で次の単位時間内に衝突を惹起する確率である。従って各視認方法の優劣を比較する最もよい指標である。

船影視認の場合は m が途中で変化するため $\lambda(t)$ も不連続に変化し、 $t \approx 5$ min. の処で最も故障率が高く、以後は急激に低下する。船灯視認の場合は短時間の視認でも故障率が高く、視認時間が大きくなるにつれて徐々に増加する。レーダー映像による視認の場合は、やはり視認時間と共に故障率は増大するがその値は最も低い。また肉眼では見えないような遠くの相手船に対して、避航のための視認システムを考えることはあまり意味がないから、 t が大きな処の $\lambda(t)$ の値は現実的にも無意味である。いずれの場合もデータのバラツキのため、計算値との適合性はあまりよくない。

5. 視認システムの特徴

肉眼による視認システムを比較すれば、船影視認と船灯視認の大きな相違はシステムの故障型式である。船影視認システムでは、避航の余ゆりの無い摩耗故障型と、不意の状況変化によると思われる偶発故障型とが、約 5 min. の衝突時間を境として明確に区別されるが、船灯視認の場合には両故障が混在して発生していると考えられる。つまり昼間であれば視認時間 5 min. 程度の処が最も衝突率が高く、それ以上の視認時間があれば相手船の運動に関する情報が充分に得られて正しい避航の判断が行える。しかし、夜間船灯視認の場合は長時間視認できていてもなお衝突率は高まるため、最後まで相手船の運動や意図に関する情報は充分とはいえない。

図1に示すように、船影の視認寿命や初認距離は船灯視認の場合よりもかなり狭い範囲に分布するから、これ以上の範囲では船影を視認できないのではないかという疑問も生じる。しかし、ワイブル分布による検討の結果から、これ以上の範囲のものは容易に避航出来て、衝突に至るものは不測の状況変化による偶発的な発生だけであるといえる。一方、船灯視認の場合はすべての衝突事例が同一の確率関数で分布し、船影視認と同等以上の範囲で視認できるにも拘わらず、避航のために十分な情報は得られ難いといえる。

図8 相対距離と自船の長さ（船影視認）

図9 相対距離と自船の長さ（船灯視認）

図10 相対距離と自船の長さ（レーダー初認）

レーダーによる視認システムは信頼度が高く、故障率は低く、平均寿命 μ も長く、最も優れているように見える。しかし、これは逆に言えば長い時間視認していても衝突することを示しており、映像による相手船の情報はそれだけ不充分であるとも言える。またこの場合は、やがて必ず肉眼による視認システムに移行してゆく筈であるが、これらに関する資料が裁決録からは得られ難いため、これ以上の解析が行えないのが残念である。むしろレーダーの視認システムの利点は location parameter γ が 1.5 min. であり、且つ視認システムの仮定が必ず成立つ ($t < 1$ min. のものがない) ことである。すなわち、少なくとも 1.5 min. 以上の余ゆうを持って相手船を発見しうることであって、この関係は一般に避航できた場合も同様と考えられるから、おそらく肉眼だけによる視認の場合よりも衝突確率は低いと推定される。

6. 船舶の大きさと相対距離

衝突時間と船舶の大きさとは相関が見出せず、したがって視認システムと船舶の大きさは無関係であると述べたが、一般に避航操船を考えた場合には何らかの関係があると想像される。

そこで初認時の相対距離と船舶の大きさとの関係について若干の検討を行ってみた。裁決録には総トン数しか記載されていないため、便宜的に

$$L_{pp} = 6.4 \text{ G.T.}^{1/3}$$

として、図1に示した相対距離 d と自船の L_{pp} との関係を求めると図8~10のようになり、 d/L_{pp} が低い処に大型船の衝突が発生する傾向が見られる。図中の点線はほぼ平均値を結んだもので、視認方法によって多少傾向が異なるとはいえ、これらの図からあまり結論めいたものは導き出せないようである。なお、相対距離の確率密度関数は対数正規分布に近いが適合性はあまりよくなかった。初認時の相対距離は視認システムとはやや異質の問題であり、これについては別の機会に検討

を行いたい。

7. ま と め

船舶の衝突事故において、相手船の運動を判断する視認システムが故障した結果衝突が生じる、との仮定の下に、初認から衝突に至る迄の時間をシステムの寿命と考えると、視認方法別にシステムの信頼性を検討した。その結果、上記の仮定がほぼ成立つことが認められ、各視認方法の故障原因とその対策に対する示唆が得られた。主な結論は次のとおりである。

