



Title	A I Sデータを用いた船舶間の衝突危険度評価に関する研究
Author(s)	三宅, 里奈
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61785
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

AIS データを用いた
船舶間の衝突危険度評価に関する研究

三 宅 里 奈

平成 28 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

目 次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究の背景	1
1.2	既往研究における船舶間の衝突危険度の評価	2
1.3	避航に影響を及ぼす要素	3
1.4	本研究の目的および構成	3
第 2 章	AIS データの事前解析	5
2.1	AIS データの概要	5
2.2	対象海域と対象期間	6
2.3	AIS データからの避航ケースの抽出方法	6
2.3.1	OD 調査	6
2.3.2	時刻歴データの作成	8
2.3.3	避航の判定と操舵時機の特定	8
2.4	本研究の分析に用いたケース	12
2.4.1	第 3 章の分析に用いたケース	13
2.4.2	第 4 章の分析に用いたケース	18
2.5	結論	19
第 3 章	避航操船の特徴	21
3.1	緒言	21
3.2	避航と相対距離の関係	21
3.2.1	避航と最小離隔距離の関係	21
3.2.2	避航と航過距離の関係	26
3.2.3	避航に伴う操舵時機と相対距離の関係	30
3.3	避航を行う相対距離の条件	33
3.3.1	分析に用いるケースの選別	33
3.3.2	見合い関係と航過距離の関係	42
3.3.3	避航により確保する一般的な航過距離	43
3.4	操舵時機と操船者が感じる衝突危険度の関係	46
3.5	結論	48
第 4 章	二船間の衝突危険度の定量的評価	50

4.1	緒言	50
4.2	避航開始時機のばらつきが示す意味合い	50
4.3	衝突危険度の定量的評価	53
4.3.1	分析に用いるケースの選別	53
4.3.2	避航開始時機の分析	54
4.3.3	衝突危険度の検討	58
4.4	衝突危険度の評価方法	62
4.4.1	衝突危険度（領域）の定義と妥当性の検証	62
4.4.2	船長および相対速度による影響	67
4.4.3	一般化された衝突危険度の評価方法	71
4.4.4	衝突危険度の定量的評価	73
4.5	結論	76
第5章	結論	78
参考文献		81
本論文を構成する論文		84
謝 辞		85
付録A「方位変化と相対距離」と「DCPAとTCPA」の関係		86
付録B 避航抽出アルゴリズムについて		89
B1.	避航抽出アルゴリズムの手順	89
B2.	避航抽出アルゴリズムにおける抽出結果の検証	92

第 1 章

緒言

1.1 研究の背景

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な課題である。海上保安庁の海難統計¹⁾によると、事故種類別では衝突が最も多く発生しており過去5年間での船舶事故隻数全体の28%を占めている。さらに平成27年に発生した衝突について、620隻の事故隻数のうち、貨物船、タンカーおよび旅客船が占める割合は全体の32%である。それらの衝突の要因を見ると、貨物船と旅客船に限れば、操船不適切と見張り不十分のふたつがそれぞれの事故船種別の要因の半数以上を占めており、その他の人為的な要因を含むと衝突の80%以上が人為的な要因（ヒューマンエラー）によるものである。

また、近年、日本人船員が減少しており、自社で外国人の船員を教育、育成することによって船員を確保している国際航海に従事する船舶（外航船）を保有する大手船会社もあるが、国際航海に従事しない船舶（内航船）や旅客船の多くを保有する中小手の船会社では船員が不足しているとの声が特に上がっている。現に、国土交通省の統計資料によると、過去10年間の日本人の船員の推移は、外航船員はほぼ横ばい、内航船員および旅客船員は10年前の2006年と比較して概ね10%以上減少している²⁾。さらに、2015年に実施された船員異動状況調査による労務団体等別の船員の年齢構成を見ると、50歳以上の職員および部員が占める割合は、外航^{*1}では15%、内航^{*2}では42%、旅客^{*3}では21%を占めている³⁾。特に内航および旅客では、50歳以上の船員が定年を迎える10年後には職員および部員が不足することが予想される。

このような背景を受けて、ヒューマンエラーによる衝突の防止や船舶の省力化の観点から、自律航行船舶の開発が欧州を中心に進められている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。自律航行船舶には操船者なしで完全に無人で航行する船舶やトラックコントロールのような自律航行機能と遠隔操作により人間をサポートする船舶などが含まれる。日本国内における自律航行船舶に関する研究は、古くは機関室の自動化を世界初で行った貨物船金華山丸（1961年建造）⁷⁾をはじめ、「高信頼度知能化船」の研究開発（1982年-1988年）⁸⁾、「内航近代化船 翔陽丸」⁹⁾の開発が挙げられる。そして2016年の現在、国土交通省は、海事産業の生産性革命「i-Shipping」

^{*1} 外航労務部会（外航盟外を含む）に加盟している事業者には雇用されている船員数

^{*2} 内航労務協会、一洋会及び全内航（内航盟外を含む）に加盟している事業者には雇用されている船員数

^{*3} 長距離フェリー協会労務部会に加盟している事業者には雇用されている船員数

を実現する具体的施策とロードマップを示し、航行の分野では、船舶の衝突リスク判断と自律操船についての研究が進められている。前述したような自律航行船舶を実現するには、港内のように多くの船舶が密集する状態から太平洋のように広い場所で少数の船舶が散在する状態まで、あらゆる状況において適切に避航（相手船を回避する行動）することが重要である。そのためには、船舶間の衝突危険度を適切に評価することが必要となる。

さらに、海上保安庁は、「第3次交通ビジョン—船舶交通の安全・安心をめざした取組み—」（2013年-2017年）のひとつとして、東京湾湾口から瀬戸内海に至る海域^{*4}の安全対策を推進している。2017年には、伊豆大島西方海域の安全対策として、AIS 仮想航路標識を活用した整流化方策（推薦航路案）が検討され、船舶交通の安全性や経済性の観点からその効果を定量的に評価している¹⁰⁾。また、千葉県銚子沖や福岡県北九州市沖には風力発電のために洋上に風車が設置され¹¹⁾、それら施設が周辺を航行する船舶に及ぼす影響の評価が行われている¹²⁾¹³⁾。このように多くの船舶が航行する沖合いの交通環境の変化を受けて、船舶の衝突危険度を定量的に評価する社会的な要望がある。

1.2 既往研究における船舶間の衝突危険度の評価

これまでに船舶間の衝突危険度を評価する指標がいくつか提案されており、それらは大きくふたつに分類できる。

ひとつめは、ある船舶が別の船舶に出合ったときの1対1での衝突危険度を評価するものである。小林らは、操船シミュレータを用いて避航実験を行い操船者が行う衝突危険判断を分析し、ある船舶から別の船舶までの距離と相対方位を用いて衝突危険度を評価する指標 *CJ* (Collision Judgement) を提案している²⁰⁾。長谷川らは、二船間の衝突危険度を評価する指標 *CR* (Collilsion Risk) を提案している²¹⁾。*CR* は、二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 of Closest Point of Approach) を用い、操縦性能などの船舶特性を考慮した Fuzzy 推論により衝突危険度を評価する。また、その定義は都度修正されているが²²⁾、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。原は、操船シミュレータ実験により操船者の主観的な衝突危険度を調査し、衝突危険度を評価する指標 *SJ* (Subjective Judgement) を提案している²³⁾。この指標は、ある船舶から別の船舶までの距離および相対方位の変化率を変数として用いている。それら変数は、見合い関係を考慮して3段階でファジー表現され、両者の組み合わせにより重み係数を変えて船舶間の衝突危険度を評価する。

ふたつめは、船舶が他の船舶により行動が制約されることによって生じる操船の困難度を評価するものである。長澤らは、避航操船空間閉塞度 *BC* (Blocking Coefficient) を提案している²⁴⁾。これは、変速と変針により、ある船舶が取りうる避航の方法（避航操船空間）に存在する別の他船群との衝突危険度と、変速と変針の避航手段の選好度を表す重み係数を用いて、自身の周囲に存在する船舶との衝突の危険によって閉塞される度合い（避航操船空間閉塞度）を求めるものである。井上らは、環境ストレス *ES* (Envirenment Stress) を提案している²⁵⁾²⁶⁾。これは、ある船舶が他の船舶交通や地形の制約などによって自身の行動が

^{*4} 東京湾湾口～石廊崎沖～伊勢湾湾口～潮岬沖～室戸岬沖～足摺岬沖の各海域を経て瀬戸内海に至る海域

制約されるとき操船者に課される負荷の大きさを評価するものである。なお、他の船舶に対して操船者が感じる危険度および地形の制約により操船者が感じる危険度は、シミュレータ実験およびアンケート調査をもとに設定されている。今津らは、ある船舶の周囲において別の船舶の運動により妨げられる地点を評価する *OZT* (Obstacle Zone by Target) を提案している²⁷⁾²⁸⁾。*OZT* は、他の船舶がその針路および速力で航行してくる際に、自身が針路を変更したとしても両者が同時刻に同じ位置に存在する確率を、速力誤差を考慮して評価するものである。この指標では、*OZT* が発生する条件として、衝突までの時間 *TCPA* と二船間の最接近距離 *DCPA* を設定し、この条件のもとで発生した *OZT* の位置が評価される。

1.3 避航に影響を及ぼす要素

避航に影響を及ぼす要素について考える。遠藤らは、操船シミュレータ実験と実船観測によって避航における昼夜の差の影響を分析し、昼よりも夜の方が余裕を大きくとる避航が行われていることを示している¹⁴⁾。

小林らは、実際に起きた衝突を例に操船シミュレータを用いた事故分析を行い、航路航行義務^{*5}が避航を開始する時機に大きな影響を与えることを示している。その影響に加え、乗船している船舶の操縦性能が避航の行動の結果に大きな影響を与えるとしている¹⁵⁾。また、西村らは、操船シミュレータにより整流化されている交通流と整流化されていない交通流を比較し、船舶の交通流が避航に及ぼす影響を分析した結果、整流化された交通流中を航行している方が避航の開始が遅れることを示し、航行している環境が避航を遅くする場合があることを示している¹⁶⁾。

澁らは、学生と実務経験者を対象としたアンケート調査により、操船方略^{*6}の判断時間と操船方略の適切さについて、経験による相違を分析した結果、経験にしたがって操船方略の判断に要する時間が短くなるとともに適切に判断されることを示している¹⁷⁾。また、伊藤らは、操船シミュレータを用いて単独で航海当直中の見張りに関する行動特性を分析し、経験の浅い航海士は経験の豊富な航海士と比較して、他の船舶等を初認する時機が遅く継続的な監視が不十分であることを示し、結果として衝突のおそれの判断が遅れ、避航までの時間が短くなり危険な状態に陥ることがあることを示している¹⁸⁾。

1.4 本研究の目的および構成

1.1 節で述べたような自律航行船舶が実際に運用されるまでの過程を考えたとき、何らかの予測しない状況が発生した場合でも適切に対応し安全に航行するためには、有人のトラックコントロールのような自律航行機能を持つ船舶を確立することが最初の目標になる。そのような自律航行船舶に人間が乗船し自律航行機能により航行している状況を想定したとき、その船舶は操船者が不安を感じない、言い換えれば操船者と同様の避航

^{*5} 海上交通安全法第4条で、50m以上の船舶は航路（例えば、浦賀水道航路）に沿って航行する義務を有すると定義されている。

^{*6} 他の船舶との衝突を回避する操船が必要な場面に直面した際に、船舶をどのように操船し船舶を安全に導くかを判断すること。

を行うことが重要である。そのためには、船舶間の衝突危険度を適切に評価し、操船者の感覚に合致する時期に避航する必要がある。

ところが、先に示した既往の研究で提案されている衝突危険度を評価する各指標は、そのほとんどがアンケート調査や、操船シミュレータにより港内や湾内を想定して再現した船舶交通が過密な状況における操船者が行った避航やインタビューに基づくものである。そのため、想定した状況以外での評価に適用できるのか、また、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。既往研究の指標のひとつをもとに避航した結果について操船者へインタビューを行ったところ、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おり¹⁹⁾、港内や湾内での過密な状況よりも早く避航を行っていることが示唆されている。

そこで、本研究の目的は、実際の避航に基づく操船者が感じる衝突危険度を客観的かつ定量的に評価する手法を提案することである。この目的のためには避航の実態を把握する必要があるが、時間帯、船舶の交通流および操船者の経験が避航に影響を及ぼすことは明確であり、これらの影響を少なくするため、実験の被験者および実験シナリオを増やして操船シミュレータ実験を行うことは現実的ではない。そのため本研究では、船舶に搭載された船舶自動識別装置（AIS : Automatic Identification System）から発信されたデータ（以下、AIS データと呼ぶ。）を用いて、実際に航行しているときの避航を抽出し統計的に分析する。なお、自律航行船舶の避航は海上衝突予防法の原則（操縦の容易な船舶が操縦の困難な船舶を避航すること、および右側通行）に基づくものであるべきと考え、避航義務船と針路保持船（見合い関係にある二船の呼称で、海上衝突予防法では「避航船」および「保持船」と呼ばれる。）の見合い関係における避航義務船の避航に着目して分析する。

