操船シミュレータによる避航操船の研究—I

—— 避航動作に影響する諸要素とその評価 ——

原 潔*・野本謙作**・小須田敏*

Research on Collision Avoidance Maneuver with Ship

Handling Simulator — I

—— Factors Affecting on Collision Avoidance

Maneuver and Their Evaluations ——

Kiyoshi HARA, Kensaku NOMOTO
and Satoshi KOSUDA

Abstract

A series of experiments was carried out to find the relation between the collision avoidance maneuver and various encounter situations using a ship handling simulator. According to the experimental results, the distance to the target ship at the start of resuming the course proved to be close or equal to DCPA. Factors mainly affecting this distance are the range of the first detection and the time required for the maneuver. We introduced "Collision avoiding potential diagram" and make use it to examine how difficult a given encounter situation be and also to evaluate the results of collision avoidance maneuver from the point of view of safety allowance. This diagram is drawn by ship's position at CPA after altering course and/or changing speed.

1. は じ め に

近年の海上交通の多様化にともなって避航操船は複雑になってきており、その安全性の向上には操船者に対する安全教育の徹底はもとより、工学的、法的な安全対策を急ぐ必要がある。そのためには、基本的な資料として避航操船の特長を定量的に表現する必要があり、実態調査や避航操船のモデル化によってその努力がなされてきた。しかし、避航操船の発生は、時刻、場所にランダムな要素が強いため、避航実例を任意の出合い状況で多数収集するのは極めて困難である。又、モデル化する際にも基本的な特長を組込む必要がある。

一方、最近、世界各地で視界再現装置をもった操船シミュレータが開発され、室内で実際の海上での操船に近い状況を作り出すことができるようになった。そして、この操船シミュレータを使って、避航操船の訓練・研究も行なわれつつある(1)~(5)。

本論文ではSR151(阪大)操船シミュレータを使って系統的に出合い状況、操船する船等を変えて、避航操船において船と操船者がどのような反応を示すかを実験的に求めたもので、その結果を使って出合い状況の困難さを評価するために占位可能領域の考え方を導入し、避航操船上の余裕を評価しようとしている。

2. 実 験 方 法

2.1 SR151(阪大)操船シミュレータ

使用した操船シミュレータは、SR151(阪大)操船シミュレータ(3)である。このシミュレータは日本造船研究協会のSR151部会(3)で開発され、SR175部会(4)で改良が加えられたものである。図1に示すように、船橋前面の210°のスクリーン上に海面、遠方物標および別にテレビカメラにより撮影された他船が投影され、それらが操

* 神戸商船大学

** 大阪大学

船にともなって相対運動をするように作られている。そして常用する航海計器と共にレーダシミュレータが設置され、投影されている物標と同じ相対運動をレーダ画面上でする。したがって操船者は視覚とレーダを併用しながら操船することができる。組込まれている数学モデルは参考文献(3), (4)に詳しく紹介されている。

図1 SR151 (阪大) 操船シミュレータ

操船者は実船で航海士の経験を有するA, B 2氏がそれぞれのシリーズを担当した。操船する船は表1に主要目等を示す4種の船を使用した。出合い角シリーズではVLCC, 高速貨物船共に針路の不安定ループ幅 5° (全幅)のもの, 初認時機シリーズでは針路安定船をもちいた。したがって, たとえば, E40-sとはEシリーズ船とは, $V_A = 6 \text{ m/s}$ としたときの L/V_A が40の針路安定船を意味している。使用した数学モデルおよび各船の操縦性能等の諸系数等は文献(4), (5)に詳しい。なお, 相手船は1隻で大型カーフェリーである。各シリーズの実験の設定条件は表2の通りである。

2.2 設定条件

実験は, 図2に示す記号で, 最接近予想点Cに至る距離($V_A \tau_0$)を一定にして, 出合い角 θ を変えた出合い角シリーズと, 主として変針で避航する場合として出合い角 θ を $\pm 45^\circ$ (プラスは相手船が右方より接近), 変速して避航する場合として $\theta = \pm 135^\circ$ にして初認時機(τ_0)を変えた初認時機シリーズに大別される。

