船舶における等衝突危険度圏に関する研究

今 津 隼 馬*

A Contour of Collision Risk by Altering Course and a Collision Avoidance

Hayama IMAZU

Abstract

In a collision avoidance for ship, it is necessary to know a maximum collision risk by one target, because we can not know a target's intention in advance.

This potential collision risk by altering course can be shown by a width of a sum of collision course which include own ship's present course (Sum of collision risk on head), on the assumption that a target approach in colliding zone.

Here, a contour of collision risk by altering course was defined by a locus of target's relative position which had a same value of a sum of collision risk on head.

The problem of collision avoidance between two ships were solved by using this contour of collision risk by altering course and obtained some useful results for collision avoidance.

This method is especially suitable for establishment of a standard of judgement for collision avoidance.

はじめに

本研究は、以前報告した衝突危険度^{[1][2]}を使い、船舶における衝突避航問題のうち比較的簡単と言われている2船間の衝突避航問題を運動学的に捕え、その一般解につき考察したものである。今回は衝突危険度のうち変針による衝突危険度のみについて考えた。この変針による衝突危険度の一般的性質を捕えるために、自船速力と他船速力を主たる因数とする船首衝突危険度等価曲線や船首衝突危険度の合成値による等衝突危険度圏と呼ぶものを新しく定義した。これらは、自船の周囲に一定速力の他船が存在する時、変針による衝突危険度の最大値の分布がどのようなになっているかを表わすものである。この等衝突危険度圏を使っていくつかの2船の出合いについて解析した結果、低速船による避航の困難性、船首方向と同じ程度の範囲での横方向の見張の必要性ならびに、等衝突危険度圏が避航動作決定のための重要な判定規準となる事等が判明した。

1. 2船間の衝突避航と衝突危険度

船舶による衝突回避の動作としては、変針、変速ならびにその併用がある。今回はこのうち変針動作のみについて考察した。変針による衝突危険度 (Collision Risk by Altering Course) とは、あるベクトル一定な他船と衝突するための自船の針路(衝突針路; Collision Course)で表わされるものである^{[1][2]}。これは図1において、自船から距離D以内に他船を入れると衝突の恐れがあるとした時、相対針路が図の衝突区域 (Colliding Zone) 内となる自船の針路の方向と幅で示される。この衝突針路は次の要素から成る関数である。

- i) 自船の速力および針路
- ii) 他船の速力および針路
- iii) 他船の相対位置

図1 衝突区域

* 正会員 東京商船大学 (江東区越中島2-1-6)

iv) 必要最小限な距離的余裕

v) 情報の精度

vi) 自船の運動性能

今回はこのうち i) ~ iv) までを考えた。v) vi) については文献 [3] [4] を参照されたい。衝突針路の求め方としては図2のような作図による方法と、計算による方法がある。衝突針路の境界値 (C_b) は次式により求めることができる。

図2 衝突区域と衝突針路

$$M_K = \pm \sqrt{R_K^2 - D^2} / D$$

$$\phi = \tan^{-1}(-M_K)$$

$$\lambda = A_K - C$$

$$\gamma = A_K - C_T$$

$$N = U_T / U$$

$$C_b = \lambda - \phi \pm \cos^{-1} \left\{ \frac{N (\cos \gamma - M_K \sin \gamma)}{\sqrt{M_K^2 + 1}} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで R_K , A_K は時間 K における他船までの距離と方位であり, U , C および U_T , C_T は自船ならびに他船の速力, 針路である。このように変針による衝突危険度は数多くの要素を含んでおり, その一般的性質を知る為には, いくつかの条件が必要である。

今ここで考えているのは2船間の衝突避航問題である。2船間において衝突回避が必要となるのは, 変針による衝突危険度が, 自船の現針路(C)上にある時である。ここで変針による衝突危険度のうち, 自船の現針路を含むものを船首衝突危険度 (Collision Risk on Head) と呼ぶことにする。また一般的に自船は他船の意思を前もって知ることができない。このため常に衝突危険度の最大値について考える必要がある。すなわち他船は自船にとって最悪となるよう行動するものとする。以上2船間の衝突避航問題において, 衝突危険度の捕え方の条件をまとめると次の2点となる。

(1) 他船は自船に衝突するよう接近する。

(2) 変針による衝突危険度のうち船首衝突危険度により2船間の衝突危険度は表わされる。

さてこのような条件の基に衝突針路の要素 i) ~ iii) を考えると, 自船と他船の速力比一定な場合, 自船の針路, 他船の針路ならびに相対位置は, ある関係で結ばれる。このため, どの要素を残すかは, 運航者にとって判りやすいと言う立場から, 他船の相対位置を残すこととした。また要素 iv) については一定とした。

