避航判定基準の最適化に関する研究—Ⅲ.

今 津 隼 馬*・小 山 健 夫**

The Optimization of the Criterion for Collision Avoidance Action—Ⅲ.

Hayama IMAZU and Takeo KOYAMA

Abstract

The subject of this study is to make an optimum criterion for collision avoidance action deciding by a navigator or collision avoidance aids.

When the collision avoidance is done by own ship and targets, it is necessary to introduce a traffic rule in the decision-making model. Here, the decision-making model which considered about a statistical collision risk, action loss, and a traffic rule, was made.

The results by the simulation tests showed that all targets could keep a safety distance between another targets, and these avoiding action were close to the action adopted by a real ship.

1. は じ め に

2 隻の船が遭遇する状態 θ は、自船の運動ベクトルを V 、相手船の運動ベクトルを V_T 、相対位置を P とすると

$$\theta \equiv f(P, V, V_T) \quad \dots\dots(1)$$

となる。衝突回避は V , V_T を制御することにより行われるが、それぞれの船が自由に行動を決定すると、一方の船による避航行動が他方の船の避航の効果を打ち消し、衝突することがある⁽¹⁾。このような現象を回避する方法としては、相手船の意志を確認しながら V , V_T を決める共同作業による方法（共同型）と、避航に規則（避航規則）を導入し、それぞれの船が V , V_T をこの規則に従って決める方法（自律型）がある。共同型では全ての船に有効な通信手段を持つことが必要であり、大型船同士の避航を除けばまだ一般的ではない。そこでここでは後者の方法を採用し、今までの避航判定基準^{(2),(3)} に避航規則を導入することを試みた。そしてこの新しい避航判定基準の有効性をシミュレーションにより調べたところ、シミュレーションケースにおいて、全ての船の安全が確保され、避航による損失も少なく、しかも採用された行動が海上で一般に採用されている避航行動に近いものとなった。

2. 避航規則と行動評価

図1は今回の避航判定基準の行動決定過程を示したものである。これは前回までの行動決定過程^{(2),(3)} に避航規則による行動の評価を加え、採用行動を衝突危険、効率率そして規則の3つで評価し、決定しようとするものである。避航規則による行動評価モデルの作成には、自船が衝突の危険に遭遇する時の遭遇パターンと自船の位置づけ、それに自船に適用される避航規則とその規則に違反した場合の評価を考える必要がある。

2.1 遭遇パターンと自船の分類

衝突の危険は2隻以上の船舶が存在する時に生ずる。そこでここではその最小単位である2船間の遭遇パター

*正会員 東京商船大学（東京都江東区越中島2-1-6）

**正会員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

ンについて考えることにする。2 船間の遭遇の基本パターンとしては、海上衝突予防法に 3 つのパターンが示されている。それは図 2 の(1)(2)(3)に示すような行合い状態、横切り状態それに追越し状態である。この 3 つの状態では何らかの避航処置をすることが必要であり、その避航法については具体的に海上衝突予防法に規定されている（但しその規定の適用はそれぞれの船が視野の内にある場合に限られている）。そこでここでは海上衝突予防法に準じて避航規則を作成することとし、この 3 つの遭遇パターンと、それぞれのパターンにおける船の区分（行合い船、避航船、保持船、追越し船）は海上衝突予防法の規定どおり（但し視界に無関係とする）とすることとした。また図 2 の(4)に示した行動制限状態とは、現在の行動を維持する限り衝突の危険はないが、2 隻が同時に行動変化するすると短時間の内に衝突する可能性のある状態である。この状態ではそれぞれ図 2 の例に示すように左転・右転制限船を規定した。図 3 は自船の区分を行なう過程を示したものである。ここでは自船と 1 隻の目標船のデータを使って自船が図に示す 7 つの船種のどれに当るか判別する。もし目標が複数ある場合は、それぞれの目標に対して自船を区分する。その結果、自船は複数の種に所属することもある。今 1 隻の目標データを呼び出した場合の区分法について図に従って説明する。

- i) 自船と目標の予想最接近距離(DCPA)・時間(TCPA)を求める。
- ii) 自船と目標の置かれた状況が避航規則を適用する状況か判断する。例えば DCPA が小さくても相手が遠方にあり、しかも TCPA も大きい時は避航規則に従う必要はない。今回のモデルでは TCPA が 21 分以下あるいは 2 船間距離が 4 海里以下の場合に避航規則を適用することとした。
- iii) 予想最接近距離が安全航過距離(D)の n 倍以下となる場合、行合