図2 記号図

表1 供試船の主要目

船 種	VLCC	鉱石専用船	高速貨物船	小型貨物船
記 号	D50-5	E40-s	E25-s, D25-5	E10-s
船の長さ L (m)	300	240	150	50
船 幅 B (m)	50	36.92	21.43	8.33
吃 水 d (m)	20	14.77	9.32	3.33
航海速力 V_A (knots)	14.58	14.58	18.20	12.15

表2 設 定 条 件

出合い角シリーズ : 操船者; A航海士

供 試 船	VLCC	高速貨物船
初認距離 ($V_A \tau_0$)	2240m (1.5 マイル)	
出合い角 * (θ deg)	$\pm 5^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, 180°	
自船船速 (V_A)	11.67 knots	

* 出合い角の+(−)は他船が自船の右方(左方)から接近する場合を示す。

初認時機シリーズ：操船者；B航海士

供 試 船	鉱石専用船	高 速 貨 物 船	小型貨物船
L/V_A	32	28, 24, 20, 16	8, 6.7
出合い角(θ deg)	$\pm 45^\circ$ $\pm 135^\circ$		
初認時機(τ sec)	600, 400, 300, 200, 100, 50		

3. 避航操船の分析

3.1 避航動作の重回帰分析

今回は変針による避航(変針避航)を中心に(1)どの位置で避航を開始し,(2)どれだけ時間をかけて,(3)どの状態で舵を反転して原針路に戻るかの3要素を中心に解析した。

避航動作の効果として、避航を終了して原針路に戻り始める時機における相対距離 D_f を採り、離隔距離と略称する。 D_f と DCPA (Distance of Closet Point of Approach) とは後に図5に示すように避航操船に時間的余裕のある場合は D_f が CPA より先に生ずる。

D_f がどのような要素と相関が高いかを145回の全実験データについて重回帰分析を行なった。ここでは、自船の速力を V_A として(1)操船する船の長さ(L),(2)出合い角(θ),(3) L/V_A ,(4)初認時機 $V_A \tau_0$,(5)避航開始時機 τ (時間ベース),(6)避航開始距離 $V_A \tau$,(7)避航中の最大回頭角(ϕ_{max}),(8)避航時間(t_s),(9) τ/t_s ,(10)避航開始時の相対距離 D_R ,(11)その無次元値 D_R/L の11変数を選んで回帰式と実測値の差の平方和を減少させる効果の大きい変数を次々と付加して線型回帰式の重相関係数 R を求めた。その結果、次式のように D_R と τ/t_s の2変数で D_f の変動の約80%が説明でき、それ以外に説明変数を増しても R がほとんど改善されないことがわかった。

$$D_f = -984 + 0.316D_R + 690\tau/t_s \quad (1)$$

重相関係数 $R=0.93$

ここで D_f : 離隔距離 (m)

D_R : 避航開始時の相対距離 (m)

τ/t_s : 避航開始時機 (分) と避航時間 (分) の比

図3はこの線型回帰式を使って予測した D_f と計測した D_f との対応を示している。 D_f の小さいところで若干のズレがみられるが、ほぼ実測値を予測している。これから早目の避航開始と短い避航時間が大きな離隔距離を与えることがわかる。

3.2 出合い状況と避航動作

3.2.1 初認時機の影響

回帰分析の結果でも示されるように、当然のことながら早期に避航を開始すると、大きな避航効果がえられることがわかる(図4)。これは概括的に言えば、操船者は距離よりも他船との相対方位を制御の基準においているためと考えられる。

図5は離隔距離 D_f の発生する時といわゆるCPAの発生する時の時間差(Δt)を示している。初認時機が200sec(操船者Bの場合)以下になると、一度変針してから原針路へ戻るのではなく、変針後、定針するまでにCPAが発

図3 重回帰分析の予測値と実測値の比較

生して操船上の余裕が持てないことになる。図6は D_f と CPA の関係を示したもので、一定の CPA (ここでは約 $2.0L$) が確保できると $D_f > CPA$ となって、操船上の余裕が増えてくることがわかる。この操船シミュレータの実験では相手船の挙動に対する不確定さがほとんどないので、えられた D_f および CPA の値がそのまま現実のものとはならないが、実船においてもこうした傾向があることが予測される。

