

実際の避航の行動分析に基づく船舶間の衝突危険の定量的評価

正会員 三宅 里奈*

正会員 長谷川 和彦**

正会員 福戸 淳司*

Quantitative Assessment of Collision Risk Based on Actual Behaviour Analysis of Collision Avoidance Manoeuvre

by Rina MIYAKE, Member

Kazuhiko HASEGAWA, Member

Junji FUKUTO, Member

Summary

Preventing collision accidents is essential issue in safety navigation at sea. However, collision accidents still account for high proportion of all marine accidents. It is effective to alert risk of collision to operators. However, the timing of alert needs to match the operators' sense, otherwise they may feel it somewhat strange or doubtful.

The purpose of this study is to evaluate the collision risk quantitatively between two ships in order to recommend initiating the collision avoidance manoeuvre to operators. The authors have analyzed the actual manoeuvres extracted from measured AIS data. Then, a new index to quantify the collision risk between two ships in a coastal sea area is proposed.

1. 緒言

船舶の航行安全を考える上で、海難を防止することは重要であり、海難で最も多い衝突やニアミス¹⁾などの危険な状況を操船者に周知することは有効である。衝突を防止するための支援装置として自動衝突予防援助装置 (ARPA: Automatic Radar Plotting Aids) があるが、その判定は実際に操船者が感じるものとは異なっている場合があり、有効な判定方法とは言いがたいとの声が操船者から上がっている。

これまでに船舶間の衝突危険度を評価するための指標が、いくつか提案されている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。これらは、そのほとんどが操船シミュレータを用いて港内や湾内を想定して再現した過密な状況での操船者の行動分析やそのときのインタビューに基づく指標である。それゆえ実際に航行しているときの避航とどの程度の差があるのかは不明である。

一方、ヒューマンエラーによる衝突の予防や省力化の観点から、欧州を中心として自律航行船舶の開発が進められている⁶⁾⁷⁾。自律航行船には、オートパイロットを発展させたような自動操船機能により航行するものから完全に無人で航行するものまである。衝突危険度を評価する指標は、他船との危険を検知するために用いるだけでなく、このような自律航行船舶を実現するためのアルゴリズムへ応用することができる。そのた

め、船舶間の衝突危険度を適切に評価し、避航の時機を判定することは極めて重要な課題である。

本研究では、まずは操船者に衝突の危険を周知することを目的として、船舶自動識別装置 (AIS: Automatic Identification System) で受信したデータから実際に行われた避航の状況を分析し、避航の実態に基づく衝突危険度を定量的に評価する。

2. 船舶間の衝突危険度

2.1 従来の研究

従来研究における指標の一つ衝突危険度 (CR : Collision Risk)⁵⁾ を例に、船舶間の衝突危険度を評価する場合について考えてみる。その詳細は割愛するが、 CR は避航船と保持船の相対位置および相対速度から決定される最接近時間 ($TCPA$: Time to Closest Point of Approach) と最接近距離 ($DCPA$: Distance to Closest Point of Approach) を用い、操縦性能などの船舶特性を考慮して Fuzzy 推論により求められる。 CR はその定義を都度修正されている⁸⁾ が、相手船が不意にその針路を変えた場合を想定し、最接近点 (CPA : Closest Point of Approach) を通過した後もしくは CR が減少しないようにメンバシップ関数を設定している。

ところが、操船者は保持船が自船の船首尾線を通じた時点で安全であると判断し避航を終了している場合が多い⁹⁾。そのため、 CPA 通過後に衝突危険度が減少する CR の定義は、物理的には自然だが、操船者から見ると船首尾線を通じて CPA を通過するまでの間は衝突危険度が過大に評価されているという意見が多い。この認識の差は、保持船が避航船の前方を通過した後は、避航船の方にその針路を故意に向けることは

* 国立研究開発法人 海上・港湾・空港技術研究所
海上技術安全研究所

** 大阪大学大学院 工学研究科

原稿受理 平成 年 月 日

ほとんどない、また、万が一、その他の船舶との避航などによりその針路を避航船に向けたとしても危険を回避できるだけの距離を確保しているという自信ないしは心理的余裕が操船者に依存していると考えられる。

また、操船者へのインタビューから、実際の海上では航行条件などの制約に依存するが、基本的には操船者にストレスがかからない時間的・距離的に十分に余裕がある段階で避航を行う場合が多数あることがわかっている¹⁰⁾。このような操船者の個性を考慮すると、港内や湾内のように地形的な制約が少ない広い海域では、たとえば避航開始時機や許容できるDCPAの大きさなどは操船者の個性に大きく影響される。そのため従来の指標のように操船シミュレータを用いた場合、被験者数の制限、再現した交通環境の制限などから操船者の判断のばらつきなどを定量的に評価することが難しいと考える。

そこで本研究では、操船者へ危険を周知することを目的として、収集した実海域のAISデータから避航の実態を統計的に分析することによって、操船者の感覚に合う衝突危険度を客観的に表現することを試みる。

2.2 衝突危険度の周知

衝突危険度の評価方法を検討する前に危険（リスク）について考える。ISO¹¹⁾では、危険を「Risk: effect of uncertainty on objectives (目標に対する不確かさの影響)」のように定義している。船舶間の危険に当てはめ、目標を「操船者がストレスを感じることなく航行することができる」にした場合を考える。不確かさを「他船が針路や速度を変えるかもしれない」とすれば、その影響は「衝突するかもしれない」と「(操縦性能や操船時機などによる運動量の違いから)避航しきれないかもしれない」と考えられる。