2. 船首衝突危険度等価曲線

前記条件(1)の特殊な場合として、速力比 ($N=U_T/U$) が一定な他船が、自船の中心に接近する場合を考える。

図3は $N=14/12$ の時、等距離に他船を分布させ、他船が自船の中心に接近とした時の衝突針路を求めたも

図3 等距離における衝突針路 ($DCPA=0$)

のである。図から明かなように自船が他船より遅い時 ($N>1$)、衝突針路は必ず1~2ヶ所存在し、他船が自船の中心に接近する条件の基では必ず船首衝突危険度が存在する。またこの船首衝突危険度は各ベクトルならびに相対位置により変化し、図の③⑦において最大となっている。これは衝突区域境界線の一方が、自船速力円の接線となるためである。船首衝突危険度は自船の現針路を含むが、その範囲は自船の現針路を必ずしも中心としたものではない。しかしながら衝突危険度の大小を船首衝突危険度の大小で示すことは、2船間の衝突避航問題を一般的に捕える上で不都合ではないと考える。そこで次に船首衝突危険度の等価値(船首衝突危険度の幅が一定)がどのような分布になるか求めた(以後船首衝突危険度等価曲線と呼ぶ)。図4はその一例である。ここで $N=14/12$ であり $D=0.2n.m$ である。図中の曲線は他船が自船の中心に接近する時の船首衝突危険度の幅が等しい他船の相対位置をプロットしたものであり、図中の度数はその時の船首衝突危険度の幅を示している。これより高速船が低速船の中心に向かって接近する場合の船首衝突危険度について次の事が判った。

- (1) 高速船が船首方向から接近する場合、船首衝突危険度は距離に反比例する。

図4 船首衝突危険度等価曲線 ($DCPA=0$, $N=14/12$, $D=0.2n.m$)

- (2) 正横より前方あるいは後方から高速船が接近する場合、船首衝突危険度は最大となる。
- (3) 正横から接近する場合、船首衝突危険度の距離による変化はゆるやかであるが、船首方向に比べ衝突危険度は大きい。
- (4) 船尾方向から接近する場合、船首衝突危険度は最も小さい。

速力比が同一の場合、船首衝突危険度等価曲線は同じであるが、衝突針路の要素 v) vi) を考慮すると、時間が関係してくるため、必ずしも同じにはならない。これは今後の問題とする。次に 1 の条件(1)をより一般的とするには、他船が図 1 の衝突区域内を相対針路として接近する場合を考える必要がある。ここでは他船の針路がある幅を持つことになる。

3. 等衝突危険度圏と避航法

3. 1 衝突針路の合成

自船が一定針路速力で航走中、他船が距離 D 以内に接近する場合、衝突の恐れが存在する。このため他船の接近としては、衝突区域内の接近全てについて考える必要がある。また高速船が接近して来て、衝突針路が 2 ケ所存在する場合、船首衝突危険度のみの評価では不十分な場合もある。そこでここでは衝突の恐れのある他船の接近全てについて考慮し、かつ衝突危険範囲を十分に表わすものとして、衝突針路の合成値を考え、これを評価値とした。図 5 は衝突針路の合成値の求め方を図示したものである。図の左側は自船と他船の相対関係を示

図5 合成衝突針路 ($N=14/12$)

すものであり、他船はA、BおよびC点に在る。今各点から自船を見て右側の衝突区域境界線を右側相対針路 (Right-Hand Relative Course), 左側の衝突区域境界線を左側相対針路 (Left-Hand Relative Course) と名づける。ここで $N=14/12$, $D=0.2n.m$ とすれば、右側相対針路上を他船が接近する時の、各点における衝突針路は左端の3個の図となる。また左側相対針路上を他船が接近する時の、各点における衝突針路は中の3個の図となる。相対針路がこの間を連続的に変化すると、これらから得られる衝突針路の合成値は右端の3個の図となる。これを合成衝突針路 (Sum of Collision Course) と呼ぶこととする。これは、速力一定な他船をある地点に見た時、その他船の行動を自船にとって最悪と考えた場合の衝突針路の全範囲を示すものである。すなわちある地点の他船による衝突の可能性を示す。2船間の衝突の可能性は、前記合成衝突針路のうち、自船の現針路