本論文の構成は、以下の通りである。第1章では、船舶間の衝突危険度を評価することの重要性を示し、既往の研究における衝突危険度の評価指標および避航に影響を及ぼす要因を整理して本研究の目的および意義を述べる。第2章では、AIS データから本研究の分析に用いたデータの抽出方法などの事前解析について述べる。さらに、第3章および第4章の概要を簡単に示すとともに、それぞれの章の分析に用いたデータについて述べる。第3章では、操船者が避航を行う際に意識していると考えられる避航義務船と針路保持船の相対距離に着目し、操船者が実際の航行中に行っている避航の特徴について述べる。第4章では、第3章の結果を踏まえて、操船者が避航の際にもうひとつの指標として意識していると思われる方位変化と避航開始時機の相対距離との関係について分析することによって、操船者が感じる衝突危険度の評価方法を検討する。第5章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、本研究の有用性を述べる。

第2章

AIS データの事前解析

2.1 AIS データの概要

AIS データ²⁹⁾は、動的データ、静的データ、航海関連のデータ、航海安全に関するデータの4つに分類され、それぞれは航行状態やデータの特徴により一定の送信間隔で船舶から送信される。動的データは、船舶の現在位置(緯度経度)、速力、針路、進路のなどのデータを含み、表 2.1 に示すように航行速力や回頭角速度の運動状態により送信間隔がさまざまである。静的データは、船舶の識別に必要なデータとして、船名、船種、船長および船幅、目的地などが含まれる。また、AIS データの動的データ、静的データ、航海関連データ、航海安全データは、各船舶の AIS から発信された時刻や船舶固有の識別番号 MMSI を含んでおり、MMSI によってすべてのデータを関連付けることができる。AIS データを利用した研究の例として、船舶の航行実態を調査した研究³⁰⁾³¹⁾³²⁾、操船困難性の評価に関する研究³³⁾³⁴⁾、津波の早期来襲の予測に関する研究³⁵⁾³⁶⁾、漁船による CO2 排出量の推定に関する研究³⁷⁾などがある。

本研究では、AIS データを用いて避航が行われたときの避航義務船および針路保持船の情報を抽出し分析する。

表 2.1 AIS データの送信間隔

船舶の状態	送信間隔
投錨及び係留中で 3knot 以下	3 分毎
投錨及び係留中で 3knot 以上	10 秒毎
0～14knot	10 秒毎
0～14knot(針路変更中)	3 $\frac{1}{3}$ 秒毎
14～23knot	6 秒毎
14～23knot(針路変更中)	2 秒毎
23knot 以上	2 秒毎

表 2.2 ゲートラインの組み合わせ

周防灘		伊豆大島から東京湾に至る海域	
交通流 A	交通流 B	交通流 A	交通流 B
			Gate1-Gate3
			Gate1-Gate5
Gate1-Gate4	Gate2-Gate6	Gate3-Gate6	Gate1-Gate6
			Gate2-Gate4
			Gate3-Gate5

2.2 対象海域と対象期間

AIS データから避航が行われたときの二船の情報を抽出するため、多くの船舶が航行し、かつ、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（図 2.1）と伊豆大島から東京湾に至る北緯 34 度 40.88 分東経 139 度 22.3 分から北緯 35 度 13.25 分東経 140 度 00.0 分で囲まれる海域（図 2.2）を選定した。分析に用いた AIS データの期間は、それぞれ 2013 年 8 月 1 日から 2013 年 8 月 31 日（31 日間）と 2013 年 6 月 1 日から 2013 年 6 月 30 日（30 日間）である。分析する AIS データの期間は、平常時の船舶の航行情報を得られるように、休日や荒天などの影響が少ないと思われる時期とした。なお、図 2.1 および図 2.2 に示す航跡は、それぞれ 2013 年 8 月 1 日と 2013 年 6 月 1 日の AIS データをもとに作成した。

2.3 AIS データからの避航ケースの抽出方法

2.3.1 OD 調査

実際の航行中の避航はその状況がさまざまであり、避航義務船が 1 隻の針路保持船を避航する状況や、避航義務船が複数の針路保持船を避航する状況、さらには交通流のなかで避航義務船にも針路保持船にもなりうる船舶が複数の船舶を避航する状況などがある。本研究では、すべての避航の状況を最も基本的な避航義務船と針路保持船の二船間での避航と捉えて、AIS データから避航が行われたときの二船の情報を抽出した。

まず、OD（Origin and Destination）調査を行い、交通流が交差して避航が発生しやすい見合い関係にある船舶を抽出した。OD 調査は、起点（Origin）と終点（Destination）となるゲートラインと呼ばれる仮想線を主要な交通流上に設定し、起点のゲートラインから終点のゲートラインまでを移動する船舶の流量を調査する手法である。図 2.1 および図 2.2 に示す航跡を考慮して、対象海域の主要な交通流上に複数のゲートライン（図 2.1 および図 2.2 の青色の直線）を設定した。これらのゲートラインのうち、表 2.2 に示すゲートラインの組み合わせからなる 2 本の交通流（交通流 A および交通流 B）を通過する船舶のみを抽出した。

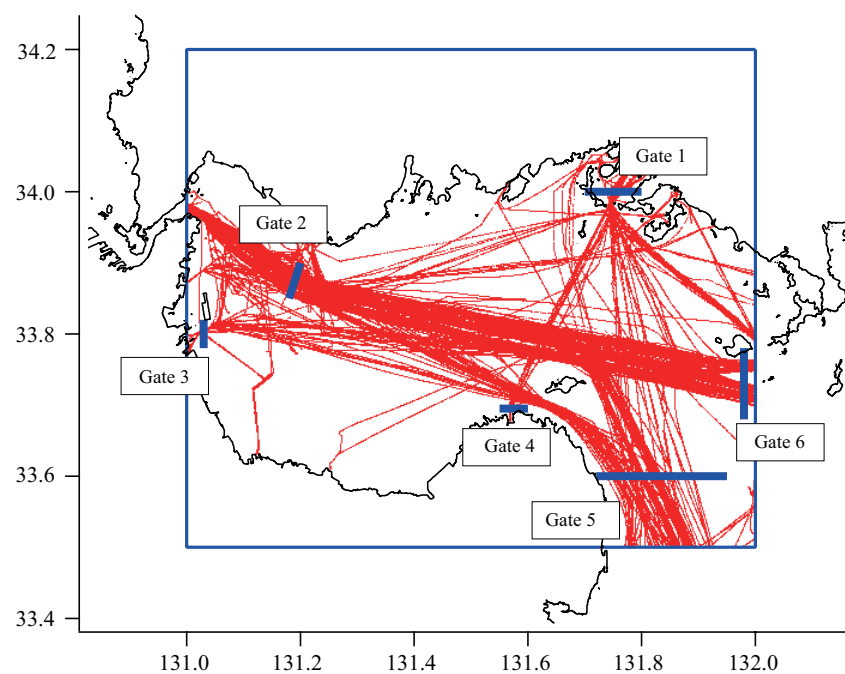


図 2.1 周防灘 (2013.8.1 の AIS データ)

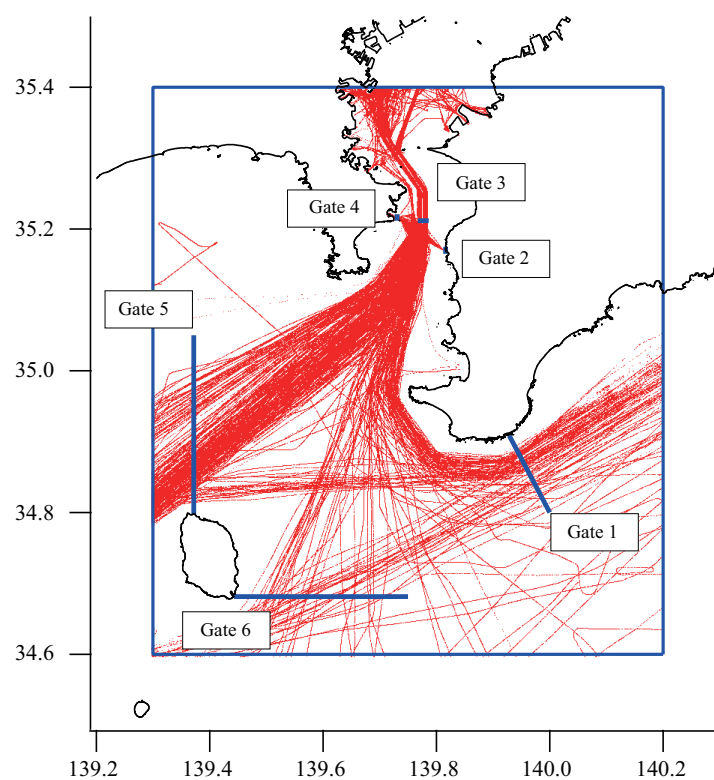


図 2.2 伊豆大島から東京湾に至る海域 (2013.6.1 の AIS データ)

表 2.3 時刻歴データを作成する条件

条件		周防灘	伊豆大島から 東京湾に至る海域
条件 1	相対距離	5 NM (9,260 m) 以内	10 NM (18,520 m) 以内
	<i>TCPA</i>	-	30 分以内
	<i>DCPA</i>	-	2 NM (3,704 m) 以内
条件 2	条件 1 を満たした 時点での見合い関係	横切り	行き会い, 追い越し, 横切りのいずれか

2.3.2 時刻歴データの作成

次に，交差する交通流を航行する船舶の AIS データを 10 秒毎の同期したデータに加工した．具体的には，AIS データを受信したある時刻における針路および速力のまま進んだときの位置を 1 秒毎に外挿して全船舶の情報を同期させた．同期させたデータから，避航義務船と針路保持船の距離（以下，相対距離と呼ぶ．）がある程度接近したとき，具体的には表 2.3 の条件 1 および条件 2 を満たすときのデータを抽出し時刻歴データを作成した．この時刻歴データは，避航義務船と針路保持船のそれぞれの運動状態や相対速度などの相対運動などが含む．

なお，表 2.3 の条件 1 は，避航を開始するより前の情報を含むように海域の広さを考慮して設定した．さらに条件 2 の見合い関係は，条件 1 を満たした時点での二船間の位置関係をもとに決定した．本研究では海上衝突予防法に従う避航として，避航義務船の避航の実態を分析するため，避航義務を有する行き会い，追い越し，横切りの見合い関係を分析対象とした．また，避航義務船と針路保持船の見合い関係において，いずれかの船舶が何らかの変針を行うと見合い関係が変化する場合があるため，ある程度接近した条件 1 を満たしたときの見合い関係をその二船の見合い関係として設定した．

2.3.3 避航の判定と操舵時機の特定

1) 避航の判定

2.3.2 項で作成した時刻歴データをもとに避航が行われたかどうかを判定し，避航が行われたケース（以下，避航ケースと呼ぶ．）と行われなかったケース（以下，非避航ケースと呼ぶ．）に分類した．表 2.4 に，ふたつの海域から抽出したケース数および抽出方法を示す．避航が行われたかの判定は，周防灘のデータについては避航の抽出方法を模索しながら手作業にて行った．具体的には，時刻歴データから避航義務船と針路保持船の航跡や状態量を可視化し，速力，針路，相対航跡，*TCPA*，*DCPA* 等の時間的な変化を総合的に考慮して，何らかの操船を行った直後に *DCPA* がそれまでの値に比べて増加した場合に避航を行ったと判定した．また，その操船を行った時機を避航を開始した時機とした．さらに避航を行ったと判定しなかったものを，避

表 2.4 AIS データから抽出したケース数と抽出方法

	周防灘	伊豆大島から 東京湾に至る海域	合計
避航ケース数	87	2,308	2,395
非避航ケース数	44	4,488	4,532
合計	131	6,796	6,927
避航の判定	手作業で判定	機械的に判定	

航が行われなかったケースに分類した。

手作業による避航が行われたかの判定方法をもとに、機械的に時刻歴データから避航を開始した時機を特定し避航が行われたかどうかの判定し抽出する避航抽出アルゴリズムを作成しプログラム化した³⁸⁾。そのプログラムを使って、伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから避航ケースをおよび非避航ケースを機械的に抽出した。

2) 操舵時機の特定

第1章で述べたように、避航の実態を詳細に分析するため、抽出した避航ケースの一部について避航を開始したときや終了したときなどの操船を行った時機を特定した。

まず、操船者が感じる衝突危険度と避航とを関連付けて避航の一連の行動を整理する。一般的に、避航義務船の操船者は、自身から見た針路保持船を望むコンパス方位の変化量（以下、方位変化と呼ぶ。）に変化がないときは衝突のおそれがあると判断し避航を行う。避航を開始する時機は、周囲の船舶の混雑の程度や航海計画などさまざまな要素を考慮した上で決定されるが、船舶の操縦性能を考慮すると一定以上の距離を保ちながら通過するには、相対距離が一定以上離れている状態で避航を開始する必要がある。避航中は相対距離を一定以上保ちながら航行し、避航義務船と針路保持船の関係が安全になったと判断した後、計画航路からの逸脱の程度を考慮し避航を終了して元の計画航路に戻るもしくは次の変針点に向かう。

