

AIS データを用いた避航操船の行動分析に基づく 衝突危険度評価

正会員○三宅 里奈 (海上技術安全研究所) 正会員 福戸 淳司 (海上技術安全研究所)
正会員 長谷川 和彦 (大阪大学)

要旨

著者らは、実運航で行われている避航操船をモデル化することを目的とし、AIS データを用いて 2 船の見合いにおいて避航操船を行ったときの遭遇時のデータを 200 ケース抽出し、避航時期と避航操船の状況の解析を行っている。

前報⁽¹⁾では、避航開始時期を特徴づける指標として、避航船と保持船の相対方位変化と、そのときの距離に注目し、避航開始条件を相対方位変化に対応した相対距離として表せることを示した。さらに原らの研究⁽²⁾に基づいて解析した結果、避航開始時期の方位変化と相対距離は、方位変化が急峻に増大すると、相対距離は緩やかに減少する反比例の関係を持っていることがわかった。また、この関係から海域等に十分余裕がある場合の、一般的な操船者が避航操船を開始する時期を示せることがわかった。

キーワード：衝突回避、方位変化、相対距離、避航開始時期、衝突危険度

1. はじめに

近年、自律航行船舶の開発が世界中で進められており、避航操船を支援する、もしくは自動で避航を行うアルゴリズムの開発が望まれている。避航アルゴリズムでは、例えば、避航対象とする船舶の決定、避航を開始する時期、避航操船の手段など、さまざまな要素を考慮する必要がある。

従来、多くの避航操船アルゴリズム⁽³⁾⁽⁴⁾が提案されているが、その多くは衝突の差し迫った脅威(衝突リスク)の発生に基づいて避航操船の判断をしている。この衝突リスクは、操船シミュレータ等で避航操船を我慢できない危険な状況を求め、その状況を指標化したもので、その指標値は、例えば最接近距離(DCPA)や最接近距離に至るまでの時間(TCPA)を用いて表現されてきた。

一方、前報⁽⁵⁾で示したように、この指標値に基づく避航操船アルゴリズムによる避航操船支援システムを、操船シミュレータを用いて熟練船員により評価したところ、支援システムの避航開始は、現実の避航操船時期よりも遅く、避航のための変針も現実の操船より大きいことが分かった⁽⁶⁾。このため、著者らは、有効な避航操船支援を目的として、記録された AIS データから実運航での避航操船を抽出し、解析を行っている。

前報⁽¹⁾では、避航開始時期を特徴づける指標として、避航船と保持船の相対方位の変化率(以下、方位変化)と、そのときの 2 船の距離(以下、相対距

離)に注目し、避航開始条件を方位変化に対応した相対距離として表せることを示した。しかし、構築した避航開始時期を表現する評価式は、対数をとった方位変化と相対距離が直線的な関係で表現されるため、実際の避航操船の開始時期を十分に説明することができない問題があった。方位変化がほとんどない衝突コースに 2 船の状態がある場合、現実的には、避航を開始するときの相対距離は、操船者の個性によってまちまちであるが、相対距離に関係なく衝突を回避するための避航行動をとる必要がある、ということをその評価式に反映することができなかった。

そこで、その問題を解決する評価式を再構築するため、原らの研究⁽²⁾に基づいてさらに解析を行った結果、方位変化と相対距離は、方位変化が急峻に増大すると、相対距離は緩やかに減少する反比例の関係を持っていることがわかった。つまり、両者を対数で表示すると線形的な関係を持っていることを示した。また、この関係から海域等に十分余裕がある場合の、一般的な操船者が避航操船を開始する時期を示せることがわかった。

2. 避航操船時期の解析

2.1 解析の概要と避航操船時期の特定

実運航で行われている避航操船をモデル化することを目的とし、AIS データを用いて 2 船の見合いにおいて避航操船を行ったときの遭遇時のデータを

200 ケース抽出した。さらに、避航開始 (T_1)、変針角保持 (T_2)、避航終了 (T_3)、復帰終了 (T_4)の避航時期と、そのときの避航操船の状況を解析した。

解析に用いた AIS データの概要や 2 船のデータを抽出する条件、避航時期の特定の方法などは、文献⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾に詳細を示しているため、本論では割愛する。

2.2 避航操船時期を特徴づける指標の検討

長畑は、避航船から保持船を望む相対方位の変化を考慮して、個別の船舶の避航開始時における相対距離を表現する数式モデルを導いている⁽⁸⁾。しかし、船舶一般の傾向を表すためには、操縦性能などの初期条件を実態に合わせる必要があるとしている。