図 1 避航行動決定過程

図 2 遭遇パターン

図 3 遭遇パターンによる自船の区分

DCPA : 予想最接近距離
 TCPA : 予想最接近時間
 D : 安全航過距離
 n, m : 係数 $1 \leq n \leq m$

いおよび横切り状態の避航規則を適用することとし、図に示す過程で、行合い船、保持船、避航船に区分する。

- iv) 予想最接近距離が D の m 倍($m > n$)以下となる場合、追越し状態の避航規則を適用することとし、図に示す過程で、追越し船、被追越し船に区分する。ここで航過距離を大きく設定した理由は、追越し状態では被追越し船の行動を長時間制約しないよう、安全航過距離を通常より大きく採る方が良いからである。
- v) 予想最接近距離が mD 以上あっても、2船が同時に行動変化をすると衝突の可能性の高い状態では行動に制限を設けることとし、図に示す過程で、左転制限船、右転制限船に区分する。

なおここで使用している自船および目標のデータは自船については現時点のデータを、目標についてはプロットングあるいは観測により知り得た最新のデータを使用することとし、過去の行動変化による遭遇パターンの変化については考えないこととした。

2.2 避航規則と行動評価法

自船と目標1隻の場合の遭遇は図2に示した遭遇パターンの1つに所属し、その結果、自船に適用される避航規則もただ1つの規則となる。海上衝突予防法には2隻の船が互いに相手を視認しあっている場合で衝突の恐れが生じた場合の航法が規定されている。そこでここではこの規定に準じて視界に無関係に2船間の避航規則を次のように決めた。なお今回は船の種類(動力船、帆船、漁労船等)については考慮しなかった。

- i) 行合い船の航法：左転より右転による避航の方が良い。
- ii) 保持船の航法：できるだけ現在の針路、速力を保持する。また避航する場合、左転は極力避ける。
- iii) 避航船の航法：左転より右転による避航の方が良い。また針路差が小さい時は右転や減速により相手の船尾側をかわすようにする。
- iv) 追越し船の航法：右転でも左転でも良いが、安全航過距離を十分に採り、被追越し船の行動をできるだけ制限しないようにする。
- v) 被追越し船の航法：追越し船の通過する側への変針はできるだけ避ける。
- vi) 左転制限船の航法：左転は極力避ける。
- vii) 右転制限船の航法：右転は極力避ける。

またこの避航規則に違反した場合の行動評価については3段階のレベルを設定し、図4に示す方法で評価した。ここで行動評価レベルとして L_a, L_b, L_c ($L_a < L_b < L_c$)を設定し、行動評価値 W が大きくなる程、その行動の規則違反の程度が大きいとした。図4ではまず自船の予定行動を考え、その行動の避航規則による評価の初期値を $W=0$ とする。次に自船が従うべき航法毎に次のように行動評価を行なった。

- i) 行合い船の航法に違反した場合、 $W \leftarrow W + L_a$ とする。
- ii) 保持船の航法において、行動を保持しない場合は次のように評価する。自船が全ての目標に対して保持船の場合は $W \leftarrow W + L_b$ とし、自船が保持船以外の船でもある場合は $W \leftarrow W + L_a$ として行動変化を容易にした。また行動変化が左転の場合はさらに $W \leftarrow W + L_c$ として極力そのような行動の採用が起きないようにした。
- iii) 避航船の航法に違反した場合は $W \leftarrow W + L_a$ とし、特に針路差が小さい時の左転についてはさらに $W \leftarrow W + L_b$ と評価した。
- iv) 追越し船では行動評価を行なうのではなく、衝突危険評価に使用する安全航過距離設定値を通常より大き

図4 避航規則による行動評価

く設定することとした。

v) 被追越し船の航法に違反した場合は $W \leftarrow W + L_b$ とした。

vi) 左転・右転制限船の航法に違反した場合は $W \leftarrow W + L_b$ とした。

図4では行合い船、保持船、避航船等の行動評価を直列に並べることにより、自船が図3の区分で複数の種に所属した場合でも、避航規則に違反する程度が相対的に少ない行動を求めることができるようになっている。

3. シミュレーションによる評価

今回考察した避航判定基準モデルがどの程度有効であるのかどうかは、この判定基準を全船に持たせ、それぞれの船が独立して避航した結果の、安全性、効率そして避航規則に対する適法性について調べる必要がある。そこでここではシミュレーションにより各船が採用した行動が的確であったかどうか調べてみた。