1. 屋間に相手船の船影を視認した場合には、5分以上の視認時間が維持できれば避航する余裕は充分得られ、摩耗故障型衝突は避けられる。
2. 上記の場合に5分間以上の視認時間が得られた場合には、相手船の運動に関する情報はほぼ精確に把握できるが、相手船の意図までは判断できない。したがって航路の端部、合流分岐部、見通しの悪い個所等の不意の状況変化がおりうる所では、偶発故障型衝突を避けるために十分な注意が必要である。
3. 夜間において、船灯の光到達距離は昼間の船影視認の場合に較べて決して劣ってはいないが、運動に関する情報を相手船に伝える度合はかなり劣っている。したがって昼間に較べてより長い時間をかけて視認作業を行う必要がある。
4. レーダー映像による視認システムは長時間の視認作業が確保されるため、相手船の情報がよく把握でき、さらに肉眼による視認システムが併用されて二重システムとなるため極めて有効である。あえて衝突防止用レーダーに頼らなくても、現存のレーダーをより活用して視程良好の場合にも大いに利用することによって衝突事故を減少させることが出来よう。

なお、船影視認の場合に衝突時間が1分未満の場合が約30%もあることは不思議に思われる。これとレーダー初認の場合には少なくとも1.5分以上の視認時間が得られていることを併せて考えると、このような場合は避航の操船作業（視認作業も含めて）が手一杯のため衝突船にまで眼を配るひまが無かった場合と思われる。つまり避航システムにおいて相手船の待ち時間が極めて大きくなった場合⁽⁹⁾か、自船の視認作業のサービス間隔が長くなり過ぎた場合であろう。

今後このような手法を用いて研究を進める場合の問題点としては、精確な資料の収集、視認システムの明確な定義、避航した場合をも含めて検討すること、レーダー視認と肉眼視認との関連、等であろう。裁決録からは数値的データだけを採取するように努めたが、初認時刻と衝突時刻等には当事者の記憶に頼ったと思われるものがあり、ラウンド数の衝突時間の発生確率が高くなる傾向が見られる。また、避航できた場合も含めて故障（衝突）の確率を論ずることや、レーダーと肉眼とのそれぞれの視認の方法がどのようにからみ合っているか等については、裁決録以外の資料を用いて検討する必要があると考えられる。

本研究を行うに当たって、神戸商船大学本田啓之輔教授、東海大学平本文男教授、大阪大学中村彰一教授、横浜国立大学中村貴憲教授、東京大学小山健夫教授らから熱心な御討論をいただいた事に深く感謝するとともに、資料の収集整理を担当した桐谷伸夫運輸技官の努力に対して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 原 潔: 避航操船の信頼性工学的考察, 関西造船協会, 昭和52年度秋季連合大会
- (2) 長畑 司: 船舶の航路横断における待合せ問題について, 日本航海学会論文集, No. 55, 1976.8
- (3) 藤井弥平 他: 海上交通事故の研究—VI, 日本航海学会論文集, No. 60, 1979.1
- (4) 平野新太郎: 避航動作を考慮した場合の航路交差部の交通容量についての一考察, 日本航海学会論文集, No. 60, 1979.1
- (5) 若生知己 他: 航行安全上からみた航海者のための視覚伝達に関する研究—III, 日本航海学会論文集, No. 52, 1974.12
- (6) 橋本 進 他: 航海士の視力と諸作業について, 日本航海学会誌, No. 56, 1976.12
- (7) 翁長一彦: 船舶火災事故に対する信頼性解析, 日本造船学会誌, 第582号, 昭和52年12月
- (8) 例えば, 神島 昭: 海上交通事故, 航海46号, 1975.6

(9) 原 潔: 避航システムモデルによる衝突確率の考察, 日本航海学会論文集, 第 50 号, 1973.12

質 疑 応 答

中島 保司

1. 「視認」とはどのように定義しておられるか。(海難審判による)
2. 検討する場合, 見え具合が避航操船処置を左右するものと思われるが, 気象要素(視程等)を考慮する必要はないか。
3. 「故障率」を説明して下さい。

翁長 一彦

1. 裁決録の記載は「Aは〇時〇分B丸の船影(又は〇灯, 映像)を認め……」とあるので, この時刻を初認時刻とし, 衝突時刻までの間視認システムが形成されるとしました。したがって視認とは実際に連続して見ていることを意味しません。
2. 御指摘のとおりであって, 気象要素が見え具合に影響しそれが操船処置を左右すると考えます。つまり単に見える, 見えないの問題ではなく, 見えていても正しい避航処置の判断が出来るだけの情報が得られなければ意味がないと思います。それが出来ない場合は視認システムとして故障と考え, 気象要素をマクロ的に故障の原因に含めた考え方をとりました。
3. 故障率 $\lambda(t)$ は, システムが時刻 t まで実働した後, 次の単位時間内に故障する確率であって,

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{\int_t^{t+\Delta t} f(t) dt}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$$

で表わされる。したがって $\lambda(t) = f(t)/R(t)$ の関係があります。