どのような状態で避航が終了して船首を反転するかを他船との相対方位 θ_p と相対距離 D_f で図7に示している。 θ_p と D_f はほぼ逆比例の関係がある。操船者が異っても傾向は同じであり、操船者AはBより大きな相対方位・距離にしてから原針路に戻している。

3.2.2 出合い角の影響

図8は出合い角と D_f の関係を示している。棒状で示すように、かなり変動があるが、傾向としては $\theta=90^\circ$ のときが比較的大きな D_f をとり、これより θ が大きくても、小さくても D_f が減少していくのがみられる。他船の船尾に向ける操船をすると、避航角が大きくなり、相手船の接線移動速度が大きくなって避航効果が大い。このことは、航路の交差角を決める時の一つの参考資料となろう。

3.2.3 操船する船、操船者の影響

操船する船が異なると操船結果が異なると予想されるので、鉱石専用船、高速貨物船、小型貨物船の3隻を選び、同じ船、つまり同じ船長 (L) について速力 (V_A) をかえた場合、同じ速力で船長をかえて L/V_A を変えた場合について実験した。又、衝突予想点に至るまでの初認時機 ($V_A \tau_0$) を一定時間、一定距離、および無次元化した一定距離で制約した。しかしながら、図9に示すように $V_A \tau_0$ を $15L$ とした場合を除き L/V_A の D_f に与える影響はほとんどない。これは後述するように、操船者が相手船の船尾近くに自船の船首

図4 離隔距離 (D_f/L) と避航開始距離 (D_R/L) ($\theta=45^\circ$, 操船者: B)

図5 D_f と CPA の発生する時間差 Δt

図6 D_f/L と CPA/L の比較 ($\theta=45^\circ$)

を向けるように時間、距離上からみて余裕を持って変針避航が可能ならば L/V_A の影響をなくするように操船するためと考えられる。

操船者が異なると、避航開始時機・舵を戻す時機は図6、7に示されるように、操船者Aは操船者Bに比べて、避航開始が遅いため避航後の時間余裕 Δt 、離隔距離 D_f も小さく、操船結果の変動もやや大きい。これは主として衝突するかどうかの判断に要する時間の差であった。しかし、両者共、同じような操船経験を持つ人達なので、避航のパターンはほぼ同じになっている。

4. 避航操船の評価

4.1 占位可能領域

出合い状況と避航動作の評価については従来より船の慣性を考慮しないで自船は瞬時に所要の針路、速力が得られるとして相対速度ベクトルを基礎に幾何学的に避航動作の効果を求めた結果(6)や運動方程式を基礎に切迫した危険を避けることの出来る限界を求めた結果(7)がある。これらの結果は一つの指針として有効であるが、船舶の輻輳する海域で実際に操船者の経験する避航では自船の慣性を無視することはできないし、いつも限界近く

図7 避航終了時の相対方位 ($\theta_{p.f}$) と 相対距離 (D_f) ($\theta=45^\circ$)

図8 出合い角と D_f/L

図9 L/V と離隔距離 (D_f) ($\theta=45^\circ$)

で操船しているわけではない。

ここでは出合い状況・操船結果を評価する一つの方法として、まず航行中の船で操船者が操作を開始すると τ 分後に占位できる船位の範囲を想定する。この範囲は、操船する船が与えられ、操船内容(操作時機、使用舵角・使用主機回転数)が決ると数値計算によって求めることが出来る。実際の避航実例やシミュレータ実験の結果からまず $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で変針して τ 分後に占位できる領域を求めた。計算は、シミュレータに組込んだのと同じ数学モデル(4)を用いて、次式による自動操舵方式を使用して変針した。

$$\delta^* = a(\varphi_f - \varphi) + b'\dot{\varphi} \quad (2)$$

ここで δ^* : 指令舵角
 φ_f : 目標針路
 φ : 現在の針路
 $\dot{\varphi}$: 現在の角速度
 a, b' : 定数

定数 a, b' は a, b' を種々組合せて自動変針実験をした後 $a=2.0, b'=2.5 \times L/V_A$ とした。

図10は、高速貨物船 (E25-s) が 18.3 ノットで航行中許容舵角左右 35° を操作して 100秒 から 400秒後に占位出来る範囲を示している。これを変針による占位可能領域 $S_\varphi(\tau)$ と略称しよう。このような領域は、機関を操作して減速した場合にも急激な後進でなければ、ほぼ実際に近い計算が可能であるが、以下では $S_\varphi(\tau)$ のみについて考える。