3.1 避航条件

避航問題の解答としては無条件の下で求めることも考えられるが、結果の解析のためには条件を設けた方が便利である。そこでここでは次のような条件を設定した。

(1) 船舶側の条件

- i) 各船は同一の判定基準を持つ。
- ii) それぞれの各船は独立に避航し、お互いの間の情報交換は行なわない。
- iii) 各船の判断および避航処置は全船同時に行なう。ii) の条件と合わせると、ここで考える避航条件は一般の避航より厳しいものとなる。
- iv) 各船の採用可能な行動としては、速力については航海速力を1として1, 0.85, 0.7の3種類を、針路については1回の変針量を現針路に対して $\pm 20^\circ$, $\pm 40^\circ$ の4種類とし、[その針路範囲は原針路を中心として $\pm 80^\circ$ の範囲とする。なお運動性能については今回は考慮しなかった。
- v) 行動の効率評価 (V_e) は前回報告した⁽³⁾位置の差間距離を重み付けして使用し、変位量が大きくなっても評価量の最大値はそれほど大きくならないようにした。
- vi) 行動の危険評価は衝突確率 (ξ) を使って⁽²⁾次式により評価した。

$$V_e = (10\xi)^2 \quad \dots\dots(2)$$

vii) 動的計画法における径路の総合評価 (V) は次式による。

$$V = \sum V_e + \sum V_c + W \quad \dots\dots(3)$$

ここで W は避航規則による行動評価であり、第1段階ステップの行動にのみ関係することとした。また総合評価値が最小となる径路を採用することとする。

- viii) 今回の動的計画法では見通し時間を3ステップ30分とし、各ステップの間隔は6分、12分、12分とした。これにより各船は6分毎に行動を判断し決定することとなる。

(2) 環境条件

- i) 各船で遵守すべき避航規則、ならびにそれによる行動評価は前節2で説明したとおりとする。
- ii) 海域条件による行動制限や、外力の行動への影響はここでは考えない。

3.2 2船間の避航結果

2船間の遭遇で避航が必要なケースは、大別すると図2に示す行合い、横切り、追越しの3種類となる。そこでここではこの3つの状況を設定し、前記の条件に従ってシミュレーションをし、その解を求めてみた。

(1) 行合いの場合

図5-1は自船 (000° , 12ノット) と目標 (180° , 12ノット) が予想最接近時間 (TCPA) 30分、予想最接近距離 (DCPA) 0 で衝突する場合のシミュレーション結果である。図3による船の区分では自船も目標も行合い船となる。図5では自船の値や位置を○印で、目標のそれを△印で表わしている。図の左側は上から順に

- a. 各船の採用針路：各船が採用した針路の原針路からの差が縦軸、横軸は時間 (時) である。
- b. 各船の採用速力：各船が採用した速力の航海速力との比が縦軸、横軸は時間。
- c. 予想衝突確率：動的計画における1段目の径路で、遭遇することが予想される衝突確率 (ξ) のうちの最大値、横軸は時間。

d. 総合損失評価値：動的計画法において採用した径路の総合評価値 V (式3参照)。

を表わしている。また図の右側は上から

- 自船と目標の各6分毎の実景プロットであり、各船の初期位置を図印で示す。
- 自船の原針路を基準とした、針路指示による相対プロットである。図中央の白丸は自船を中心とした安全航過距離 ($D=0.5$ 海里) の円であり、矢印は各6分の相対ベクトルである。

この結果、安全性、効率および適法性については次のように満足していることが判明した。

- 最接近距離は1.2海里となり、安全性は十分確保されている（同時判断・行動のためDCPAは大きくなった。）。
- 各船の最大横変位はそれぞれ0.77海里であり、2船合わせての進出損失距離は0.84海里と小さく効率は良い。
- 各船とも行合い船の航法を遵守した行動を採用している。

(2) 横切りの場合

図5-2は自船(000°, 12ノット)と目標(270°, 12ノット)が TCPA=30分, DCPA=0で衝突する場合のシミュレーション結果である。船の区分では、自船は避航船、目標は保持船に当る。これにより次のことが判明した。

- 最接近距離は1.2海里となり、安全性は十分確保されている。
- 避航船の最大横変位は1.59海里とやや大きい、それによる進出損失距離は0.71海里と小さく効率は良い。
- 避航船、保持船の航法を遵守した行動を採用している。

(3) 追越しの場合

図5-3は自船(000°, 6ノット)と目標(000°, 12ノット)が TCPA=30分, DCPA=0で衝突する場合のシミュレーション結果である。船の区分では、自船は被