また、原らは、動的鳥瞰図表示システム(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評価の実験から、幅轆海域における操船者の主観的衝突危険度を求め、他船との距離および相対方位変化率をパラメータとし、危険領域・注意領域・安全領域に分けてその危険度を表現している⁽²⁾。

著者らは、避航開始時期と衝突危険度には関係があり、両者を表現する指標として方位変化と相対距離が適していると考えた。前報⁽¹⁾では、避航開始条件を方位変化に対応した相対距離として表せることを示し、対数をとった方位変化と相対距離が直線的な関係をもつ評価式を構築した。

しかしながら、この評価式を用いて、実際の避航操船を開始する時期を十分に説明することができない問題があり、これを解決するより適切なモデル式を構築するため、原らの研究をベースにさらに解析を行った。前報で構築した評価式は、方位変化がほとんどない衝突コースに 2 船の状態がある場合、現実的には、操船者の個性によって避航を開始するときの 2 船間の距離はまちまちではあるが、距離に関係なく衝突を回避するための避航行動をとる必要がある、ということを示すことができなかつた。

図 1 は、原らが定義した危険領域・注意領域・安全領域の範囲を示している。なお、各領域の境界を示す評価式は、自船と他船の位置関係により、他船との距離と相対方位変化率で表される座標系を 4 つの象限別に分類して定義されているが、本論では、簡単のため「自船の前方を他船がこれから通過する(第一象限)」状況で検討を行った。

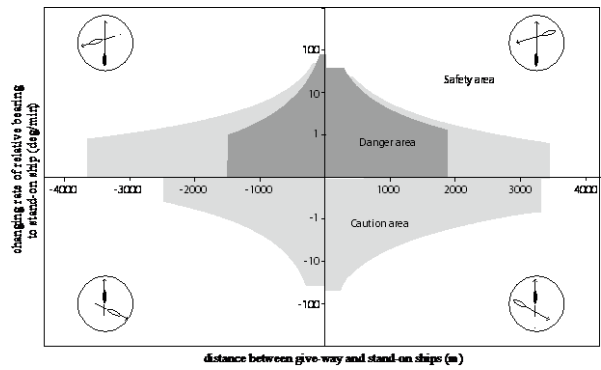


図 1 主観的な衝突危険度 (文献(2)を基に作成)

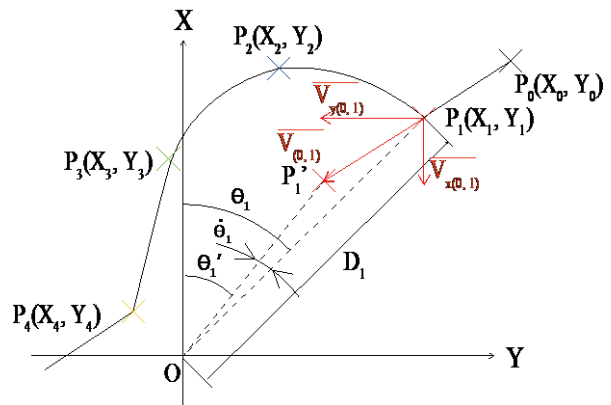


図 2 避航開始時における方位変化

2.3 指標の定義

本論では、避航操船時 T_n における方位変化 $\dot{\theta}_n$ (deg/min)は、(1)式および(2)式で表現する。

点 P_{n-1} から点 P_n 間における平均相対速度を $\overline{V_{(n-1,n)}}$ (m/sec)としたとき、点 P_n から dt (sec)後の点 P_n' の相対方位は、

$$\theta_n' = \tan^{-1} \left(\frac{Y_n \overline{V_{y(n-1,n)}} dt}{X_n \overline{V_{x(n-1,n)}} dt} \right) \quad (\text{deg}) \dots\dots (1)$$

で与えられ、点 P_n から点 P_n' の方位変化は、

$$\dot{\theta}_n = \left| \frac{d\theta_n'}{dt} \right| \quad (\text{deg/sec}) \dots\dots\dots (2)$$

で表現する。

その定義は、直前の動作まで (T_{n-1} から T_n の間)の避航船に対する保持船の平均相対速度 $\overline{V_{(n-1,n)}}$ (m/sec)のまま、 T_n 時の保持船の位置 $P_n(X_n, Y_n)$ (m)から移動したと仮定したときの相対方位 θ_n' (deg)と T_n 時の相対方位 θ_n (deg)の差分の絶対値とする。また、そのときの相対距離を D_n (m)とする。