$S_\varphi(\tau)$ は、 φ_w, τ, V によって非線型影響をかなり受けているので、船の慣性を無視する時には適用する範囲を注意する必要がある。図11は、 $L=150\text{m}$ の船と $L=240\text{m}$ の船における $S_\varphi(\tau)$ の比を比較したもので、 $\tau=200$ 秒以下では L の影響が大きい。一方、300秒以上では L の影響はほとんどない。

4.2 出合い状況の評価

この占位可能領域が、(1)出合い状況、(2)相手船に必要な離隔距離、(3)自船の周囲に存在する他船、障害物、水深等の地理的制約によってカットされて有効な領域が少なくなるにつれて操船が困難となる。つまり与えられた状況下で操船者に許容される“手の内”が少なくなることである。(1), (2), (3)を考慮して“手の内”を計算するには前提条件が多様すぎて一般化した議論をするには確率的なアプローチを必要とする。ここではシミュレータ操船の結果を評価するため与えられた出合い状況における $S_\varphi(\tau)$ を求める。

両船が出合い角 θ , 等速力で接近し、 τ 秒後に C で衝突が予想される出合い状況下で自船が φ_f だけ変針した時の CPA の発生点およびその時の DCPA を求めた。その結果、CPA の発生点をつらねて出来る領域、 $S_\varphi(\tau)$ は試行操船を繰返して図10の占位可能領域を基本にして図12に示すように θ が大きくなるにつれて縮小し、DCPA の値も減少する。図12中の点線は図11の $\tau=300\text{sec}$ に対する相手船がない場合の領域である。したがって、出合い角 θ が大きいと同じ DCPA を確保するのに大きな避航角を必要とし、早く CPA が発生するため手持ちの占位可能領域の余裕が小さくなる。

4.3 操船結果の評価

こうした出合い状況の下で避航動作を行う時、操船者がいくらの DCPA を確保するかは相手船の行動の不確実性、海上運航法規等の観点からの検討を必要とするので、ここでは操船者が DCPA を確保する上で持っていた占位可能領域 $S_\varphi(\tau)$ の余裕から操船結果を検討する。

図13に破線で示すのは高速貨物船が 18.2 ノットで航行中、出合い角 $\theta=45^\circ$ で A 点で $\tau_0=400$ 秒後に他船と衝

図10 変針による占位可能領域
 (高速貨物船: E25-s, $V=9.38\text{m/s}$)

図11 占位可能領域に与える船の長さの影響
 ($V=7.5\text{m/s}$)

突する状況下での避航時の航跡例を示している。たとえば、初認時には $\tau_0=400$ 秒に対応した占位可能領域 $\widehat{ABC}$ を持っており、D点(×印)で舵を戻しB点(○印)で占位可能領域と交差している。そこで $\widehat{AB}$ が使用した占位可能領域であり、B点から基準線上の点Cまでの弧の長さ $\widehat{BC}$ が与えられた状況下で結果として操船者のもった占位領域の余裕 $4S\varphi$ とする。 $\widehat{DB}$ は図5に示したCPAの発生時刻と D_f の発生時刻の差 Δt にほぼ対応するものであり、一種の時間的余裕と考えられるが、操船者の判断した安全性の許す範囲で進出距離の減少を出来るだけ小さくする操作とみることが出来る。