ここで、海上衝突予防法の第7条第4項では「衝突のおそれ」を「接近してくる他の船舶のコンパス方位に明確な変化が認められない場合は、これと衝突するおそれがあると判断しなければならず(以下略)」と定義している。また、松本¹²⁾は『「衝突のおそれ」は遠距離では発生しない』としている。ここでは、「衝突のおそれ」は「衝突するかもしれない」危険と「避航しきれないかもしれない」危険が合わさったものと考えて、本研究では衝突危険度は操船者が感じる衝突のおそれを定量的に評価する指標とする。

避航の手順を整理する。操船者は、避航船から見た保持船の相対方位の変化量(以下、方位変化)と二船間の距離(以下、相対距離)から衝突のおそれを判断し、計画航路からの逸脱の度合いや接近速度、避航船の操縦性能などを考慮して適切な時機に避航を開始する。避航中は、保持船との距離を一定以上確保しながら航行し、安全になったと判断したときに避航を終了しもとの計画航路もしくは次の変針点に戻る。

すなわち、避航を開始するときや避航を終了するときなどの変針を行うそのときどきが、操船者にとって衝突危険度が変化するときと相当すると考える。そのため、避航を開始するときや避航を終了するときなどの変針を行うときの状況を解析す

ることによって、操船者が感じる衝突危険度が明らかになると考える。また、避航開始の時機は操船者にとって望ましくない衝突危険度の閾値になったときであり、その閾値がわかれば操船者へ危険を周知することができる。

3. 解析データについて

船舶に搭載されたAISが発信したデータを解析し、避航が行われたときのケース(以下、避航ケース)を抽出した。具体的には、交通流の交差が見られる瀬戸内海の西部に位置する周防灘と伊豆大島から東京湾に至るふたつの海域での二船間の見合い関係において避航を目的とした変針が行われた199ケースの二船間の関係を抽出した。このうち、避航ではなく航海計画に基づく針路変更と思われる状況を除いた166ケースを解析に用いた¹³⁾。解析に用いた166ケースは、さらに保持船が避航船の前方を通過した132ケースと、後方を通過した34ケースにわけることができる。

前述したように、操船者が感じる衝突危険度は避航の一連の行動に関係があると考え、避航を以下のように分類⁵⁾する。

1. 通常航行: 避航開始前の計画航路に従った行動
2. 避航: 相手船を回避する行動
3. 復帰操船: もとの計画航路もしくは次の変針点に戻る行動
4. 通常航行: 復帰操船後の行動

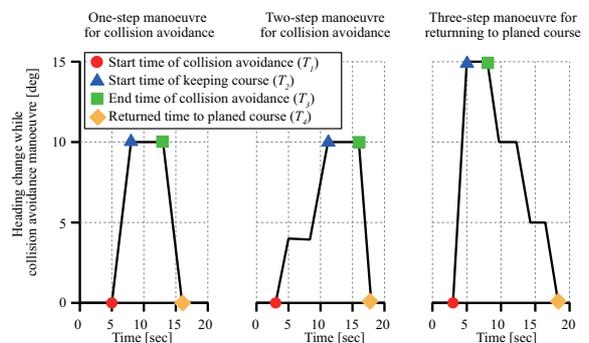


Fig. 1 Typical patterns of heading angle in an action of collision avoidance on course recorder (drawn based on reference¹⁴⁾).

AISデータから抽出した各避航ケースについて、それぞれの行動に移る時機をFig. 1で示す針路の時系列の変化から判断し、4つの操舵時機(避航開始時機(T_1), 変針角保持時機(T_2), 避航終了時機(T_3), 復帰終了時機(T_4))を求めた。

避航開始時機 (T_1)

: 通常航行から避航に移る操舵を行った時機

変針角保持時機 (T_2)

: 避航中の変針角を定常にする操舵を行った時機

避航終了時機 (T_3)

: 避航から復帰操船に移る操舵を行った時機

Table 1 Definition of collision risk in the previous study¹³⁾.

Region	Action of collision avoidance	Evaluation function
<i>Not dangerous</i>	Not necessary	$\dot{\theta} > 3.0 \cdot 10^6 \cdot D^{-1.7}$
<i>To be noticed</i>	To prepare for the action	$\dot{\theta} \leq 3.0 \cdot 10^6 \cdot D^{-1.7}$ and $\dot{\theta} > 5.8 \cdot 10^5 \cdot D^{-1.7}$
<i>Cautious</i>	Strongly recommended	$\dot{\theta} \leq 5.8 \cdot 10^5 \cdot D^{-1.7}$ and $D \geq 1800$
<i>Dangerous</i>	Immediately	$\dot{\theta} \leq 5.8 \cdot 10^5 \cdot D^{-1.7}$ and $D < 1800$

復帰終了時機 (T_4)

: 復帰操船から通常航行に移る操舵を行った時機

4. 避航の実態に基づく衝突危険度

4.1 方位変化および相対距離と衝突危険度の関係

4.1.1 先行研究

原らは、レーダ・シミュレータを用いて、延べ300人の海技資格者を対象とした衝突危険度の評価実験から、輻輳海域における操船者の主観的衝突危険度を求め、Fig. 2に示すように危険領域・注意領域・安全領域に分けて主観的衝突危険度を表現している¹⁵⁾。ただし、この実験では、2マイルレンジでのレーダの航跡をもとに評価されたものであり、その距離以上の評価にそのまま適用できるかどうかは不明である。Fig. 2の横軸は相対距離、縦軸は方位変化を示し、それぞれの象限は避航船と保持船の位置関係により分類される。なお、Fig. 2の二船のうち、塗りつぶされた船舶が避航船、白抜きのもが保持船を示す。