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大きく変化するときと相当し、その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、避航を開始するときは、操船者にとって望ましくない衝突危険度になったときと相当すると考える。そこで、2.3.3 項 1) で抽出した避航ケースについて、避航の一連の行動を以下のように分類し²¹⁾、それぞれの行動に移る時機（操舵時機）を手作業で特定する。

- (a) 通常航行（避航前）：避航開始前の計画航路に従った行動
- (b) 避航：相手船を回避する行動

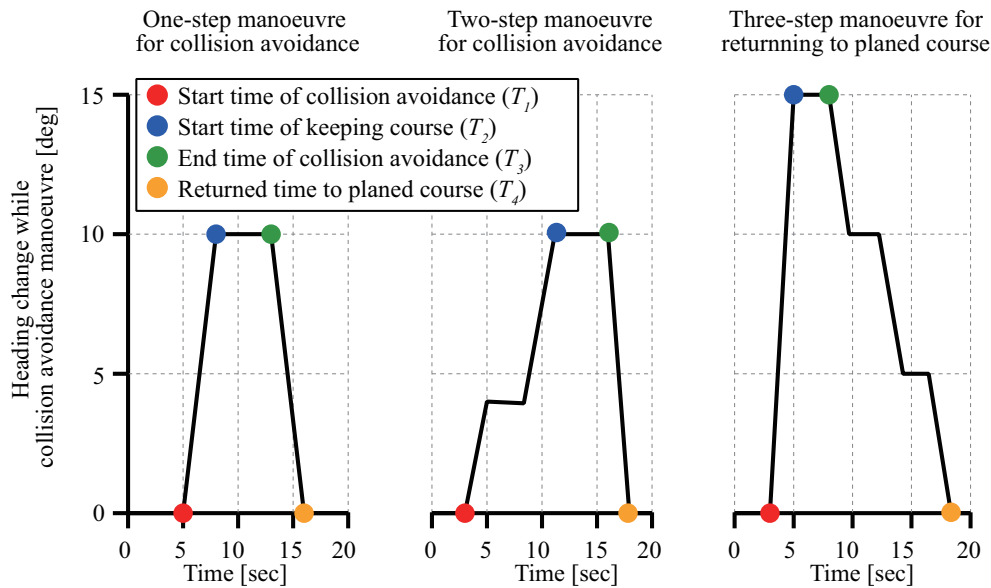


図 2.3 避航における典型的な船首方位の変化

(c) 復帰操船：元の計画航路に戻るもしくは次の変針点に向かう行動

(d) 通常航行（避航後）：復帰操船後の行動

次に、操舵時機を特定する方法について述べる。避航の行動は、図 2.3 のようにパルス状またはステップ状の針路変化として現れる³⁹⁾ことから、図 2.3 に示す 4 個の操舵時機を特定する。

避航開始時機 (T_1)：通常航行から避航に移る操舵を行う時機

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う時機

避航終了時機 (T_3)：避航から復帰操船に移る操舵を行う時機

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う時機

これらの操舵時機について、図 2.3 の船首方位の変化を例に具体的に示す。避航前の通常航行中の船首方位の変化は、一定の針路で航行しているならば船首方位の変化はゼロであり、パルス状またはステップ上の山よりの前の部分に現れる。次に、避航中と復帰操船中の船首方位の変化は、図 2.3 のパルス状またはステップ上の山の部分に現れる。最後に、避航後の通常航行中の船首方位の変化は、図 2.3 のパルス状またはステップ上の山より後の部分に現れる。

これらの避航の一連の行動と船首方位の変化を考慮すると、避航開始時機 (T_1) は図 2.3 のパルス状またはステップ上の山が立ち上がる点に相当し、パルス状の山またはステップ上の山から降りた点が復帰終了時機 (T_4) に相当する。ところで、海上衝突予防法の第 8 条第 4 項では「船舶は、他の船舶との衝突を避けるための動作をとる場合は、他の船舶との間に安全な距離を保つて通過することができるようその動作をとらなければならない。この場合において、船舶は、その動作の効果を当該他の

表 2.5 操舵時機を特定したケース数

	周防灘	伊豆大島から 東京湾に至る海域	合計
操舵時機を特定したケース	58	141	199
抽出した避航ケース	(87)	(2,308)	(2,395)

船舶が通過して十分に遠ざかるまで慎重に確かめなければならない。」としている。また、図 2.3 の中央の図のように変針角が増加する避航は、操船者の最初の判断が不十分であったか、または相手船の変針などが起こったため判断を修正する事態が生じたことを示すと考えられる³⁹⁾。すなわち、パルス状の山またはステップ上の最大の山は操船者の判断が十分であった結果と言え、変針角保持時機 (T_2) はその山の始点に相当する点である。またその変針角保持時機 (T_2) の行動には、変針角を保持したその時の針路で他の船舶との間に安全な距離を保つことができると判断した操船者の意図を含んでいると考える。最後に、避航終了時機 (T_3) は、パルス状の山またはステップ上の山の終点に相当する。

表 2.5 に、操舵時機を特定したケース数を示す。下段の () 内の数字は、表 2.4 に示す AIS データから抽出した避航ケースの総数である。

3) 操舵時機における方位変化

操舵時機を特定した避航ケースについて、それぞれの操舵時機における二船の状態量を求めた。本研究では、避航に伴う操舵時機での二船の状態量、具体的には操船者が避航の際に意識していると考えられる方位変化と相対距離、に着目して避航と衝突危険度との関係を明らかにすることを試みる。しかし実際の避航中の方位変化は一定ではなく変針などによって大きく変動していると考えられることから、本研究では4個の操舵時機 T_n における方位変化 θ'_n [deg/sec] を (2.2) 式で定義し平均化する。

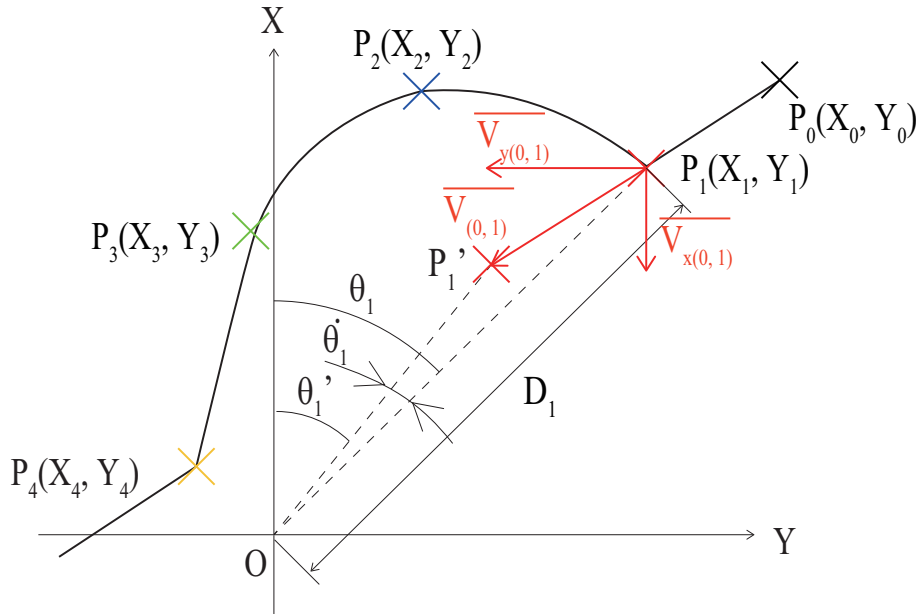
操舵時機 (T_n) における針路保持船の相対位置を点 P_n 、そのときの相対方位を θ_n [deg]、避航に伴うひとつ前の操舵時機 (T_{n-1}) での針路保持船の相対位置を点 P_{n-1} とする。点 P_{n-1} から点 P_n への移動するときの平均相対速度を $\overline{V_{(n-1,n)}}$ [m/sec] とすると、点 P_n から Δt [sec] 後の P'_n を望む相対方位は、

$$\theta'_n = \tan^{-1} \frac{Y_n + \overline{V_{y(n-1,n)}} \cdot \Delta t}{X_n + \overline{V_{x(n-1,n)}} \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (2.1)$$

で表され、点 P_n から点 P_{n-1} の単位時間あたりの方位変化は、

$$\dot{\theta}_n = \left| \frac{(\theta'_n - \theta_n)}{\Delta t} \right| \dots\dots\dots (2.2)$$

となる。ここで、船上での操船において、一般的に方位変化は1分あたりの変化量を使用しているため、本研究では (2.1) 式および (2.2) 式の Δt を 60 秒とする。具体例

図 2.4 保持船の相対航跡と避航開始時機 (T_1) における方位変化

として、避航開始時機 (T_1) における方位変化 (θ_1) を図示したものを図 2.4 に示す。図 2.4 は、避航義務船を原点とし船首方向を縦軸上向きとした相対座標系（以下、相対座標系と呼ぶ。）に針路保持船の相対航跡と避航に伴う操舵時機での針路保持船の相対位置を示す。本研究における方位変化は、避航開始時機 (T_1) を除くある操舵時機 (T_n) とその 1 つ前の操舵時機 (T_{n-1}) との間における、避航義務船に対する針路保持船の平均相対速度 $\overline{V_{(n-1,n)}}$ [m/sec] のまま、ある操舵時機 T_n の針路保持船の相対位置 $P_n(X_n, Y_n)$ [m] から dt [sec] 移動したと仮定したときの相対方位 θ_n [deg] と、ある操舵時機 T_n での相対方位 θ_n [deg] の単位時間当たりの差分の絶対値とする。また、操舵時機 T_n の相対距離を D_n [m] とする。なお、避航開始時機 (T_1) における方位変化は、その直前の針路変化がほぼ定常な状態で航行している始点の時機を便宜上 T_0 として、 T_0 から T_1 間の平均相対速度により求めた。

2.4 本研究の分析に用いたケース

本研究での分析は大きくふたつに分類できる。まず、第 3 章では避航義務船と針路保持船との相対距離に着目し、避航操船が行われるときの二船間の距離を明らかにするための分析を行った。次に、第 4 章では、操船者が避航を行う際に意識していると思われる方位変化と相対距離のふたつの指標の関係に着目して操船者が感じる衝突危険度を定量的に評価する方法を検討した。

ここでは、各章の概要を示すとともに、それぞれの分析に用いたケースについて述べる。

2.4.1 第3章の分析に用いたケース

1) 概要

第3章では、避航ケースと非避航ケースを比較、分析することにより避航が行われるときの相対距離の特徴を明らかにする。まず、周防灘のAISデータから抽出したケースを用いて、避航をするかしないかの判断をしていると思われる相対距離の特徴を分析した。次に、伊豆大島から東京湾に至る海域のAISデータから抽出したケースを用いて、その一般的な相対距離を分析した。さらに、その相対距離と避航に伴う操舵時機との関係から、操船者が感じる衝突危険度が大きく変化すると推察される時機を明らかにした。それぞれの分析に用いたケースの詳細を示す。

2) 周防灘のAISデータから抽出したケース

表2.4に示した周防灘のAISデータから抽出した131ケースについて、避航の有無別や避航の状況別での内訳を図2.5に示す。さらに、そのうちの避航ケース87ケース（図2.5 Situation(A)）について、避航義務船の船長構成を図2.6に示す。周防灘では東西に推薦航路^{*1}が設定されており、法的な強制力はないが南北に航行する船舶が東西に航行する船舶を協力的に避航していることが観測された。一方で、避航義務船が複数の船舶と見合い関係が生じた状況下において、避航義務船が先行する針路保持船を避航してもとの針路に戻した後に、避航義務船がその針路を変えないまま後続する針路保持船を通過する状況が観測された。これを、避航義務船が避航を行わなかったケース（非避航ケース）に分類した。

図2.6が示すように、87の避航ケースのうち75ケース（図2.5 Situation(B)）はA丸という1隻の船舶が避航を行っていたケースである。このA丸は、図2.1に示すGate1とGate4を南北に航行する船舶であった。またこのA丸は、同じ操船者もしくは数人の操船者が操船するため避航開始時機や操船方法は類似すると考えられることから、横切りの見合いにおける一般的な特徴を解析することは難しいと考える。そこで、A丸に限定した避航ケースおよび非避航ケースを比較、分析することで避航のおおよそその特徴を捉えることとした。ここで、A丸は、分析に用いた75ケースにおいてはすべて避航義務船の立場であることから、以下、固有の名称ではなく見合い関係二船の呼称として避航義務船と称する。

図2.7は避航義務船が避航を行った75ケースについて、相対座標系に避航開始時機（ T_1 ）での針路保持船の相対位置および相対速度ベクトルを示したものである。各矢印の始点の円の直径は、針路保持船のおおよその船長を示している。また、原点を中心とした赤円は避航義務船からの距離3.0 NM (5,556 m)を示す。

図2.7に示すように避航義務船が避航を開始したとき（避航開始時機（ T_1 ））の相対距離が3.0 NM未満であったものが多く、その数は58ケース（図2.5 Situation(C)）であった。残りの避航ケース、つまり避航義務船が避航を開始したときの相対距離が