を含む部分で表わされる。この部分を合成船首衝突危険度 (Sum of Collision Risk on Head) と呼ぶ。

3. 2 等衝突危険度圏と避航法

2 船間の衝突の可能性は、変針動作のみを考えた場合、合成船首衝突危険度で示される。ここで速力一定な他船による合成船首衝突危険度の等価曲線 (合成船首衝突危険度の幅が一定) を変針回避による等衝突危険度圏 (Contour of Collision Risk by Altering Course) と名付けた (以後簡単に等衝突危険度圏と呼ぶ)。これは速力一定な他船による衝突の可能性を自船を中心とした平面空間に示すものであり、避航法の一般解を求める上で重要な基準となるものである。ここで各速力比毎の等衝突危険度圏を求め、等衝突危険度圏から見て避航はどうあるべきか考察を行なった。

3. 2. 1 低速船における等衝突危険度圏と避航法

図6 低速船における等衝突危険度圏
($N=14/12$, $D \leq 0.2n.m$)

図6は自船が他船より低速な場合の等衝突危険度圏の例である。ここでは $N=14/12$, $D=0.2n.m$ である。

図中の数値は合成船首衝突危険度の幅を示す。例えば $40^\circ-80^\circ$ の区間に速力比 $N=14/12$ なる他船が存在する場合、他船の行動によっては自船の現針路をはさんで 40° から 80° の範囲の針路上に衝突針路が存在する可能性を表わしている。この等衝突危険度圏は自船船首尾線に対して左右対称であり、自船の変針動作によっても変化しない。このため現時点の衝突の可能性はもちろん、避航後の衝突の可能性も同じく知ることができる。すなわち自船の変針動作はこの圏上の他船の相対位置を変化させる働きをする。このため例えば船首方向に見る他船を船首右 30° に見るよう変針すると、図の船首方向の衝突の可能性が、同距離で右 30° の可能性へと変化する事となる。図6の等衝突危険度圏から、低速船の衝突危険度について次の事が判明した。

- (1) 衝突の危険は自船の全方向に存在する。
- (2) 船首付近からの接近船による衝突危険度は距離に反比例して大きくなる。
- (3) 斜め前方又は斜め後方からの接近船による衝突危険度は、同距離の他の方向に比べ最大である。この最大値となる方位角 (A_{max}) は右舷前方の場合、次の範囲に存在する。

$$\alpha = \cos^{-1}(1/N)$$

$$\beta = \sin^{-1}(D/R_K)$$

$$A' = \sin^{-1}\{N \cos(\alpha + 2\beta)\} - \beta$$

$$A' \leq A_{max} < \pi/2 \dots\dots\dots (2)$$

- (4) 正横からの接近船による衝突危険度の距離による変化はゆるやかである。しかし前方からの接近船に比べ同距離における衝突危険度は大きい。
- (5) 後方からの接近船による衝突危険度は、他の方向に比べ最も小さい。

このことから低速船の避航には、針路速力保持も含めた高速船の協力動作が不可欠であることが判る。また低速船の運航について一般的に次のようなことが言える。

- (1) 警戒水域は十分広くとる必要がある。特に横方向からの接近船による船首衝突危険度は、同距離の他の方向からの接近船によるものより大きく、かつ距離変化に伴う船首衝突危険度の変動も一様ではない。このため十分な距離からの監視が必要である。
- (2) 低速船による避航の効果は、高速船の行動によって相殺される危険性をいつも伴っているので、避航動作は距離的・時間的に十分余裕を持ってとる必要がある。また行動後の監視も重要である。特に低速船が高速船を(2)式で与えられる範囲の方位角に見るよう避航した場合、高速船の行動によっては、避航前より危険度が増加することがあるので注意を要する。

- (3) 低速船にとって一番衝突危険度の小さい方向は船尾方向である。このため最悪時には高速船を船尾方向に見るよう避航するよう心がける必要がある。

3. 2. 2 同速船における等衝突危険度圏と避航法

図7は同速船の場合の等衝突危険度圏である。ここでは $D=0.2n.m$ であり、図中の数値等は図6と同様、合成船首衝突危険度の幅を示している。これより同速船の変針による衝突危険度について次の事が判った。

- (1) 衝突の危険は自船の正横から前方に存在する。
- (2) 上記範囲において衝突危険度は距離に反比例する。
- (3) 正横後における衝突危険度は最小である。