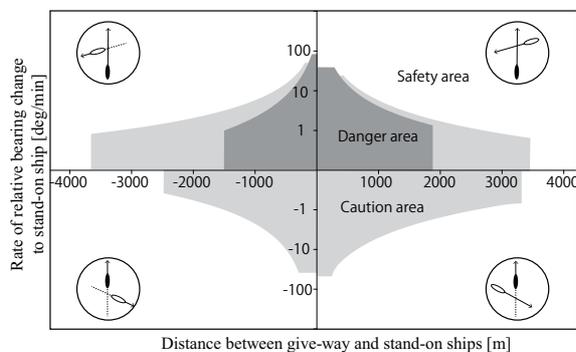


Fig. 2 Subjective assessment of collision risk (drawn based on reference.¹⁵⁾)

著者らは、港内および湾内以外での船舶間の衝突危険度を評価するため Fig. 2 を拡張し、方位変化 $\dot{\theta}$ [deg/min] と相対距離 D [m] を用いて Table 1 に示す 4 段階の衝突危険度 (領域) を定義した¹³⁾。これは、任意時刻における避航船と保持船の方位変化と相対距離から、衝突危険度を安全、要監視、注意、危険の領域に判別するものであり、これらの領域を判別する一般式は (1) 式で表される。なお、危険の領域の定義は、Fig. 2 の危険領域とほぼ同じである。

$$\dot{\theta} = a \cdot D^b \quad (a, b = \text{const.}) \quad (1)$$

これらの領域は、避航開始時機 (T_1) を近似して求めた操船者の平均的な避航開始時機を表す曲線をもとに、その上下方向に分布する避航開始時機 (T_1) を統計的に分析して求めたものである。具体的には、要監視の領域は避航開始時機 (T_1) の 1σ (σ は標準偏差) の信頼区間をもとに設定した。一般に、 1σ の信頼区間は母集団が正規分布に従う場合に全体の 68.3% が含まれる範囲として用いられる。なお、操船者の平均的な避航開始時機 (Fig. 3 中の点線) は、(1) 式において、 $a = 1.0 \cdot 10^6$ 、 $b = -1.7$ である。

4.1.2 危険の領域の定義

Table 1 が示すように、危険の領域は注意の領域の中で相対距離が極めて小さくなったときの状態であるが、その危険の領域は、(1) 式の方位変化と相対距離の関係の上では注意の領域に等しい。これは、相対距離がある値以下のときは方位変化に関わらず危険であると操船者が感じていることを表しており、(1) 式で表される方位変化と相対距離による衝突危険度に加えて、保持船との相対距離を操船者が危険と感じる相対距離以上を常に確保しておきたいという操船者の心理的な影響が加味されていると考える。

一方で、そのような影響を除き、すべての操船者が (1) 式の方位変化と相対距離の関係によって危険を感じる領域が注意の領域の下方に存在すると考える。そこで、Table 1 の危険を除く 3 つの領域を設定したときと同様に、4.1.1 項で述べた操船者の平均的な避航開始時機の曲線まわりの 2σ 信頼区間 (全体の 95.4%) を求め、方位変化と相対距離の座標平面上で信頼区間の下端より下方を危険の領域として再定義する。Fig. 3 は、再定義した衝突危険度を示す。また、(1) 式で表される各領域の境界線の係数を Table 2 に示す。

Table 2 Coefficients of redefined collision risk.

Boundary of Regions	a	b
<i>Not dangerous</i> and <i>To be noticed</i>	$3.0 \cdot 10^6$	-1.7
<i>To be noticed</i> and <i>Cautious</i>	$5.8 \cdot 10^6$	-1.7
<i>Cautious</i> and <i>Dangerous</i>	$1.1 \cdot 10^5$	-1.7

なお、危険と要監視の領域の境界線は、全体の 95.4% の操船者が越えてはいけないと考えている境界であり、危険の領域はほとんどの操船者にとって許容できない状況と言える。

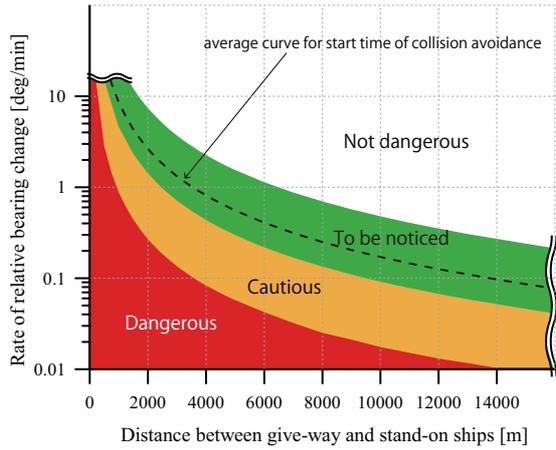


Fig. 3 Redefined collision risk

4.2 避航開始時機を考慮した衝突危険度

4.2.1 避航開始時機での無次元相対距離の分布

Table 1 の衝突危険度は、前述したように二船の方位変化と相対距離によって決定される。ところが、避航開始時機の相対距離は一般的に船長や相対速度の違いにより異なる。そこで、これらを考慮した衝突危険度をさらに検討する。