^{*1} 推薦航路⁴⁰⁾⁴¹⁾とは、「地形、海潮流その他の自然的条件のみを考慮のうえ航海の安全のために、水路図誌発行者が推薦した航路」であり、法的な強制力を持たず、海上衝突予防法に従って航行することが求められる

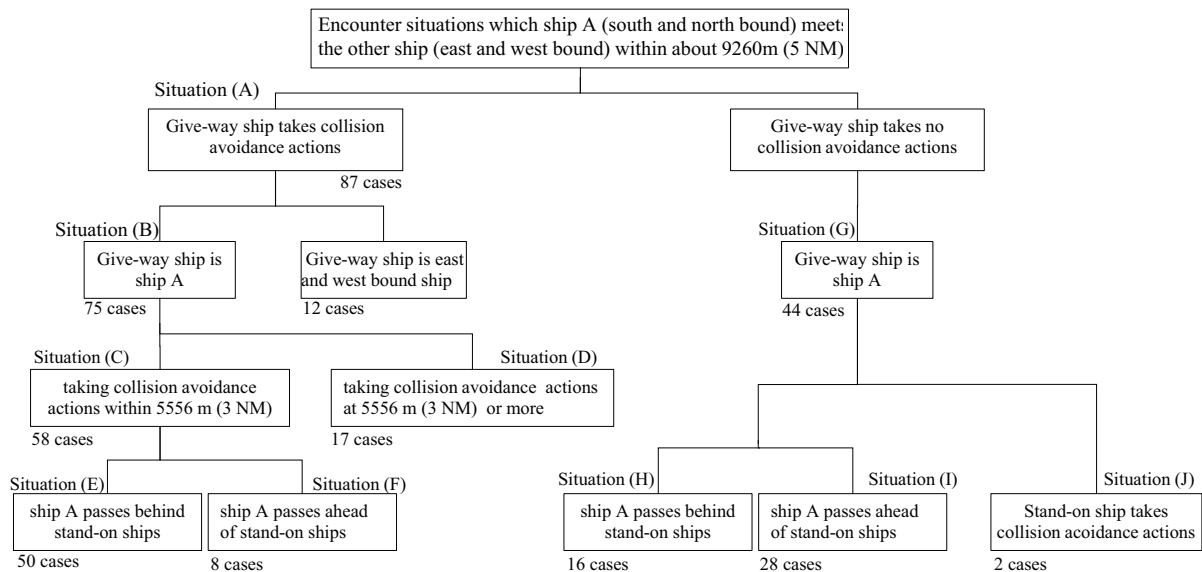


図 2.5 周防灘における避航ケースの分類

3.0 NM 以遠であった 17 ケース（図 2.5 Situation(D)）の状況を詳しく見ると，複数の船舶が連続して接近してきたため，1 回の変針で複数の船舶をまとめて避航したケースや，複数回の変針により連続して避航を行ったケースであった．前者の場合は，まず避航義務船から近い位置にいる先行船を対象に避航したまま後続船を対象に避航を継続としたと考えられる．また，後者の場合は，複数の船舶の合間を避航義務船が避航しながら航行していることから，全体の流れを考慮して避航を行った結果と考えられる．つまり避航義務船が避航を開始したときの相対距離が 3.0 NM 以遠のケースは，他の船舶との関係を考慮した操船の結果であるため，ここでは 1 隻の針路保持船を対象に避航したと思われる避航開始時機（ T_1 ）の相対距離が 3.0 NM 未満の避航ケースを対象に分析する．なお，分析対象である 58 ケースすべては，避航義務船が変針のみにより避航したケースであり大幅な減速による避航は確認できなかった．また，それらの 58 ケースすべてにおいて針路保持船は避航せず，その針路および速力を保持して航行していた．

第 3 章での分析に用いる 58 の避航ケースと 44 の非避航ケース（図 2.5 Situation(G)）について，針路保持船の船長構成を図 2.8 に示す．避航ケースは，さらに避航義務船が針路保持船の後方を通過した 50 ケース（図 2.5 Situation(E)）と，前方を通過した 8 ケース（図 2.5 Situation(F)）にわけることができる．図 2.8 に示すように，避航ケースおよび非避航ケースともに，針路保持船の船長が不明であったケースが 1 ケースずつあったが，両者ともさまざまな針路保持船の船長で構成されていることがわかる．

さらに，避航ケースについては，避航に伴う操舵時機（ T_1 から T_4 ）を特定し第 4 章の解析にも用いた．

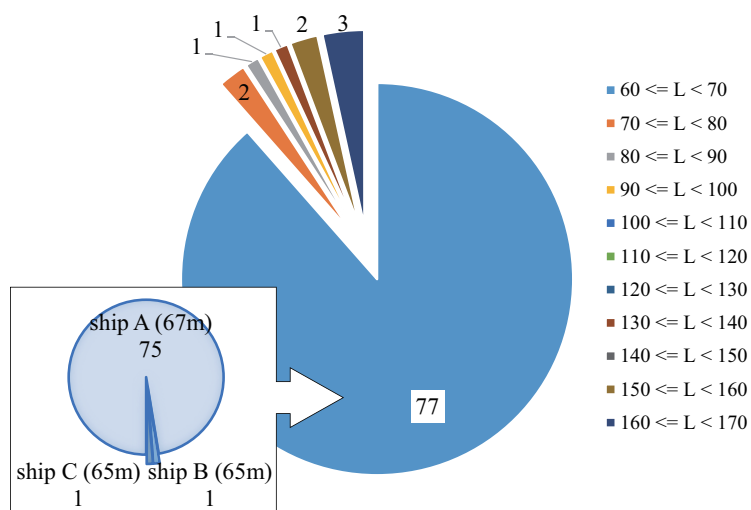
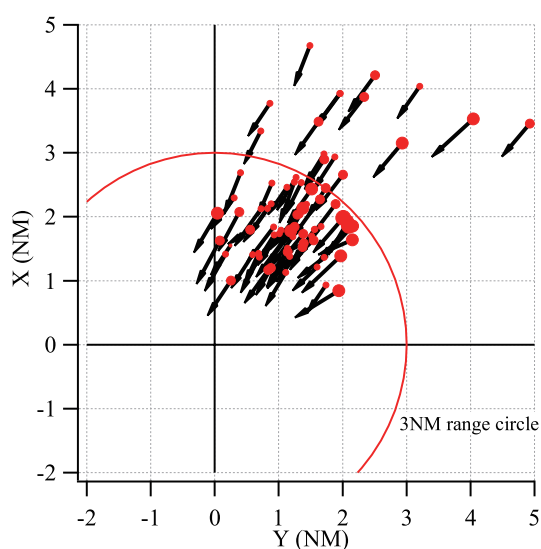
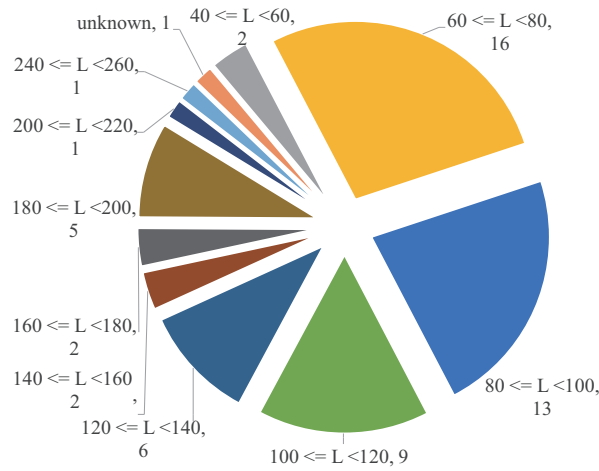


図 2.6 避航義務船の船長の構成

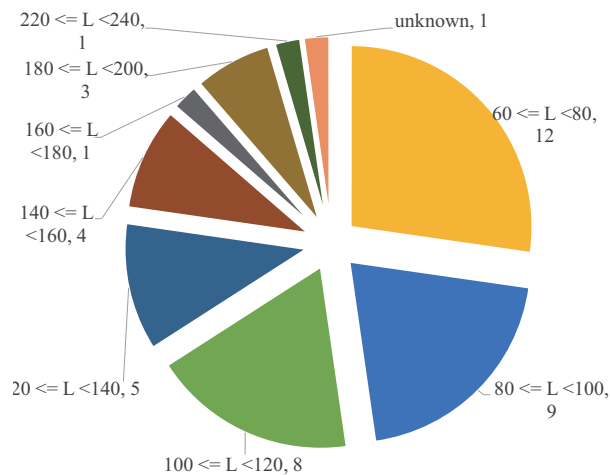
図 2.7 避航開始時機 (T_1) における保持船の相対位置と相対速度ベクトル

3) 伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽出したケース

表 2.4 に示した伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから機械的に抽出した 6,796 ケース（避航ケース 2,308 ケースと非避航ケース 4,488 ケース）について、表 2.6 に避航の有無別と見合い関係別での内訳を示す。これらのケース数は避航義務船および針路保持船の船長が特定できたケースであり、いずれかの船舶の船長が不明であったケースは除外している。



(a) 避航ケース 58 ケース (図 2.5 Situation(C))



(b) 非避航ケース 44 ケース (図 2.5 Situation(G))

図 2.8 針路保持船の船長の構成

表 2.6 のうち, Gate3-6 と Gate1-5 を通過した二船が横切りの見合い関係にあったケース (避航義務船が避航した 218 ケースと避航義務船が避航しなかった 469 ケース) を例に, 図 2.9 に避航義務船と針路保持船の船長の組み合わせを示す. 横軸は避航義務船の船長, 縦軸は針路保持船の船長を示し, ○印は避航義務船が避航したケース, +印は避航義務船が避航しなかったケースである. また, 避航義務船が避航した 218 ケースと避航義務船が避航しなかった 469 ケースの両方を合わせた 687 ケースについて, 図 2.10 に避航義務船と針路保持船の船種の組み合わせを示す. 横軸は避航義務船の船種, 右側の軸は針路保持船の船種, 高さ方向はケース数である. AIS データの船種は, コンテナ船やバルカーなどの区別はなくまとめて貨物船に分類されるため, 他の船種と比較して船種が貨物船であるケースが極めて多いが, 抽出した避航義

表 2.6 伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽出したケース数

ゲートラインの組 交通流 A & 交通流 B	避航義務船が避航する			避航義務船が避航しない		
	行会い	追い越し	横切り	行会い	追い越し	横切り
Gate3-6 & Gate1-3	104	43	414	221	66	729
Gate3-6 & Gate1-5	31	29	218	85	57	469
Gate3-6 & Gate1-6	30	29	119	86	49	348
Gate3-6 & Gate2-4	29	29	232	84	49	421
Gate3-6 & Gate3-5	63	59	879	125	92	1,607
小計	257	189	1,862	601	313	3,574
合計		2,308			4,488	

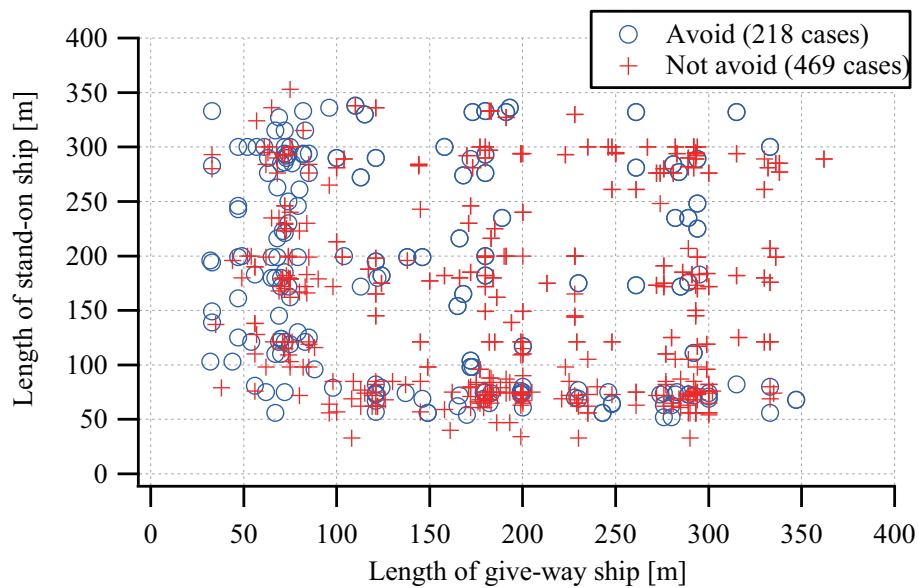


図 2.9 避航義務船と針路保持船の船長の組み合わせ

務船と針路保持船はさまざまな船種の組み合わせで構成されていることが確認できる。ここでは、ゲートライン Gate3-6 と Gate1-5 を通過した横切り関係にあったケースのみ示したが、他のゲートラインの組み合わせおよび見合い関係についても同様に、抽出したケースの避航義務船と針路保持船はさまざまな船長および船種の二船の組み合わせで構成される。

さらに、表 2.6 の避航ケースから無作為に 141 ケースを抽出し、避航に伴う操舵時機 (T_1 から T_4) を特定して第 4 章の解析に用いた。表 2.5 に示す避航ケースは、この避航に伴う操舵時機 (T_1 から T_4) を特定したケースに相当する。