追越し船、目標は追越し船に当る。これにより次のことが判明した。

- 最接近距離は1.5海里となり、安全性は十分確保されている。
- 追越し船の最大横変位は2海里とやや大きい、それによる進出損失距離は0.78海里と小さく効率は良い。
- 追越し船として、被追越し船の進路を十分避けた行動を採用している。

以上のことから2船間の避航について今回の避航判定基準は十分有効であることが判った。

3.3 3船間の避航結果

2船間の避航と3船間の避航の大きな違いは船の区分において（図3参照）同一船が複数の区分に所属することがあることである。そこでここでは行合いと横切りが重なった場合の状況を設定し、その解を求めてみた。

(1) 行合いと横切りの場合

OWN C=0.0 V=12
TAR C=180.0 V=12 A=0.0 R=12.0

図5-1 2船間の避航例（行合い）

OWN C=0.0 V=12
TAR C=270.0 V=12 A=45.0 R=8.4

図5-2 2船間の避航例（横切り）

図6-1は自船(000°, 12ノット)と目標I(120°, 12ノット)および目標II(180°, 12ノット)がTCPA=30分, DCPA=0で衝突する場合のシミュレーション結果である。図中, 目標Iの値や位置は△印で, 目標IIのそれは+印で示している。また相対プロットの1は自船を中心とし図の上方を原針路方向(点線)とした針路指示で(白丸は安全航過距離 $D=0.5$ を半径とした円), 2は目標Iを中心とした針路指示で示している。初期設定から見た船の区分では自船は行合い船であるとともに保持船でもあり, 目標Iは保持船と避航船であり, 目標IIは行合い船と避航船である。シミュレーションの結果次のことが判明した。

- i) 最接近距離の最小値は1海里となり, 安全性は十分確保された。
 - ii) 自船と目標Iの最大横変位はともに0.77海里であり目標IIのそれは1.54海里となった。また3船合わせての進出損失距離の合計は1.91海里と小さく効率が良い。
 - iii) 行合い船, 避航船としての航法を遵守し, 行合い船に対しては左舷対左舷で, 保持船に対してはその船尾を航過している。
- (2) それぞれが横切りの場合

図6-2は自船(000°, 12ノット)と目標I(120°, 12ノット)および目標II(240°, 12ノット)がTCPA=30分, DCPA=0で衝突する場合のシミュレーション結果である。船の区分としては3船とも, 保持船であると同時に避航船である。図から次のことが判明した。

- i) 最接近距離の最小値は1海里となり, 安全性は十分確保された。
- ii) 3船とも最大横変位は0.77海里と小さい。また3船合わせての進出損失距離の合計は1.71海里と小さく効率が良い。
- iii) 避航船としての航法を遵守し, 保持船に対してその船尾を航過している。

以上の結果, 3船間の避航について今回の避航判定基準は十分有効であることが判った。

3.4 多船間の避航結果

OWN C=0.0 V=6
TAR C=0.0 V=12 A=180.0 R=3.0

図5-3 2船間の避航例(追越し)

OWN C=0.0 V=12
TAR C=120.0 V=12 A=-30.0 R=10.3
C=180.0 V=12 A=0.0 R=12.0

図6-1 3船間の避航例(行合い, 横切り)

OWN C=0.0 V=12
TAR C=120.0 V=12 A=-30.0 R=10.3
C=240.0 V=12 A=30.0 R=10.3

図6-2 3船間の避航例(横切り, 横切り)

一般の海域では多くの船がそれぞれの目的に向かって航行している。そこでここでは次のように目標を設定し、避航判定基準の効果を調べた。

- 設定海域：自船を中心とし左右と前後それぞれ24海里の範囲とする。
- 設定位置：一様乱数を使って設定位置 (x, y) を決める。
- 針路：一様乱数を使って $000^{\circ} \sim 360^{\circ}$ の中から決める。
- 速力：藤井氏⁽⁴⁾らの研究を参考に、正規分布乱数 (σ : 標準偏差0.06) を使って次式により設定する。

$$V_T = 10^{1.13 + \sigma} \quad \dots\dots(3)$$

- 再設定：すでに設定されている目標との距離が2海里以下となったり、TCPAが20分以下でしかもDCPA $\leq 2D$ となった場合改めて設定する。

図7は前記の方法で50隻の目標を発生し、シミュレーションした結果である。初期設定では2時間の間にDCPA $\leq 2D$ (1海里)となる状況が12回 (このうちDCPA $\leq D$ が7回) 発生する。図の左はシミュレーション開始後66分 (12回目の判断) から96分 (17回目の判断) までの30分間の実景プロットであり、右図は自船を中心とした針路指示による2時間分の相対プロットである。この結果次のことが判明した。