二船間の相対距離 D [m] を、避航船の船長 L_O [m] と相対速度 V_r [m/sec] (付録の Fig. A1 参照) を用いて (2) 式のように表現する。

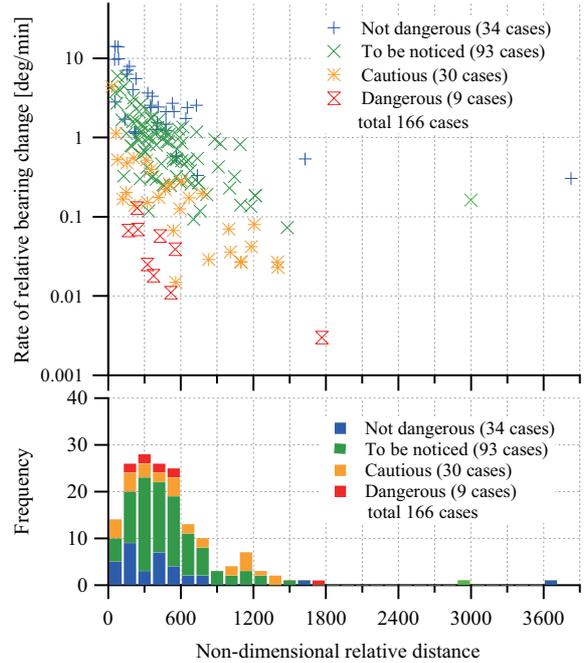
ここで、避航の判断は分単位で行われることが多いことを考慮すると、相対速度 V_r [m/sec] のときに 1 分当たりに縮まる相対距離は $V_r \cdot \Delta t = V_r \cdot 60$ [m] であり、これは単位時間当たりの相対距離変化量 [m] と言える。そこで、(2) 式に示すように、相対距離を避航船の船長で割った無次元距離と、相対距離を単位時間あたりの相対距離変化量で割った無次元距離を掛けたものを無次元相対距離 D' と定義する。

$$D' = \frac{D^2}{L_o \cdot V_r \cdot 60} \quad (2)$$

166 ケースの避航開始時機 (T_1) での無次元相対距離の分布状況を分析する。Fig. 4 において、上の図は避航開始時機 (T_1) での方位変化と無次元相対距離の関係を、下の図は無次元相対距離で見た度数分布を示す。また、その避航開始時機を Fig. 3 に照らし合わせ領域別に分類している。

無次元相対距離の分布は 0 から 600 の範囲が最も多く、無次元相対距離が大きくなるにつれてその度数は小さくなり 1800 以上はほとんど存在しない。そこで、無次元相対距離の分布を確率密度関数で近似し、避航船の船長と保持船との相対速度を考慮した避航開始時機の相対距離の分布を表現する。ここでは、形状と尺度を表す 2 つの母数により多様な形状を表現でき自由度が高いガンマ分布を用いる。

無次元相対距離が 0 から 1800 までを分布の山と見なすと、そこから右方向に離れたところにある 2 ケースは分布の山から大きく逸脱していることから、避航開始時機としては早過ぎると考え解析対象から除外する。

Fig. 4 Distribution of T_1 (starting time of collision avoidance) in $\dot{\theta} - D'$ plane.

4.2.2 無次元相対距離の確率密度関数

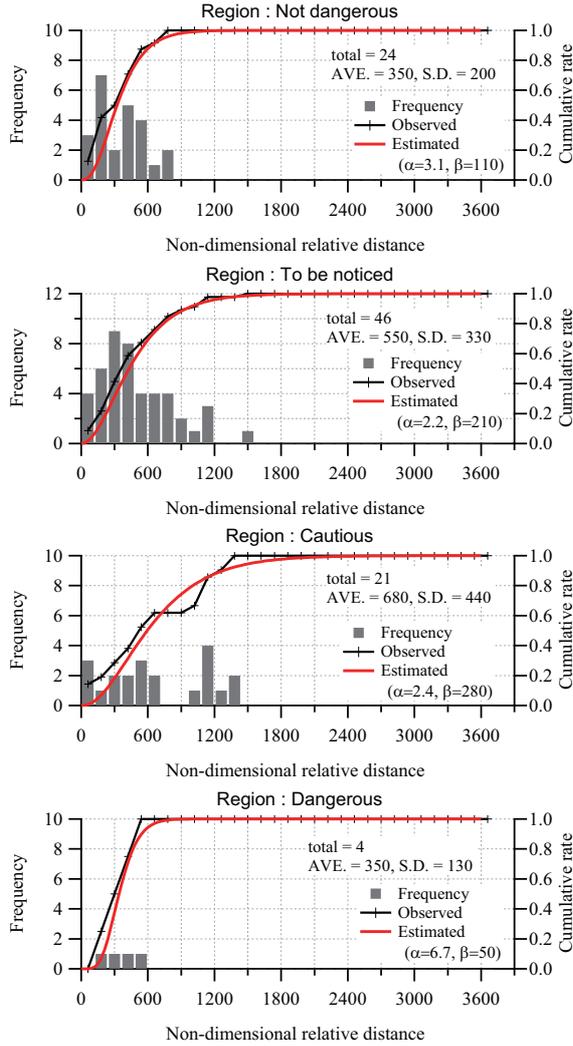
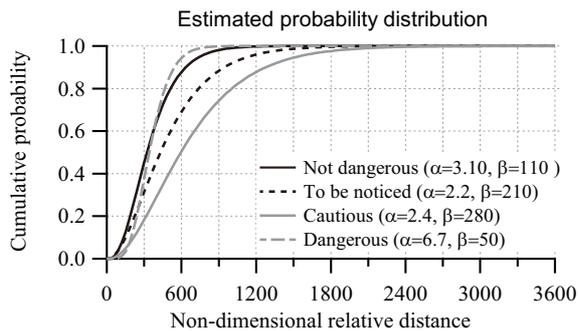
著者らの研究において、保持船が避航船の前方を通過するよりも避航船の後方を通過するほうが操船者は許容しやすいことがわかっている¹³⁾。保持船が避航船の前方を通過した避航ケースの方が、操船者が危険をより強く感じるため避航開始時機に明確な差が現れると考え、Fig. 4 の分布の山から逸脱している 2 ケースを除く 164 ケースのうち、保持船が避航船の前方を通過した 95 ケースを対象に分析する。Table 3 に領域別の避航開始時機 (T_1) のケース数の内訳を示す。