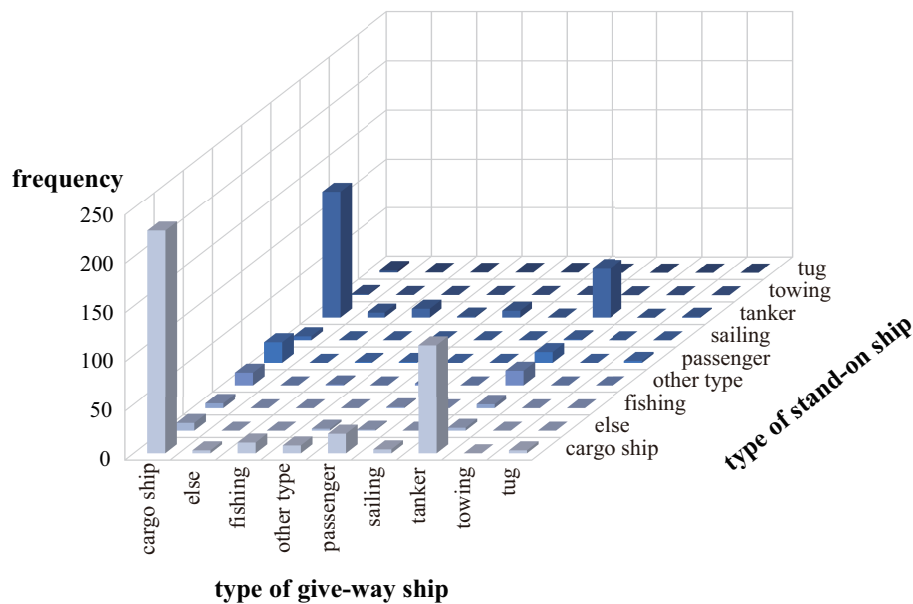


図 2.10 避航義務船と針路保持船の船種の組み合わせ

2.4.2 第4章の分析に用いたケース

第4章では、避航ケースのうち操舵時機を特定したケースを分析し、避航義務船と針路保持船の衝突危険度を定量的に評価する方法を検討する。分析に用いたケースの詳細を示す。

表 2.5 に示す周防灘の AIS データから抽出した 58 の避航ケースと、伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽出した 141 の避航ケースの合計 199 ケースを用いた。図 2.11 および図 2.12 に、199 の避航ケースの避航義務船と針路保持船の船長の構成を示す。

避航義務船の船長は図 2.11 が示すように、60 m 以上 80 m 未満が 94 ケースと最も多く、次いで 280 m 以上 300 m 未満が 20 ケース、80 m 以上 100 m 未満がおよび 100 m 以上 120 m 未満がともに 12 ケースである。針路保持船の船長は図 2.12 が示すように、60 m 以上 80 m 未満が 35 ケースと最も多く、次いで 80 m 以上 100 m 未満が 21 ケース、100 m 以上 120 m 未満および 180 m 以上 200 m 未満がともに 19 ケースであり、避航義務船の船長の構成よりも分散している。なお、199 ケースのうち、避航手段として変針と減速の両方が確認されたケースがいくつかあった。変針および減速の影響はともに避航に伴う操舵時機における方位変化や相対距離に含まれることから、第4章の分析では変針および減速による避航の結果を反映していると考えられる。

ところで、上述したように 60 m 以上 80 m 未満のうち 58 ケースは、周防灘の AIS データから抽出した特定の船舶が避航義務船であったケースであり、その割合は全体の約 30% を占めている。この影響について検証するため、図 2.13 に避航開始時機 (T_1) についての方位変化と相対距離の関係を対象海域別にわけて示す。図 2.13 が示すように、周防灘の AIS データから抽出したケースの相対距離は、伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽

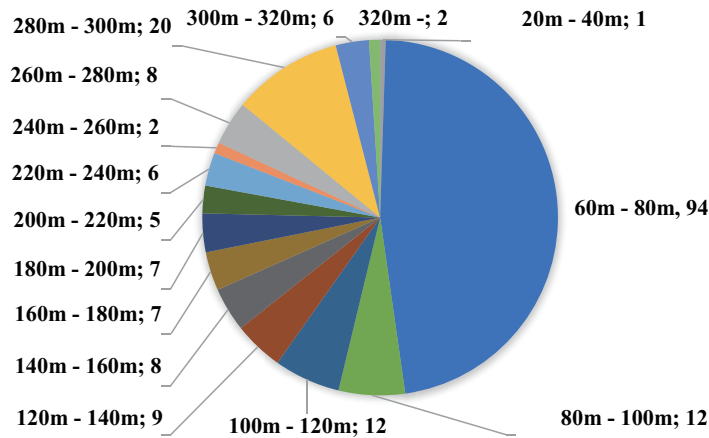


図 2.11 避航義務船の船長

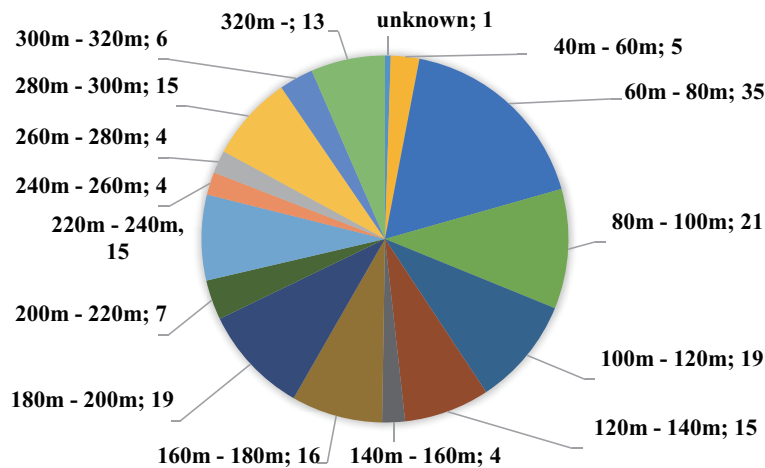
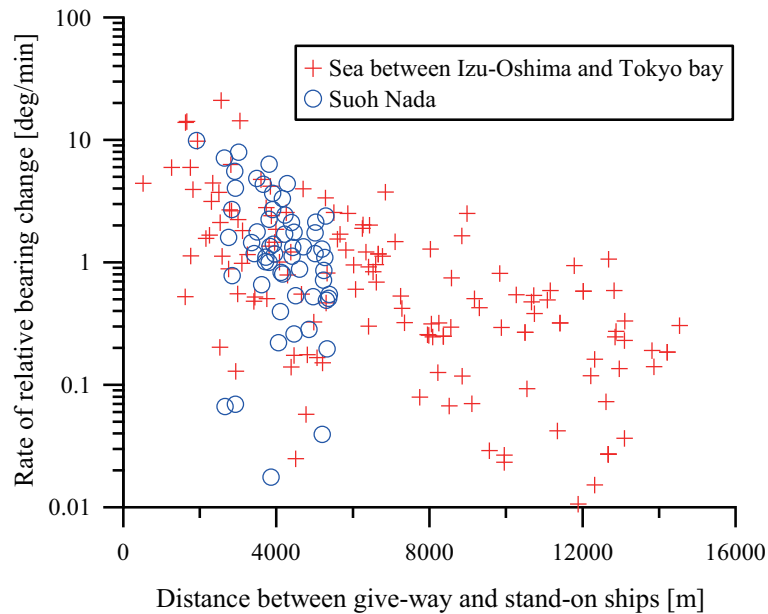


図 2.12 針路保持船の船長

出したケースに比べて限られた範囲に分布している。しかし，方位変化と相対距離の平面上では，伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽出したケースが分布している中に，周防灘の AIS データから抽出したケースのほとんどが分布している。そのため，第4章で着目する方位変化と相対距離の関係においては，特定の避航義務船が避航ケースの約30%を占めるというケースの偏りが分析結果に与える影響は少ないと考える。なお，図2.13の横軸は相対距離，縦軸は方位変化の対数表示である。

2.5 結論

本研究の分析に用いた避航ケースと非避航ケースの抽出方法および避航に伴う操舵時機 (T_1 : 避航開始時機, T_2 : 変針角保持時機, T_3 : 避航終了時機, T_4 : 復帰終了時機) を特定する方法などの事前解析の方法を述べた。AIS データから避航ケースと非避航ケースを抽出

図 2.13 抽出した海域別の避航開始時機 (T_1) の比較

する手順は以下のとおりである。

1. 海域に複数の仮想ゲートを設定してOD調査を行い、交通流が交差して避航が発生しやすい見合い関係にある船舶をAISデータから抽出した。
2. 交差する交通流を航行する船舶のAIS情報から、10秒毎の同期した情報に加工した。
3. 同期した情報をもとに、ある程度接近した見合い関係にある避航義務船と針路保持船の二船を抽出し時刻歴データを作成した。
4. 時刻歴データをもとに避航が行われたかどうかを判定し、避航ケースおよび非避航ケースを分類した。

また、本研究の分析に用いたケースについて示した。分析に用いたケースは以下に分類できる。

- 周防灘のAISデータから抽出した58の避航ケースおよび44の非避航ケース（第3章の分析に使用）
- 伊豆大島から東京湾に至る海域のAISデータから抽出した2,308の避航ケースおよび4,488の非避航ケース（第3章の分析に使用）
- 周防灘および伊豆大島から東京湾に至る海域のAISデータから抽出した避航ケースのうち、操舵時機を特定した199のケース（第4章の分析に使用）

第3章

避航操船の特徴

3.1 緒言

操船者が感じる衝突危険度の評価方法を検討する前に、まず、操船者が実際の航行中に行っている避航の特徴を把握する。2.4節で述べたように、避航義務船の操船者は、針路保持船からの距離を一定以上保ちながら航行していると考えられる。そこで、第3章では、実際の航行中での避航の特徴を分析するため、操船者が避航を行う際に意識していると考えられる避航義務船と針路保持船の相対距離に着目して分析する。

3.2 避航と相対距離の関係

3.2.1 避航と最小離隔距離の関係

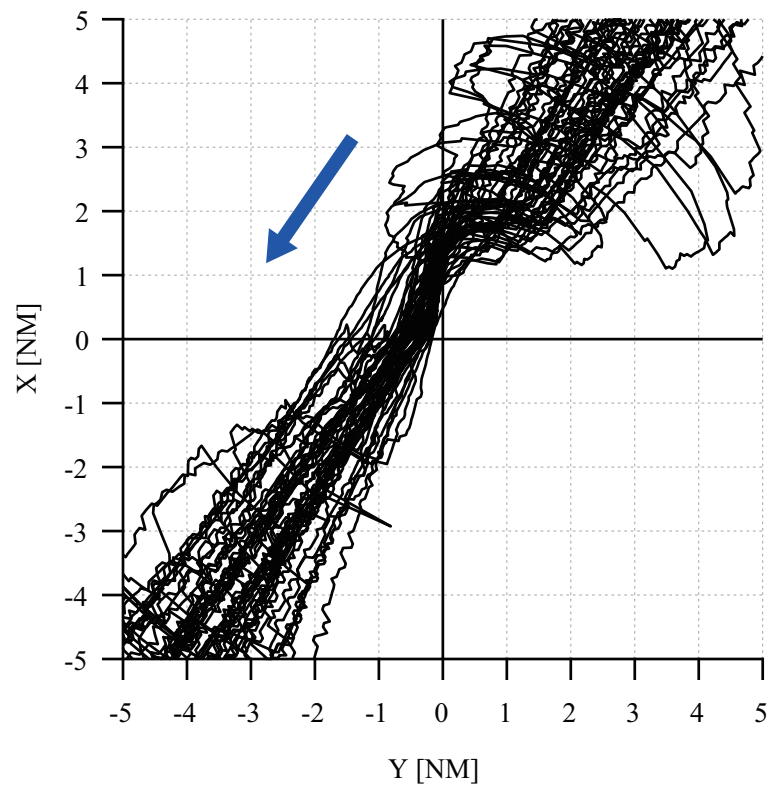
1) 最小離隔距離の定義

図3.1は、避航ケースそれぞれの避航義務船に対する針路保持船の相対航跡（以下、相対航跡）を相対座標系に重畳したものである。図3.1(a)は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース、(b)は針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースであり、それぞれのケース数は50ケースと8ケースである。なお、図3.1に示す矢印は、針路保持船のおおよその相対的な進行方向を示している。