この結果同速船の運航について一般的に次の事が言える。

- (1) 警戒水域は正横より前方のみで良い。
- (2) 衝突針路の範囲はただ一ヶ所のみであり、船首衝突危険度も距離に反比例する簡単な関係であるため、避航は低速船に比べ容易である。
- (3) 他船を自船の正横後に見るよう変針すれば、他船のいかなる変針にも無関係に安全は確保される。

3. 2. 3 高速船における等衝突危険度圏と避航法

図8 高速船における等衝突危険度圏
($N=12/14$, $D \leq 0.2n.m$)

- (1) 警戒水域は自船の前方のみで良く、その範囲は自船が他船に比べ高速になればなる程狭くなる。また船首衝突危険度の幅が同じでも、低速船や同速船の時に比べ距離は最も短い。
- (2) 衝突針路の範囲はただ一ヶ所のみであり、船首衝突危険度も距離に反比例する簡単な関係であるため、避航は低速船に比べ非常に容易である。
- (3) 他船を式(3)の方位角の外側に見るよう変針すれば、他船のいかなる変針にも無関係に安全は確保される。

4. ま と め

以上2船間の衝突避航問題を、船首衝突危険度等価曲線ならびに等衝突危険度圏から捕え解析し、前記の種々の結果を得ることができた。これらをまとめると次のようになる。

図7 同速船における等衝突危険度圏
($N=1$, $D \leq 0.2n.m$)

図8は自船が他船より高速の場合の等衝突危険度圏の例である。ここでは $N=12/14$, $D=0.2n.m$ であり、図中の数値は合成船首衝突危険度の幅を示す。これより高速船の変針による衝突危険度につき次の事が判った。

- (1) 衝突の危険は自船の前方にのみ存在し、その方位角(A)の範囲は次式で与えられる。

$$\theta = \sin^{-1} N$$

$$-(\theta + \beta) \leq A \leq \theta + \beta \dots \dots \dots (3)$$

- (2) ある方位角から接近する低速船の針路には通常2通りの針路群がある。このため等衝突危険度圏は、ある方位線と2点で交わる。ここでは他船が自船にとって最悪となる側(実線部分)を採用する。
- (3) 上記範囲において衝突危険度は距離に反比例する。

この結果高速船の運航について一般的に次の事が言える。

- (1) 他船が自船の中心に接近すると言う特定の条件下で求めた船首衝突危険度等価曲線と、等衝突危険度圏の形はほぼ相似であり(図4, 6参照), 等衝突危険度圏の距離は, 船首衝突危険度等価曲線の倍である。
- (2) 低速船による避航が最も困難である。低速船の避航に効果を持たせるには高速船の協力動作が不可欠である。低速船が避航義務のある時には, 高速船は針路速力を保持するか, または低速船を見る舷の反対舷に変針するよう協力すべきである。
- (3) 同速船ならびに高速船の運航では, 他船のいかなる変針にも影響されない避航針路があるし, また船首衝突危険度も距離に反比例するから避航は低速船に比べ容易である。
- (4) 高速船における船首衝突危険度は, 低速船における場合より同距離において小さい。このため避航義務のある高速船は低速船に不安を与えないためにも早目に避航するよう心がけるべきである。
- (5) 高速船, 低速船が混在する現実の航海では, 低速船としての警戒水域を採用する必要がある。この為レーダ監視において極端なオフセンターは危険である。

今回の等衝突危険度圏の研究では, 衝突針路の6要素のうち i)~iv) までしか考えなかった。残る v)vi) の要素は時間に関係する要素であり, 現実の運航には不可欠のものである。また変速回避による等衝突危険度圏ならびに第3船の影響と等衝突危険度圏の関係についても研究する必要がある。これらの問題については今後さらに研究を進め報告する予定である。

最後に本研究の遂行にあたり, 御討論いただいた東京商船大学の杉崎昭生先生に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 今津隼馬: 衝突危険度の判定と避航処置, 避航操船シンポジウム, 日本航海学会, 昭和52年3月
- (2) Imazu, H.: Collision Avoidance and Risk in Radar Navigation, Studi in Onore di Giuseppe Simeon, Istituto Universitario Navale di Napoli, 1978
- (3) 今津・杉崎: レーダ避航法における情報の精度の改善と精度を考慮した衝突の危険度について, 日本航海学会論文集, 61号, 昭和54年9月
- (4) Imazu, H. and Sugisaki, A. M.: A Theoretical Analysis of Collision Risk for Vessel, ISSOA-79, 1979