Table 3 Number of cases for distribution analysis of D'

Region	Num. of cases
<i>Not dangerous</i>	24
<i>To be noticed</i>	46
<i>Cautious</i>	21
<i>Dangerous</i>	4
Total	95

95 ケースについて領域別の無次元相対距離の分布からガンマ分布累積分布関数を求めた。Fig.5 は無次元相対距離の度数および累積率 (折れ線) と推定したガンマ分布累積分布関数を示し、上から順に安全、要監視、注意、危険の領域である。横軸は無次元相対距離、第 1 縦軸 (左軸) は度数、第 2 縦軸 (右軸) は累積率を示す。さらに、Fig. 5 の全ての領域のガンマ分布累積分布関数のみ切り出して、Fig. 6 に重畳して示す。Fig. 6 の横軸は無次元相対距離、縦軸はその累積確率である。

Fig.5 の凡例に無次元相対距離の平均 (AVE.) と標準偏差

Fig. 5 Frequency and cumulative rate by D' .Fig. 6 Gamma distribution by D' .

(S.D.)を示している。危険の領域を除くと、領域が危険になるほど無次元相対距離の平均値が大きくなっており、操船者が早めに避航を開始していることがわかる。危険の領域に該当する避航ケースが4ケースと少なかったことが、それ以外の領域が示す傾向と異なった理由に考えられるが、一般的には危険が高いものほど早めに避航を開始することが自然である。また、

推定したガンマ累積分布関数についてみると、どの領域においても度数分布の累積率（折れ線）と比較して、立ち上がりは緩やかであるが全体的な傾向を捉えて表現できていると言える。

したがって避航開始時機は、避航船の船長と相対速度を考慮した無次元相対距離で表現できると言える。また、その避航開始時機 (T_1) での無次元相対距離 D' の分布は、Table. 4 に示す母数 α と β を用いて (3) 式で表現できる。

$$f(D') = \frac{e^{-D'/\beta}}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot D'^{\alpha-1} \quad (D' \geq 0) \quad (3)$$

ここで、 α は形状母数 ($\alpha > 0$)、 β は尺度母数と呼ばれる。

Table 4 Parametes of gamma distribution of D'

Region	α	β
Not dangerous	3.1	110
To be noticed	2.2	210
Cautious	2.4	280
Dangerous	6.7	50

4. 2. 3 無次元相対距離による衝突危険度

Table 1 の衝突危険度を無次元相対距離を使って表現する。Table 1 の衝突危険度は、(1) 式の方位変化 $\dot{\theta}$ [deg/min] と相対距離 D [m] の関係で表され、これを無次元相対距離 D' 、すなわち相対距離 D [m]、避航船の船長 L_O [m] と相対速度 V_r [m/sec] を用いると (4) 式となる。

$$\dot{\theta} = a \cdot D^b = a(\sqrt{D'} \cdot c)^b = ac^{b/2} \cdot D'^{b/2} = a' \cdot D'^{b'} \quad (4)$$

ここで、 a' 、 b' 、 c' はそれぞれ、Table 2 に示す係数 a と b を用いて $a' = ac^{b/2}$ 、 $b' = b/2$ 、 $c = L_O V_r \cdot 60$ である。

Fig. 3 の横軸を (4) 式により変換したものを Fig. 7 に示す。Fig. 7 は、船長と相対速度に依存する避航開始時機を考慮して Fig. 3 を一般化したものと言える。なお、Fig. 7 の横軸は無次元相対距離、縦軸は方位変化をそれぞれ対数表示にしたものである。また、Table. 5 に (4) 式で表される各領域の境界線の係数を示す。二船間の方位変化と相対距離がこれらの境界上にある場合は、より危険な領域に含めることとする。

Table 5 Coefficients of collision risk by relationship between $\dot{\theta}$ and D' .