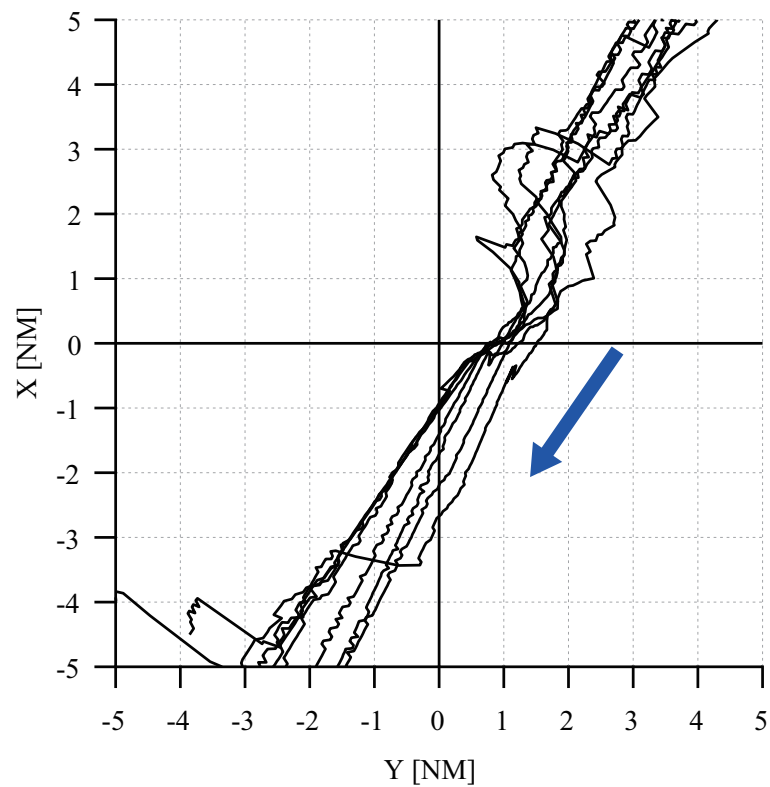
まず、避航義務船と針路保持船の二船が最も接近したときの相対距離（以下、最小離隔距離と呼ぶ。）を分析する。この最小離隔距離は、図3.1および後述する図3.3において、原点すなわち避航義務船からそれぞれの相対航跡上の点を接点に持つ円が最小となるときの距離に相当する。

2) 避航を行うときの最小離隔距離

図3.2に、58ケースについての最小離隔距離と針路保持船の船長との関係を示す。図3.2の横軸は針路保持船の船長、縦軸は最小離隔距離である。また、針路保持船が避航義務船の前後のどちらを通過したかで分類し、○印は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース、△印は避航義務船の後方を通過したケースである。また、針路保持船の船長が不明であったケースが1つあったが、そのケースの針路保持船の船長は0として最小離隔距離を示している。



(a) 針路保持船が避航義務船の前方を通過 (50 ケース)



(b) 針路保持船が避航義務船の後方を通過 (8 ケース)

図 3.1 避航ケースにおける針路保持船の相対航跡

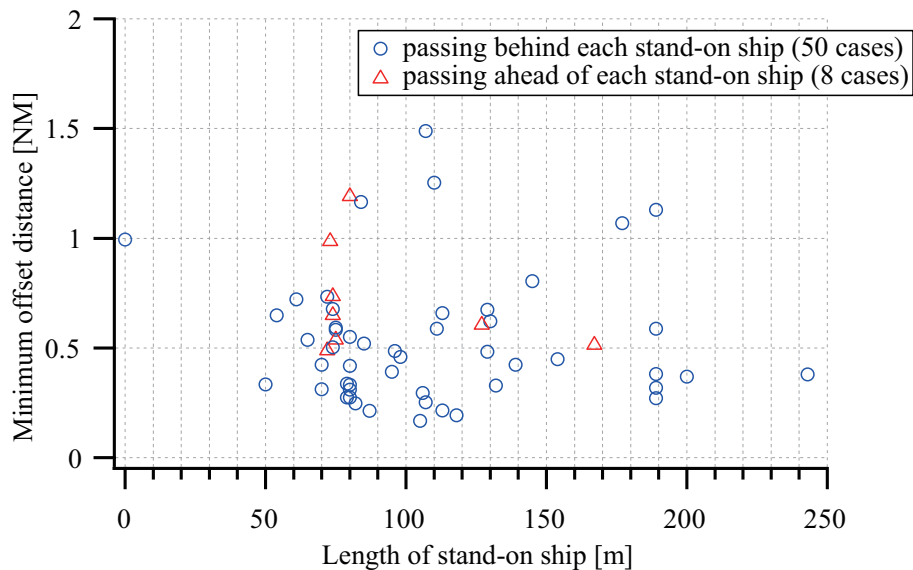


図 3.2 避航ケースにおける最小離隔距離と針路保持船の船長

ほとんどのケース（47 ケース（81.0%））の最小離隔距離は、370 m 以上 1482 m 未満（0.2 NM 以上 0.8 NM 未満）に分布している。最小離隔距離が 0.8 NM 以上であった 9 ケースについて、そのときの避航義務船と針路保持船の状況を確認したところ、ふたつに大別することができた。

ひとつめは、避航義務船が針路保持船を避航しているときに、その針路保持船の後方から別の船舶（この船舶も避航義務船との見合い関係において、針路保持船となる）が接近してきたため、避航義務船はその針路を保ったまま後続の針路保持船を主たる対象として避航を続けた結果、先行する針路保持船に対する最小離隔距離が大きくなった状況であった。ふたつめは、避航による変針と目的地に向かうための変針が一致しているケースであった。このケースでは、針路変更のための変針角が避航の変針角よりも大きいため、前者を目的とした変針で避航の目的も同時に果たせることから、結果として最小離隔距離が大きくなった状況であった。

つづけて、最小離隔距離の最小値について、針路保持船が避航義務船を通過したときの状況別にみる。図 3.2 の○印が示す針路保持船が避航義務船の前方を通過した 50 ケースでは、最も接近したケースの最小離隔距離は約 310 m（約 0.17 NM）であり、そのケースでの針路保持船の船長は 105m であった。また、図 3.2 の△印が示す針路保持船が避航義務船の後方を通過した 8 ケースでは、最も接近したケースの最小離隔距離は約 900 m（約 0.49 NM）であり、そのケースでの針路保持船の船長は 72m であった。

3) 避航を行わないときの最小離隔距離

避航ケースと同様に、避航義務船が避航を行わなかったケースでの最小離隔距離を分析する。図 3.3 に相対座標系に非避航ケースそれぞれの相対航跡を重畳して示す。図 3.3 (a) は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース、(b) は針路保持船

が避航義務船の後方を通過したケースであり、それぞれのケース数は16ケースと28ケースである。図3.3に示す矢印は、針路保持船のおおよその相対的な進行方向を示している。

図3.4は、44ケースでの最小離隔距離と針路保持船の船長との関係を示す。図3.4の横軸は針路保持船の船長、縦軸は最小離隔距離であり、針路保持船が避航義務船の前後のどちらを通過したかを分類し、○印は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース、△印は避航義務船の後方を通過したケースである。また、針路保持船の船長が不明であったものが1ケースあったが、そのケースの針路保持船の船長は0としたときの最小離隔距離を示している。

図3.4の○印が示す針路保持船が避航義務船の前方を通過した16ケースでは、最も接近したケースの最小離隔距離は約760 m (約0.41 NM) 以上であり、そのケースでの針路保持船の船長は64 mであった。また、図3.4の△印が示す針路保持船が避航義務船の後方を通過した28ケースでは、最も接近したケースの最小離隔距離は約780 m (約0.42 NM) 以上であり、そのケースでの針路保持船の船長は89 mであった。

4) 避航により確保する最小離隔距離

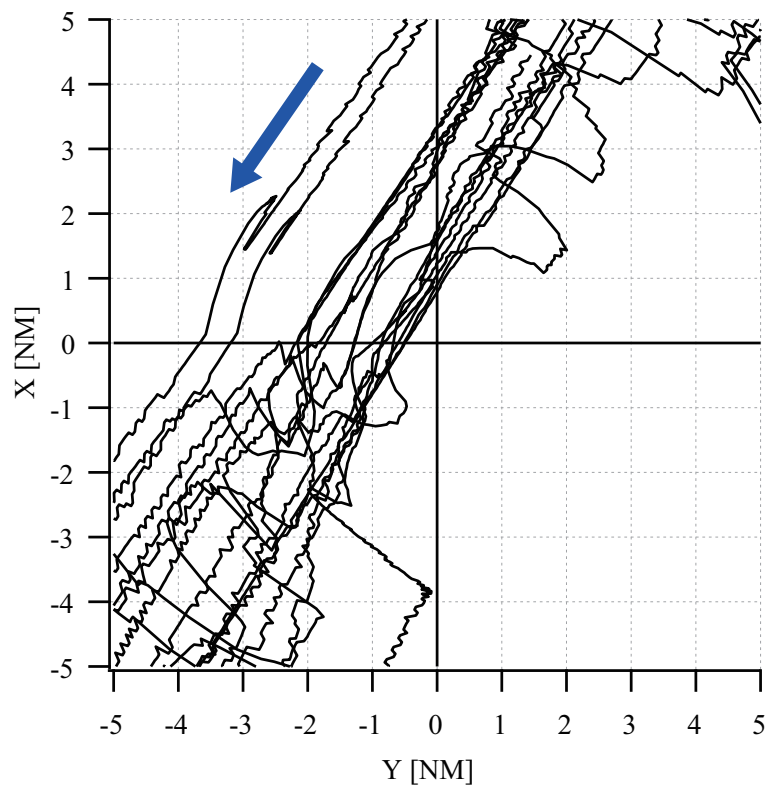
避航義務船が避航を行うときに確保している最小離隔距離について検討する。表3.1に、避航ケースと非避航ケースそれぞれにおいて二船が最も接近したケースの最小離隔距離を示す。表3.1中の状況区別の前方もしくは後方は、針路保持船が避航義務船の前方もしくは後方を通過したケースを意味する。

ここで、非避航ケースは、針路保持船との相対距離が十分であったため避航義務船が避航しなかったと仮定すると、表3.1の針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースについて見ると、非避航ケースの最小離隔距離は避航ケースのそれよりも大きいことから、その仮定は成立し避航義務船は310 m (約0.17 NM) 以上を保って航行していると考えられる。

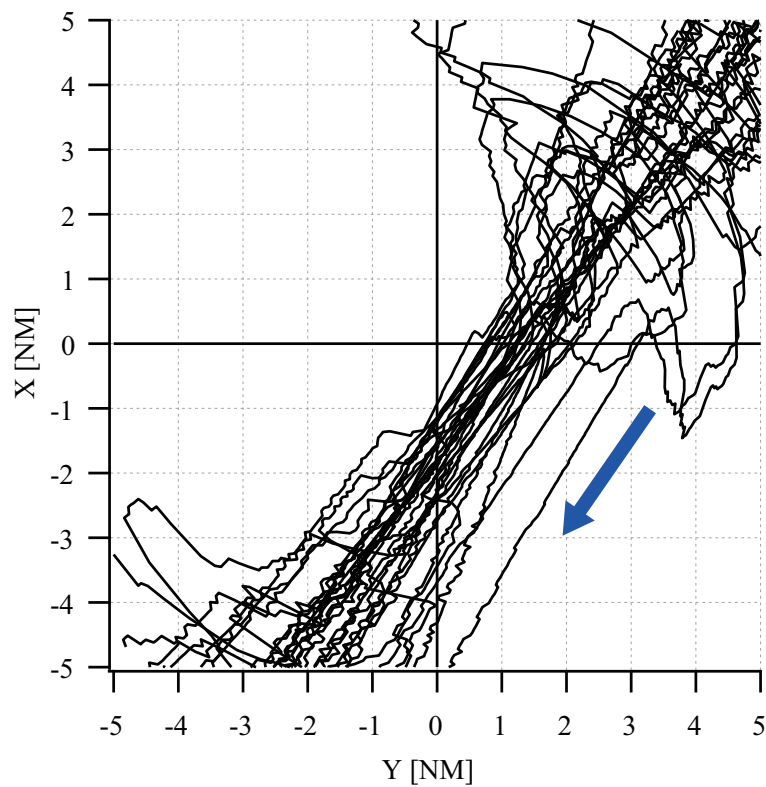
次に、針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースについてみると、避航ケースの最小離隔距離の方が、非避航ケースのものよりも大きく、前述の仮定が成り立たない。そこで針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースについて、約780 m (約0.42 NM) と約900 m (約0.49 NM) のどちらが避航を行うときに確保する最小離隔距離の閾値となりうるかについて考える。避航義務船の操船者にかかるストレスがより高い状況は、針路保持船が避航義務船の後方を通過するよりも避航義務船の前

表 3.1 最小離隔距離の比較

状況	最小離隔距離 [m]	
区別	避航ケース	非避航ケース
前方	310	760
後方	900	780



(a) 針路保持船が避航義務船の前方を通過 (16 ケース)



(b) 針路保持船が避航義務船の後方を通過 (28 ケース)