具体例として、避航開始時 (T_1)における方位変化 ($\dot{\theta}_1$)を図示したものが図 2 である。避航船の位置を原点とし、船首方向を縦軸上向きとした相対座

標系に、保持船の相対航跡と避航操船時における保持船の位置の概略を示している。

3. 避航開始時期を表す評価式

3.1 方位変化と相対距離の関係

図3は、原らにより定義される領域(網掛け部)上に、○と×で示す200ケースそれぞれの避航開始時(T₁)における避航船と保持船の相対距離と、そのときの方位変化の関係を重畳している。さらに、避航開始時(T₁)の方位変化と相対距離の近似曲線を青色実線で示す。

本論で抽出した避航操船ケースは、沿岸域を対象としており、原らの評価式で設けられた適用範囲とする2船間距離が異なるので、両者の比較を容易にするため、原らの注意領域と安全領域の境界を延長した黒色破線を追加して示す。その関数は(3)式で表現される。

$$\dot{\theta} = 5.8 \cdot 10^{-7} \cdot D^{-7} \dots \dots \dots (3)$$

図3中の○は(2)式において絶対値の中が正、つまり自船の前方を他船が航過する状況を、また、×はその逆に負の場合、つまり自船の後方を他船が航過する状況である。

200ケースのうちほぼ全て(192ケース)が網掛け部の範囲外にあることがわかる。本論で抽出した避航操船は、沿岸域を対象としたものであり、輻輳海域での避航操船よりも早い段階で避航を行うため、安全領域とされる範囲に該当すると考えられる。

方位変化の正負を問わず、プロットされた点は緩やかな右肩下がりの傾向を示している。最小二乗法により(3)式の形を持つ関数である青色実線で示される近似曲線を求めた。その関数を、(4)式に示す。なお、その相関係数は $r^2=0.36$ である。

$$\dot{\theta} = 4.9 \cdot 10^{-6} \cdot D^{-6} \dots \dots \dots (4)$$

3.2 避航操船を開始する一般的な領域

上述の(4)式で表現される避航開始時(T₁)の方位変化と相対距離の関数は、抽出した避航操船ケースの代表、言い換えれば操船者全体での代表値である。一方で、図3中の青色実線の上方および下方に存在する避航ケースのばらつきは、操船者の個性や航行状況などの要因によるものと考えられる。

そこで、(4)式の近似曲線の信頼性区間を求め、概ねの操船者が避航を開始している一般的な領域を求めることとした。

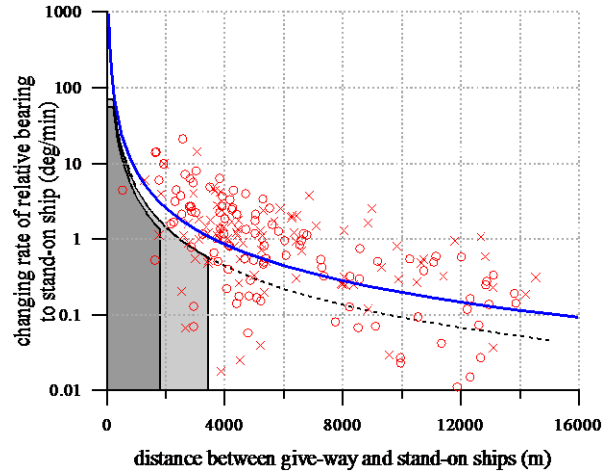


図3 避航操船開始時の方位変化と相対距離の関係および原らによる主観的衝突危険度

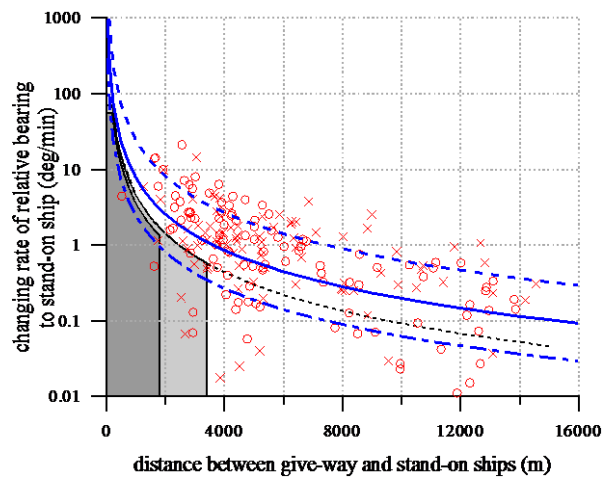


図4 避航開始時期と信頼性区間

本論では、避航操船のケースごとのばらつきは正規分布に従うと仮定して、全体の約3分の2(68.3%)が含まれる信頼性区間を求め、図4に示す。信頼性区間の下方限界を青色一点鎖線、上方限界を青色点線を示す。また、その下方および上方は(5)式および(6)式で表現される。