Boundary of Regions	a'	b'
Not dangerous and To be noticed	$8.4 \cdot 10^3$	-0.85
To be noticed and Cautious	$1.6 \cdot 10^3$	-0.85
Cautious and Dangerous	$3.0 \cdot 10^2$	-0.85

4. 2. 4 衝突危険度の妥当性の検証

Fig. 7 で定義する衝突危険度の妥当性を検証する。Fig. 8 は、Fig. 7 の衝突危険度に、本解析に用いた 166 の避航ケースの操舵時機 (T_1 から T_4) での方位変化と無次元相対距離を重畳して示している。なお、避航中の方位変化と相対距離の時

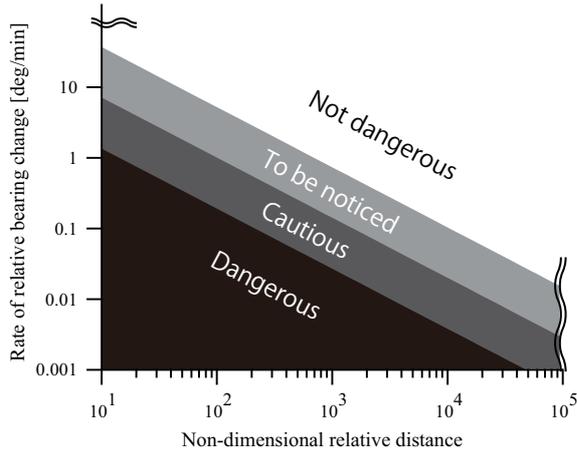


Fig. 7 Collision risk in $\dot{\theta} - D'$ plane.

間変化を比較するため、各操舵時機の方位変化は絶対値をとって表示している。

避航開始時機 (T_1) (○印) の状態では多くのケースが危険や注意の領域に分布しているが、避航開始後の T_2 (△印), T_3 (□印), T_4 (◇印) では要監視と安全の領域の境界を中心として分布しており、避航によって衝突危険度が低い状態に変化していることがわかる。

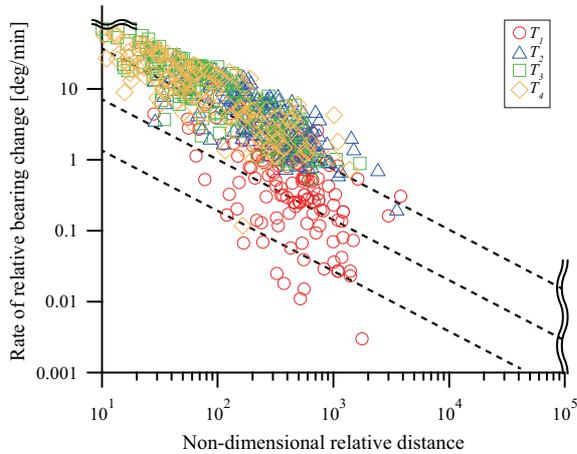


Fig. 8 Relationship of between collision risk and extracted cases.

さらに、解析に用いた 166 の避航ケースとは別に、淡路島の南の海域の AIS データから 2 つの避航ケースを新たに抽出し、その方位変化と無次元相対距離の時間変化を分析した。Fig. 9 および Fig. 10 は、二船の航跡を 3 分間隔で表示したものと、その二変数の時間変化と衝突危険度の関係を示している。(a) は、それぞれの船舶の進行方向と避航開始時機 (T_1) のときの位置を示している。(b) の折れ線グラフは、●印から◆印に向かって時間が経過し、矢印はそれぞれの操舵時機を示している。なお、Fig. 8 と同様に、方位変化は絶対値をとって表示しているため、(b) 中の折れ線グラフの左端の折り返し点は

CPA を通過する時機に相当する。

Fig. 9 のケースでは、(a) が示すように地形的な制約がない場所での見合い関係であったことから避航船と保持船は互いの視野の中にあっただと思われる。このときの状況は、(b) が示すように避航開始時機 (T_1) より前は要監視の領域にあり、領域の境界にほぼ平行の状態を保ちながら航行していることから、避航船と保持船の衝突危険度は一定の状態で行っていると言える。避航を開始した後は、避航終了時機 (T_3) の直前まで、安全の領域であり避航の開始前よりも危険度が低い状況になっていることが確認できる。

Fig. 10 では、(a) が示すように地形的な制約から互いの船舶が視野の中に入っていなかったと思われる。Fig. 10 (b) をみると、避航開始時機 (T_1) より前に危険と注意の領域になっている。このときの避航船と保持船の状態を確認すると、保持船が針路変更を目的とした変針を行っていたが、AIS 情報で互いの船舶を認識していたとしても相対距離は十分離れていること、また地形的な制約などからこの時点では避航を行わなかったと思われる。一方で、避航開始時機 (T_1) 以降は互いの船舶が目視できる状況にあったと思われ、安全な領域を保って航行していることがわかる。

以上から、Fig. 7 の方位変化と無次元相対距離による衝突危険度の評価は、この 2 つの避航ケースの例に関しては妥当であると言える。さらに他のケースにも適用することで、この衝突危険度の評価が避航船と保持船の船長や速度が違う場合にも一般化できることを検証する必要がある。また、本研究では避航船からみたときの状況のみについて検証を行ったが、保持船からみたときの方位変化と無次元相対距離は、その時間変化を同様に可視化すると境界線に沿うような傾向になることが確認できた。検証したケース数が少ないため、さらに他のケースにも適用し検証を続ける必要がある。

5. 危険の周知

最後に、操船者に船舶間の衝突の危険を周知する時機を検討する。操船者へ危険を周知する目的は避航の準備を促すことであるため、Fig. 7 の安全と要監視の領域の境界線を操船者に船舶間の衝突の危険を周知する時機として提案する。つまりその時機は、

$$\dot{\theta} = 8.4 \cdot 10^3 \cdot D'^{-0.85} \quad (5)$$

で表される。

この (5) 式で表される平均的な避航開始時機の閾値を越えたときに操船者に周知することで、Fig. 10 (a) のような互いの船舶の発見できない状況でも、AIS からの情報をもとに余裕を持った避航ができるを考える。