図 3.3 非避航ケースにおける針路保持船の相対航跡

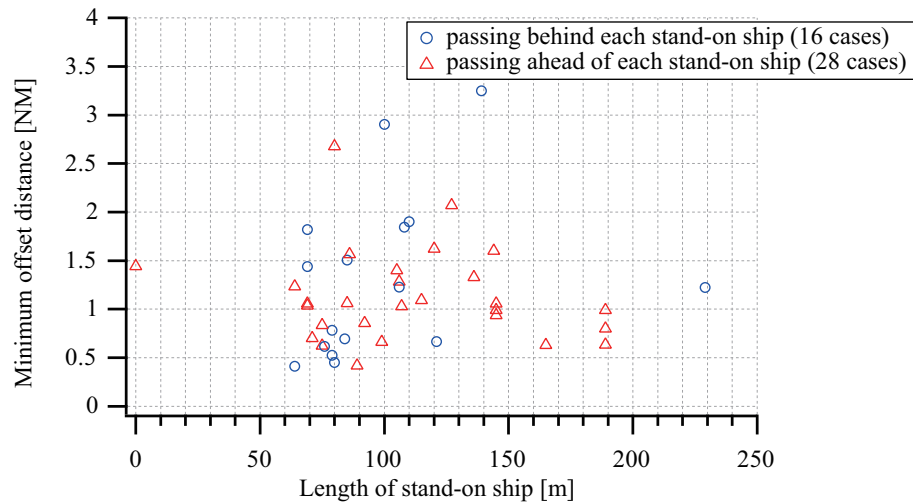


図 3.4 非避航ケースにおける最小離隔距離と針路保持船船長の関係

方を通過する方が高いと考えられる。表 3.1 に示す非避航ケースについての最小離隔距離は、針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースでは 760 m であるのに対し、針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースでは 780 m である。ストレスがより高いと考えられる針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースの最小離隔距離は、避航義務船の後方を通過したケースよりもわずかながら小さい、すなわち、針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースでの最小離隔距離 780 m は十分であったと考えられる。したがって、針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースでは、約 780 m (約 0.42 NM) 以上を保って航行していると言える。

ここで示した最小離隔距離は、針路保持船と避航義務船が最も接近したときの相対距離であり、換言すれば針路保持船との間に確保している最低限の距離が確保できない場合は避航義務船の操船者は避航し、確保できている場合は避航しないと推定される。

3.2.2 避航と航過距離の関係

1) 航過距離の定義

船舶のまわりには、一般的に他の船舶が入るのを避ける領域が存在することが知られている⁴²⁾⁴³⁾。その領域を避航領域と呼び、その大きさは、その船の大きさと速度、他の船舶の大きさと速度、および両船の針路のなす角度でおおよそ決定される⁴⁴⁾。避航領域は、一般的に、ある船舶を中心とした円形もしくは矩形で表され、その大きさはその船舶の中心から前後および左右の相対距離により表現される。

図 3.1 および図 3.3 を見ると、避航義務船、すなわち座標の原点のまわりにも針路保持船の相対航跡が見られない領域が確認できる。そこで、図 3.1 および図 3.3 の相

対座標の軸上，すなわち避航義務船の船首尾線上および正横線上を針路保持船が通過したときの相対距離（以下，航過距離と呼ぶ．）を分析する．ここで針路保持船が最初に通過する軸上にある航過距離により，避航義務船の操船者は避航するかしないかの判断していると考える．そこで，針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースについては避航義務船の真正面の航過距離，また避航義務船の後方を通過したケースについては右正横の航過距離を分析する．なお，以下のように避航義務船を中心とした方向別に航過距離の名称を区別する．

- 前方航過距離：針路保持船が避航義務船の真正面を通過したときの相対距離
- 後方航過距離：針路保持船が避航義務船の真後ろを通過したときの相対距離
- 左方航過距離：針路保持船が避航義務船の左正横を通過したときの相対距離
- 右方航過距離：針路保持船が避航義務船の右正横を通過したときの相対距離

2) 避航を行うときの航過距離

図3.5は，避航義務船が避航したときの航過距離と針路保持船の船長の関係を示す．(a)は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースにおける前方航過距離，(b)は避航義務船の後方を通過したケースにおける右方航過距離である．

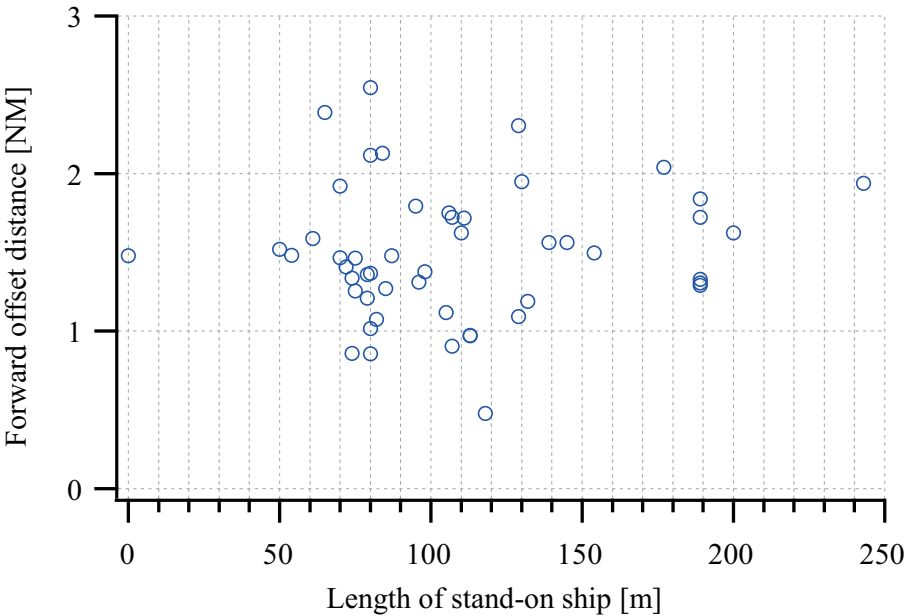
図3.5(a)において，前方航過距離はほぼすべてのケース（49ケース（98.0%））が1,482 m（0.8 NM）以上である．前方航過距離が最小のケースは885 m（0.48 NM）であり，その針路保持船の船長は118 mであった．また，図3.5(b)において，右方航過距離はほぼすべてのケース（7ケース（87.5%））が1,482 m（0.8 NM）以上である．右方航過距離が最小のケースは1364 m（0.74 NM）であり，その針路保持船の船長は74 mであった．

3) 避航を行わないときの航過距離

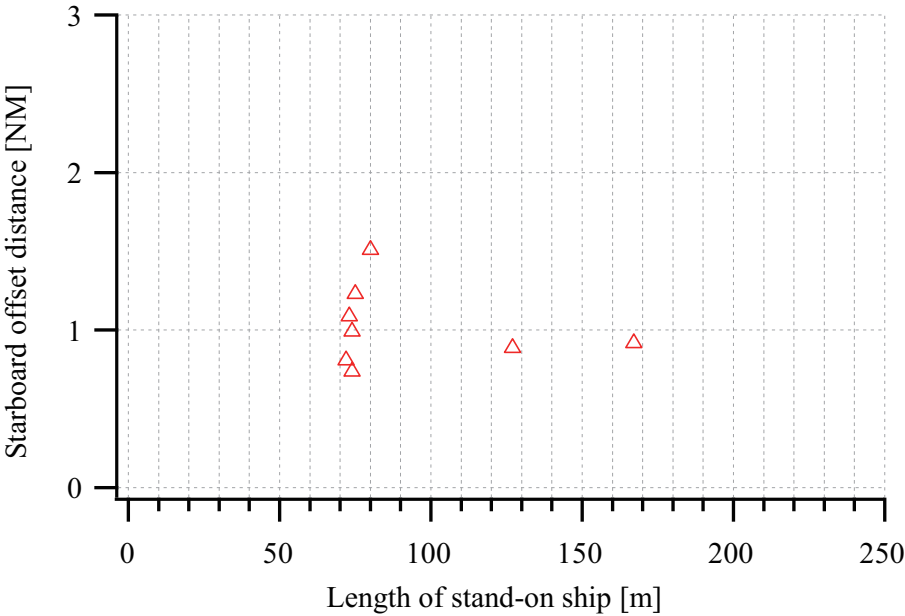
図3.6は，避航義務船が避航しなかったときの航過距離と針路保持船の船長の関係を示す．図3.6(a)は針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースにおける前方航過距離，(b)は避航義務船の後方を通過したケースにおける右方航過距離である．

図3.6(a)において，前方航過距離はほぼすべてのケース（15ケース（93.8%））が1,482 m（0.8 NM）以上である．前方航過距離が最小のケースは1,456 m（0.79 NM）であり，その針路保持船の船長は64 mであった．

また，図3.6(b)において，右方航過距離はほとんどのケース（24ケース（85.7%））が1,482 m（0.8 NM）以上である．右方航過距離が最小のケースは869 m（0.47 NM）であり，その針路保持船の船長は89 mであった．

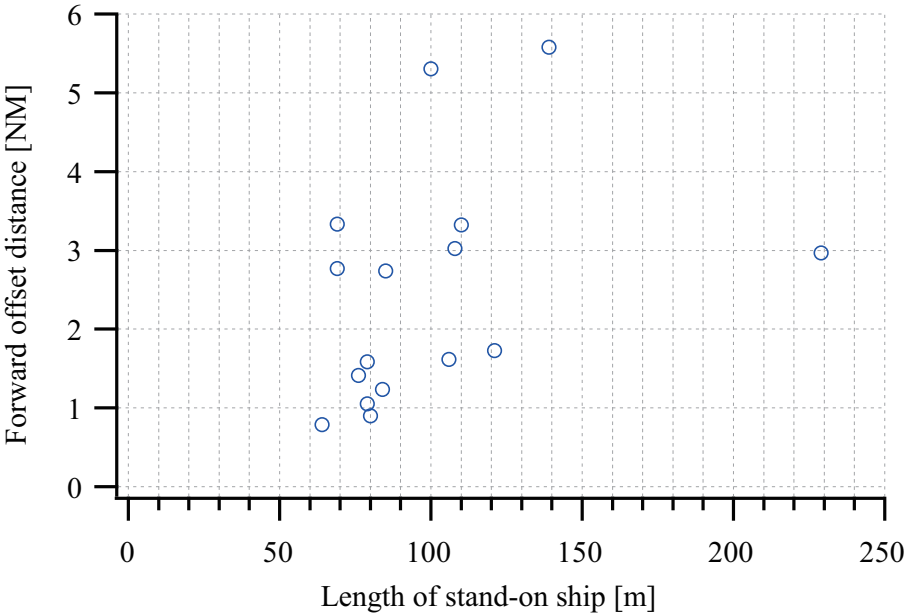


(a) 前方航過距離（針路保持船が避航義務船の前方を通過：50 ケース）

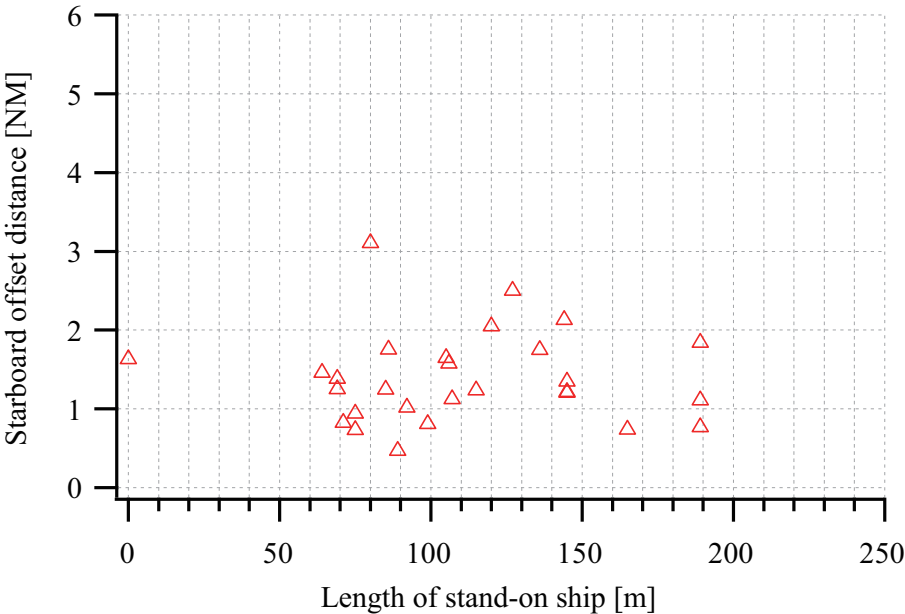


(b) 右方航過距離（針路保持船が避航義務船の後方を通過：8 ケース）

図 3.5 避航ケースにおける航過距離



(a) 前方航過距離（針路保持船が避航義務船の前方を通過：16 ケース）



(b) 右方航過距離（針路保持船が避航義務船の後方を通過：28 ケース）

図 3.6 非避航ケースにおける航過距離

表 3.2 航過距離の比較

航過距離 の区別	航過距離 [m]	
	避航ケース	非避航ケース
前方航過距離	1,482	1,482
右方航過距離	1,482	1,482

4) 避航により確保する航過距離

避航義務船が避航を行うときに確保している航過距離について検討する．表 3.2 に，避航ケースおよび非避航ケースにおいてほとんどの避航義務船が確保していた航過距離を比較して示す．避航の有無別および航過距離別のすべてにおいて，避航義務船は 1,482 m (0.8 NM) 以上の相対距離を確保していることがわかる．

避航するしないにかかわらず 1,482 m (0.8 NM) 以上の前方航過距離もしくは右方航過距離を確保していることから，避航義務船の操船者は，それらの距離が十分確保されているかどうかによって避航義務船の操船者は避航するかしないかを判断していると考えられる．