$$\text{(下方限界)} \quad \dot{\theta} = 1.5 \cdot 10^5 \cdot D^{-1.6} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{(上方限界)} \quad \dot{\theta} = 1.6 \cdot 10^6 \cdot D^{-1.6} \dots \dots \dots (6)$$

3.2 一般的な操船者の避航操船開始時期

図4中の(5)式で表現される信頼性区間の下方限界である青色一点鎖線より上方の領域は、ほとんどの操船者が衝突の危険を回避するために避航を行う領域であり、言い換えれば信頼性区間の下方限界より下の領域はほとんどの操船者が耐えられない危険

な状況であると言える。すなわち、沿岸域においては、青色一点鎖線よりも上方の領域において、一般的な操船者が避航操船を開始すると言える。

ところで、図 3 および図 4 中の(3)式で表現される黒色破線は、原らが安全な状況と危険な状況を線引きするために、最小二乗法により求めた回帰曲線であることから、その上下方には 3.2 節で求めたように、境界線を中心に実験結果が広がる領域が存在していると言える。

すなわち、避航操船開始時期や衝突危険度を表現する青色一点鎖線および黒色破線は、ほぼ同じ意味合いを持ち、この違いは、ばらつきを持つ操船者の影響であると考えられる。

本論では、同じ距離でも方位変化が大きい、すなわち安全側である原らが定義した(3)式で表現される黒色破線を、沿岸域において一般的な操船者が避航操船を開始する時期とする。

なお、原らによる評価式は、船舶の航跡を 2 マイルレンジで表示したレーダ・シミュレータを用いて求めたため、その適用範囲に距離制限が設けられているが、より遠方にまで十分適用することが可能であることがわかる。

4. まとめ

実運航で行われている避航操船をモデル化することを目的とし、AIS データから横切りにおける 2 船の見合いを抽出し、避航開始時期を特定し、そのときの避航船と保持船の状態量を解析した。

原らの評価式をもとに、方位変化および相対距離を用いて、避航操船の開始時期を表現する近似式を求めた。その特徴は、以下のとおりである。

- * 原らが定義した危険領域および注意領域の外側に、沿岸域において、一般的に避航操船を行っている領域が存在していることを示した
- * 避航開始時(T_1)の方位変化と相対距離の関係は、方位変化が急峻に増大すると、相対距離は緩やかに減少する反比例の関係、つまり、両者を対数で表示すると線形的な関係を持っていることを示した
- * 原らが定義した注意領域と安全領域の境界が、海域等に十分余裕がある場合の、一般的な操船者の避航操船開始時期の境界に相当することを示した

4. 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. 15K18297 代表者：三宅里奈)の支援を受けて実施した。

5. 参考文献

- (1) 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操舵時の相対距離について, 日本航海学会講演予稿集, Vol. 3, No. 2, pp. 106-109, 2015
- (2) 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.
- (3) K. HASEGAWA, J. FUKUTO, R. MIYAKE, M. YAMAZAKI: An intelligent ship handling simulator with automatic collision avoidance function of target ships, Proc. of INSLC 17, 2012.
- (4) 榎野純, 矢吹英雄, 大矢賢太, 今津隼馬: 水先人のための OZT を用いた避航操船の評価について, 日本航海学会論文集, 第 124 号, pp. 57-61, 2011.
- (5) 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操船手法の解析, 日本航海学会論文集 Vol. 133, pp. 66-74, 2015
- (6) R. MIYAKE, J. FUKUTO, Y. NIWA M. MINAMI: A user test of Automatic Navigational Intention Exchange Support System using an intelligent ship-handling simulator, Proc. of CAMS 2013, 2013.
- (7) R. MIYAKE, J. FUKUTO, K. HASEGAWA: Modeling of Observed Ship Domain in Coastal Sea Area Based on AIS Data, Activities in Navigation: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, pp. 143-150, CRC Press, ISBN 978-1-138-02858-6
- (8) 長畑司: 避航の判断と操船者の特性-III: 避航開始距離とカタストロフィー, 日本航海学会論文集, 第 63 号, pp. 19-28, 1980.