6. 結論

本研究では、操船者に危険を周知することを目的に AIS データで観測された避航の実態を統計的に分析し、以下に示す二船間の衝突危険度を定量的に評価した。

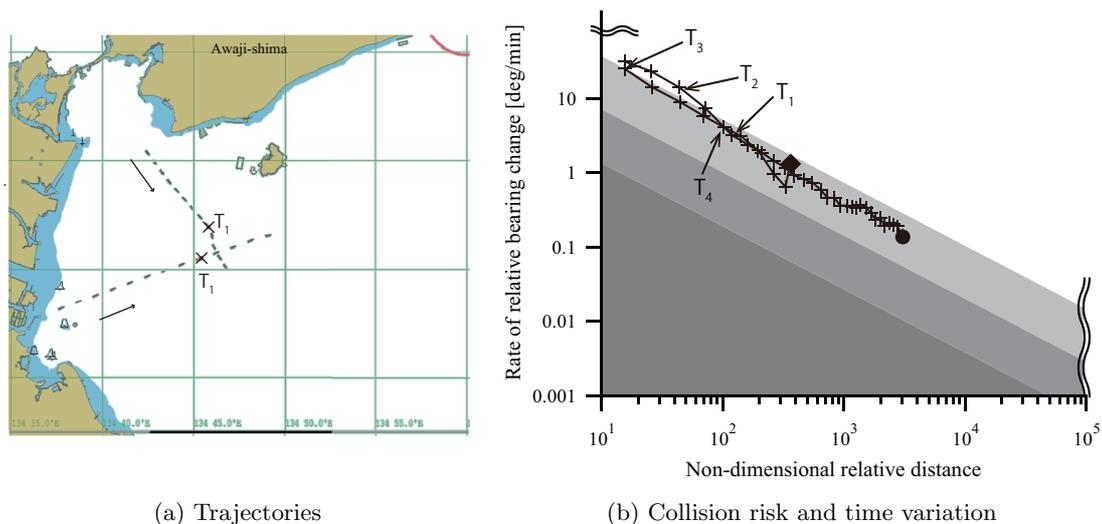


Fig. 9 Collision avoidance observe in the water of the south coast of Awaji-shima (Case 1).

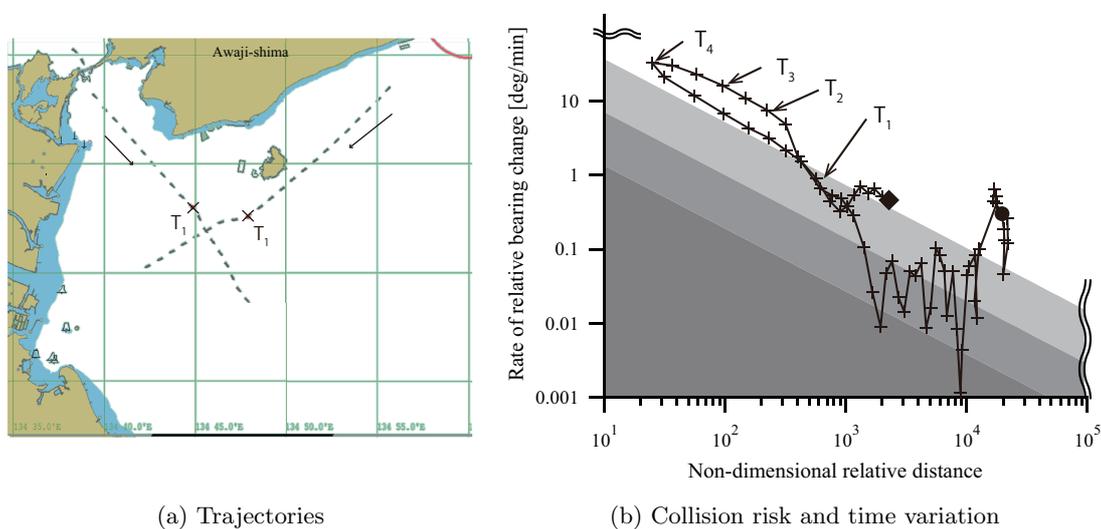


Fig. 10 Collision avoidance observe in the water of the south coast of Awaji-shima (Case 2).

1. 著者らの先行研究をもとに、方位変化と相対距離の平面上で平均的な避航開始時機のまわりに分布する避航開始時機の 2σ 信頼区間の下端より下方を危険の領域として新たに定義し、先行研究ですでに定義していた3つの領域を含め、4段階の衝突危険度（領域）を示した。
 2. 相対距離の二乗を二船の相対速度と避航船の船長で割った無次元相対距離を使って、避航開始時機の相対距離が避航船の船長や二船間の相対速度によらず表現できることを示した。
 3. 方位変化と無次元相対距離を用いることにより、避航を開始する前から原針路へ復帰するまでの一連の行動が説明できることを示した。
 4. 操船者への衝突の危険を周知する閾値として、操船者が避航を開始する平均的な時機を表す評価式を示した。
- 最後に、この衝突危険度の評価が、避航船と保持船の船長

や速度が違う場合にも一般化できるかどうか、また保持船からみた衝突危険度の評価にも適用できるかどうかの検証をさらに続ける予定である。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費若手研究 (B) (No. JP15K18297 代表者：三宅里奈) の支援を受けて実施した。

参 考 文 献

- 1) 海上保安庁：海難の現況と対策について（平成25年版）<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h26/k20140319/index.html>.（参照日 2016年8月30日）
- 2) 小林弘明，遠藤 真：船舶避航操縦の解析 - 人間・機械系解析の観点より，日本航海学会論文集，第56号，pp.101-109，1976.