POSITION AND 8 MIN VECTOR

RELATIVE PLOT(OWN SHIP)

図7 多船間の避航例

- 全船の間に生じた最接近距離は全て安全航過距離以上となり、安全は確保できた。
 - ii) 全船合わせての進出損失距離の合計は7.14海里であり、効率は良い。
 - iii) 実行された避航行動 (9隻分) を検討した結果、避航規則を遵守していた。
- この結果、この避航判定基準は前記シミュレーションケースにおいて有効であることが判った。

3.5 ステップ間隔の影響

以上のシミュレーションではステップ間隔をそれぞれ6分、12分、12分 (見通し時間は30分) として求めたが、ここでは見通し時間の30分は変えず、ステップ間隔を変えた場合の影響について調査した。調査した状況は図6と同じように同速の3船がTCPA=30分で同時に衝突 (DCPA=0) する10のケース (図6の2ケースを含み、他の8ケースでは目標Ⅱの位置と針路を変化させた) についてである。表1はその結果をまとめた表である。ここではステップ間隔が (6分、12分、12分) の場合の10ケース全ての3船の進出距離の合計、避航中の横変位量の合計、および計算時間 (東大の HITAC M-280H 使用。330回の判断のCPU時間は約11秒) との比で表わしている。これによりステップ間隔が (6分、6分、6分、12分) の場合、最も効率が良い (進出距離が最大となる) ことが判った。しかし前に採用した (6分、12分、12分) のステップ間隔でも、効率はあまり低下していない。この結果、横変位量が問題とならない海域あるいは目標数が少ない海域ではステップ間隔を (6分、12分、12分) として動的計画法により避航すれば良いと言える。また見通し時間の長短の影響については今後調査することとする。

表1 ステップ間隔による避航結果の比較

ステップ間隔 (分)	進出距離比	横変位比	計算時間比
6-12-12	1.000	1.000	1.000
6-6-18	1.008	0.889	1.364
6-6-6-12	1.010	0.916	2.909
6-6-6-6-6	1.009	0.925	8.818

注. 同速の3船がTCPA=30分で同時に衝突する10ケースについて比較した。見通し時間は全て30分とした。

4. ま と め

今回、避航判定基準に避航規則を導入しその効果を調べたところ、次のことが判った。

- それぞれの船が独立に避航しても、相手の避航効果を打ち消すような行動は抑制された。また採用行動は

安全で効率の良いものであった。

ii) 採用行動は一般に行なわれている避航行動に近いものとなった。

iii) 避航規則として海上衝突予防法に規定されていない行動制限船を設定する必要があった。しかしこれは避航において常識として守られているものであり、避航判断に不可欠である。

また今回の避航判定規準は交通がある程度輻輳しても有効であることが判ったが、今後はこの方法による避航の限界について調査を進めるとともに、自船の運動性能についても考慮する予定である。

参 考 文 献

- (1) 今津, 避航と衝突予防装置, 成山堂, 昭和59年
- (2) 今津・小山, 避航判定基準の最適化に関する研究, 日本航海学会論文集71号, pp. 123~130, 昭和59年
- (3) 今津・小山, 避航判定基準の最適化に関する研究—II, 日本航海学会論文集72号, pp. 23~30, 昭和60年
- (4) 藤井ほか, 海上交通工学, 海文堂, 昭和56年

質 疑 応 答

原 潔: 避航義務と保持義務の優先度の判定はどのような考え方でされているのでしょうか。ウェイト関数が導入されているようですが、どのように決められているのでしょうか。

今津隼馬: 規則による行動評価は図4のように行ない、行動の決定は式(3)による総合評価損失が最小となる行動を選びました。規則導入における考え方としては安全を重視する立場をとり、避航義務と保持義務の両方の義務のある場合は、避航義務を優先しています。この優先度は、図4に示す方法で行ないました。図中の重み係数 L_a , L_b , L_c は単一目標時の避航行動が、一般に考えられる行動に近くなるように選びました。そしてこの係数を複数目標に対して使ってみた結果が図6, 7です。これから、単一目標に対して決めた係数でも複数目標の場合に使えることが判りました。しかしこの係数が最良かどうかは今後研究する必要があると思います。