図13には同様に $\tau=100, 200, 300$ 秒の場合の航跡を示しており、これらから $4S\varphi$ を読み取った。 $4S\varphi$ は操船者の避航場面における操作のしやすさに対応し、確保したDCPAは安全性に対応するものとして、相対的な比較のために両者を 90° 変針の試行操船をした時に確保出来る $(DCPA)_{90^\circ}$ および $S_{90^\circ}(\tau)$ を基準にして示したものが図14である。このシミュレータ実験では相手船一隻で必ず直進するという事を操船者は知っており他に制約がなく実際より簡単な状況なので、安全性と操作性とが負の勾配を持つ直線関係にあるにすぎないが、実際には障害物等によってDCPA, $4S\varphi$ が確保できない場合には原点の方へ移動してより危険な方向へむかう。しかし、安全性、操作性の具体的な評価は無次元化しないで行う方が实际的であろうし、安全性と操作性を如何に振り分けるかを決定するには最適な避航アルゴリズムを確立する必要がある。

5. 結 論

避航操船に影響する諸要素を分析するために、操船シミュレータを使って系統的に出合い状況、操船する船等を変えて避航操船の実験を行った。そして、その結果を評価するために操船者の“手持ちの操船方法”の表現として $0 \sim 90^\circ$ まで変針したときのCPAの発生点をつらねて占位可能領域を求めた。これらによって、およそ次の諸点が明らかになった。

- (1) 避航終了時の離隔距離 D_f に最も影響するのは避航開始時の相対距離であり、避航時間、相対速力を合せた重回帰式により D_f の変動の80%は表現出来る。
- (2) 原針路に戻す時機は、右へ避航の時は相対方位が $0^\circ \sim 20^\circ$ 左に他船をみる時であり、これは相対距離と反比例の関係になる。
- (3) 変針可能で距離、時間上の余裕があれば船の大きさの影響は操船者によって補正される。

図12 出合い角(θ)と $S\varphi \cdot \theta$

(高速貨物船: E25-s, $V_A=9.38\text{m/s}$, $\tau=300\text{sec}$)

図13 占位可能領域と操船結果

(E25-s, $V_A=9.38\text{m/s}$, $\theta=45^\circ$)

- (4) 占位可能領域は操船の手持ちの操船方法を定量的に表現するのに有効である。

なお、本研究に際してはたえず激励していただいた神戸商船大学本田教授、熱心に討議していただいた間瀬教授、鳥野助教授に謝意を表すと共に、実験は日本造船研究協会SR151, SR175部会に関連して行なったものであり、御討議いただいた両委員会の委員諸氏に、実験時特にお世話になった辻本英麿、芳村康男の両氏に深く感謝します。

また、解析は文部省科学研究費によることを付記します。

図14 操船結果の評価

参考文献

- (1) 小林弘明・遠藤 貢：船舶避航操縦解析—人間機械系の観点より—，日本航海学会論文集 56号 19
- (2) 原 潔：避航操船の信頼性工学的考察，関西造船協会誌 第167号 1977.12
- (3) 日本造船研究協会：大型化に対応する船舶操縦システムの調査研究報告書，1976，1977
- (4) 日本造船研究協会：加減速時の操船性能に関する調査研究報告書，1980. 3
- (5) 日本海難防止協会：衝突海難防止に関する調査研究報告書，1980. 3
- (6) 今津隼馬：衝突危険の判定と避航処置，避航操船シンポジウム，1977. 3
- (7) 原 潔：避航能力と避航限界，避航操船シンポジウム，1977. 3

質疑応答

今津隼馬：自船と他船の速力比により筆者の言われている余裕は変化すると思われませんが，この点について今回は考慮されたでしょうか。

原 潔：今回は考慮しておりません。

井上篤次郎：1. シミュレータによる実験をやられた結果を使っておられるが操船者はどのような方であったか。

2. このシミュレータは他船が平面的に見えるが，このようなシミュレータによる操船と実船の操船との感覚的な差をどう考えられるか避航操船実験に使用してその影響はないか。

原 潔：シミュレータにおける操船者は出合い角シリーズと初認時機シリーズでそれぞれ航海士としての実務経験が2～3年の方です。シミュレータでは距離感が乏しいことは事実ですが，避航操船では相手船との相対方位が重要な制御要素であることと，レーダシミュレータを併設していますので，実船と同じような避航パターンになるようです。全く同じ条件で実船との比較はしていませんが，避航操船の実態調査との比較では統計的にこのことを確認しております(2)。