- 3) 原潔：輻輳海域における避航基準の有効性，日本航海学会論文集，第 85 号，pp.33-40，1991.
- 4) 井上欣三，増田憲司，世良 亘：海上交通安全評価のための技術的ガイドライン策定に関する研究-I: 環境負荷の概念に基づく操船の困難性評価，日本航海学会論文集，第 98 号，pp.225-234，1998.
- 5) 長谷川和彦，上月明彦：Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究，関西造船協会誌，第 205 号，pp.1-10，1987.
- 6) MUNIN: <http://www.unmanned-ship.org/munin/>. (参照日 2016 年 8 月 30 日)
- 7) DNV GL: The ReVolt, <https://www.dnvgl.com/technology-innovation/revolt/index.html>. (参照日 2016 年 8 月 30 日)
- 8) K. Hasegawa, J. Fukuto, R. Miyake, M. Yamazaki: An intelligent ship handling simulator with automatic collision avoidance function of target ships, Proc. of IN-SLC 17, 2012.
- 9) 三宅里奈，福戸淳司，長谷川和彦：AIS 記録データに基づく避航手法の解析，日本航海学会論文集，第 133 巻，pp.66-74，2015.
- 10) R. Miyake et al.: A User Test of Automatic Navigational Intention Exchange Support System Using an Intelligent Ship-Handling Simulator, Proc. Of Control Applications in Marine System 2013, CAMS2013 (9th IFAC Conference), 2013.
- 11) ISO: Risk management - Principles and guidelines, 31000, 2009.
- 12) 松本宏之：海上衝突予防法上の「衝突のおそれ」に関する一考察 - 航法における法適用時機を中心に -，日本航海学会論文集，第 90 号，pp.331-338，1994.
- 13) 三宅里奈，福戸淳司，長谷川和彦：AIS データを用いた避航の行動分析に基づく衝突危険度評価，日本航海学会論文集，第 135 巻，2016. (掲載確定).
- 14) 藤井弥平，巻島勉，原潔：海上交通工学，pp.96，海文堂，1981，ISBN4-303-23401-X.
- 15) 原潔，長澤明，中村紳也：海上交通状況に関する操船者の主観的危険度評価，日本航海学会論文集，第 83 号，pp.71-80，1990.
- 16) 岩崎寛希，原潔：あいまい推論を用いた避航操船モデル，日本航海学会論文集，第 75 号，pp.69-77，1986.

付 録

「相対距離と方位変化」と「TCPA と DCPA」の関係

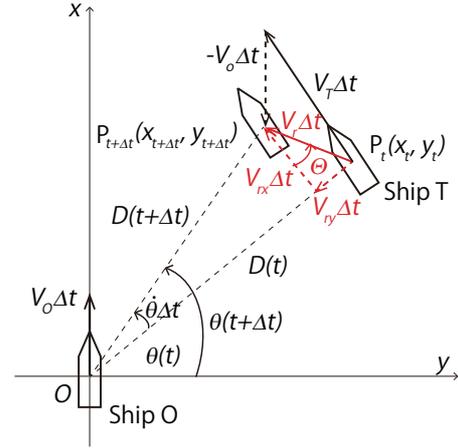


Fig. A1 Relative relation between Ships O and T in small time difference Δt

時刻を t [sec]，微小時間 Δt の間に保持船 Ship T が，点 P_t から点 $P_{t+\Delta t}$ に移動したとし，避航船 Ship O と保持船 Ship T の相対位置関係を Fig. A1 のように定義する²⁾¹⁶⁾。

V_o と V_T が一定のとき， V_{rx} と V_{ry} も一定となるので，TCPA は

$$TCPA = -\frac{D}{\dot{D}} = \frac{D}{V_{ry}} \quad (A1)$$

となり，相対距離 D に比例する．一方，DCPA は

$$DCPA = \int_0^{TCPA} V_{rx}(t) dt = V_{rx} \cdot TCPA \quad (A2)$$

一方，Fig. A1 より， V_{rx} は $\dot{\theta}$ が小さければ

$$V_{rx} \cdot \Delta t = D(t + \Delta t) \cdot \sin(\dot{\theta} \cdot \Delta t) \approx D(t) \cdot \dot{\theta} \cdot \Delta t \quad (A3)$$

となるので

$$DCPA = \frac{D^2}{V_{ry}} \cdot \dot{\theta} \quad (A4)$$

となり，方位変化 $\dot{\theta}$ と相対距離 D の二乗に比例する．

さらに，(1) 式を TCPA と DCPA を使って表現する．(A1) 式および (A4) 式から，相対距離および方位変化は

$$D = TCPA \cdot V_{ry}$$

$$\dot{\theta} = DCPA \cdot \frac{V_{ry}}{D^2}$$

となり，(1) 式の左辺は

$$\dot{\theta} = DCPA \cdot \frac{V_{ry}}{D^2} = \frac{DCPA}{TCPA^2 \cdot V_{ry}}$$

となり，(1) 式の右辺は

$$a \cdot D^b = a(TCPA \cdot V_{ry})^b = a(TCPA^b \cdot V_{ry}^b)$$

となる．すなわち (1) 式は，

$$DCPA = a \cdot V_{ry}^{b+1} \cdot TCPA^{b+2} \quad (A5)$$

となり，TCPA と DCPA を使っても表すことができる．