3.2.3 避航に伴う操舵時機と相対距離の関係

3.2.1 項および 3.2.2 項の検討から，避航義務船の操船者は最小離隔距離もしくは，前方もしくは右方航過距離を用いて避航するかしないかを判断していると推定できるが，実際には避航義務船の操船者はそれらのいずれかを用いて避航するかしないかを判断していると考えられる．

そこで，避航の一連の行動とこれらの相対距離の関係についてさらに検討する．表 3.3 に，針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース (50 ケース) についての変針角保持時機 (T_2) および避航終了時機 (T_3) での避航義務船から見た針路保持船の相対方位の分布を示す．また図 3.7 に，その 50 ケースでの針路保持船の相対航跡と操舵時機 (T_2 および T_3) における針路保持船の相対位置を重畳して相対座標系にて示す．図 3.7 中の円状の目盛りは，避航義務船から見た相対方位を示す．

まず，表 3.3 (a) の変針角保持時機 (T_2) での針路保持船の相対方位についてみる．最も多い相対方位は，0 以上 5 度未満で 12 ケース (24%) である．次いで，-5 度以上 0 度未満および 5 度以上 10 度未満がそれぞれ 9 ケース (18%) である．それらをあわせた -5 度から 10 度未満の範囲とさらに 10 度以上の範囲には，35 ケース (70%) が分布してしていることから，ほとんどの避航義務船は，針路保持船が避航義務船の真正面を通過するよりも前もしくは通過した直後に変針角を保持 (変針角保持時機 T_2) していることがわかる．つまり，避航義務船の操船者が，針路保持船との相対距離を確保できると判断した時機はそのときであると言える．

次に，表 3.3 (b) の避航終了時機 (T_3) での針路保持船の相対位置についてみる．変針角保

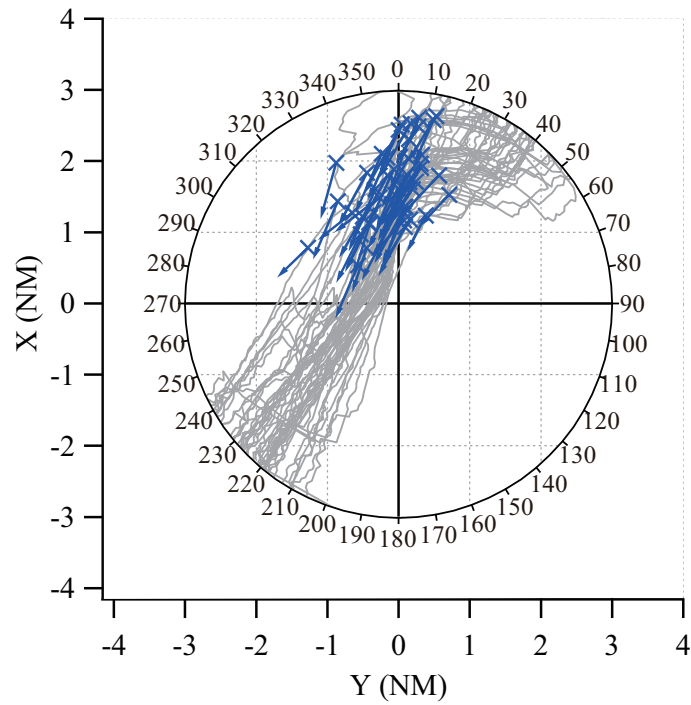
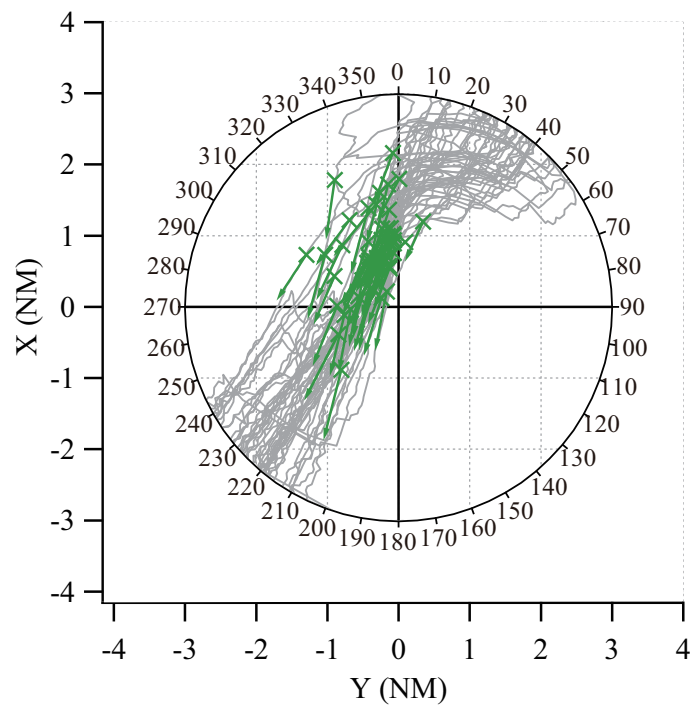
(a) 変針角保持時機 (T_2)(b) 避航終了時機 (T_3)

図 3.7 相対航跡と操舵時機（針路保持船が避航義務船の前方を通過した 50 ケース）

表 3.3 方位変化の分布（針路保持船が避航義務船の前方を通過した 50 ケース）

(a) 変針角保持時機（ T_2 ）での相対位置

相対方位 θ_r [deg]	ケース 数
$\theta_r < -45$	2
$-45 \leq \theta_r < -40$	0
$-40 \leq \theta_r < -35$	0
$-35 \leq \theta_r < -30$	1
$-30 \leq \theta_r < -25$	3
$-25 \leq \theta_r < -20$	3
$-20 \leq \theta_r < -15$	2
$-15 \leq \theta_r < -10$	3
$-10 \leq \theta_r < -5$	1
$-5 \leq \theta_r < 0$	9
$0 \leq \theta_r < 5$	12
$5 \leq \theta_r < 10$	9
$10 \leq \theta_r < 15$	2
$15 \leq \theta_r < 20$	2
$20 \leq \theta_r < 25$	0
$25 \leq \theta_r < 30$	1
$30 \leq \theta_r < 35$	0
$35 \leq \theta_r < 40$	0
$40 \leq \theta_r < 45$	0
$\theta_r \leq 45$	0
合計	50

(b) 避航終了時機（ T_3 ）での相対位置

相対方位 θ_r [deg]	ケース 数
$\theta_r < -90$	4
$-90 \leq \theta_r < -85$	1
$-85 \leq \theta_r < -80$	0
$-80 \leq \theta_r < -75$	1
$-75 \leq \theta_r < -70$	0
$-70 \leq \theta_r < -65$	0
$-65 \leq \theta_r < -60$	3
$-60 \leq \theta_r < -55$	0
$-55 \leq \theta_r < -50$	3
$-50 \leq \theta_r < -45$	1
$-45 \leq \theta_r < -40$	1
$-40 \leq \theta_r < -35$	2
$-35 \leq \theta_r < -30$	3
$-30 \leq \theta_r < -25$	3
$-25 \leq \theta_r < -20$	2
$-20 \leq \theta_r < -15$	3
$-15 \leq \theta_r < -10$	6
$-10 \leq \theta_r < -5$	8
$-5 \leq \theta_r < 0$	6
$\theta_r \leq 0$	3
合計	50

持時機（ T_2 ）での相対方位よりも広範にわたり分布していることがわかる．最も多い相対方位は、 -10 以上 -5 度未満で 8 ケース（16%）である．次いで、 -15 度以上 -10 度未満および -5 度以上 0 度未満がそれぞれ 6 ケース（12%）である．それらをあわせた -15 度から 0 度未満の範囲と 0 度以上の範囲には約半数の 23 ケース（46%）が分布し、また -45 度以上では 35 ケース（74%）が分布している．さらに、50 ケースそれぞれについて、3.2.1 項に示す最小離隔距離を通過したときと避航終了時機（ T_3 ）の時間的な位置関係を比較したところ、ほとんどのケース（44 ケース（88%））の避航終了時機（ T_3 ）が最小離隔距離を通過したときより前であることがわかった．すなわち、針路保持船が避航義務船の真正面を通過した直後に、避航を終了して原針路もしくは次の変針点に向かっており、最小離隔距離を通過したときにはすでに避航を終了した状態であると言える．

また、図 3.7 の (a) および (b) についてみると、時間の経過に伴う針路保持船の相対位置が変化しただけでなく、針路保持船の相対速度ベクトルの方向も変化していることがわか

る。時間的には後になる避航終了時機 (T_3) の相対速度ベクトルは、変針角保持時機 (T_2) のものよりも、 Y 方向成分が小さくなるとともに X 方向成分が大きくなっている傾向がみられる。これは、計画航路や元の針路などに影響されるが、針路保持船が避航義務船の前方を通過するときは、避航義務船の操船者は自身のほぼ正面の視野内に針路保持船が存在している間に変針を続け、その結果 Y 方向成分が大きくなったと考えられる。さらに避航終了時機 (T_3) は、針路保持船との相対距離を十分確保できると判断してその針路を戻したと考えると、 Y 方向成分が小さい速度ベクトルを持つケースは、そのときの針路保持船との相対距離が避航義務船の操船者にとって十分であると示唆していると考ええる。

つづけて図 3.8 に、針路保持船が避航義務船の後方を通過したケース (8 ケース) の相対航跡と、変針角保持時機 (T_2) および避航終了時機 (T_3) での針路保持船の相対位置を示す。図 3.8 中の円状の目盛りは、図 3.7 と同様に避航義務船から見たときの相対方位である。変針角保持時機 (T_2) での針路保持船の相対位置についてみると、すべてのケースが 45 度以上 90 度未満の範囲に分布していた。避航終了時機 (T_3) での相対位置についてみると、3 ケースが 90 度未満であった。また、それぞれの状況での最小離隔距離を通過したときと避航終了時機 (T_3) の時間的な関係を比較すると、すべてのケースは避航終了時機 (T_3) が最小離隔距離を通過したときより前であることがわかった。すなわち、針路保持船が避航義務船の右正横を通過するよりも前もしくはその直後に、避航を終了して原針路もしくは次の変針点に向かっており、最小離隔距離を通過したときにはすでに避航を終了した状態にあると言える。

したがって避航義務船の操船者は、針路保持船が避航義務船の前方を通過するときは、避航義務船の真正面の相対距離 (前方航過距離) を確保して避航を行っていると言える。また、針路保持船が避航義務船の後方を通過するときは、避航義務船の右正横の相対距離 (右方航過距離) を確保して避航を行っていると言える。言い換えれば、避航義務船は、前方航過距離および右方航過距離が表 3.2 に示すそれぞれの値以上か未満かによって、避航するかしないかの判断をしていると言える。

3.3 避航を行う相対距離の条件

3.3.1 分析に用いるケースの選別

表 3.2 の航過距離は、周防灘の AIS データから抽出したケースを分析したもの、すなわち特定の 1 隻の避航義務船が避航を行ったときの相対距離であるため、避航義務船が確保する一般的な航過距離についてさらに分析する。

表 2.6 に示した伊豆大島から東京湾に至る海域の AIS データから抽出した避航ケース 2,308 ケースと非避航ケース 4,488 ケースについて、針路保持船が避航義務船の船首尾線上および正横線上を通過したときの相対距離、すなわち前方航過距離、後方航過距離、左方航過距離、右方航過距離を解析した。ここでは前方航過距離および右方航過距離について述べる。表 3.4 に分析に用いた前方航過距離の数を示す。なお、表 3.4 に示す前方航過距離の数は、表 2.6 に示す AIS データから抽出したケース数と異なるが、その理由は表 2.6 に示すケースには針路保持船が避航義務船の真正面を通過しなかったケースを含んでいるためである。

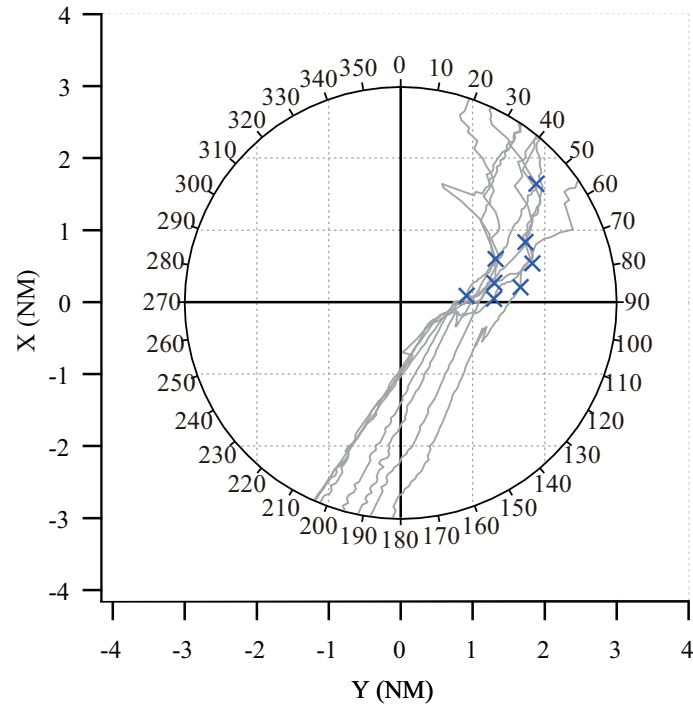
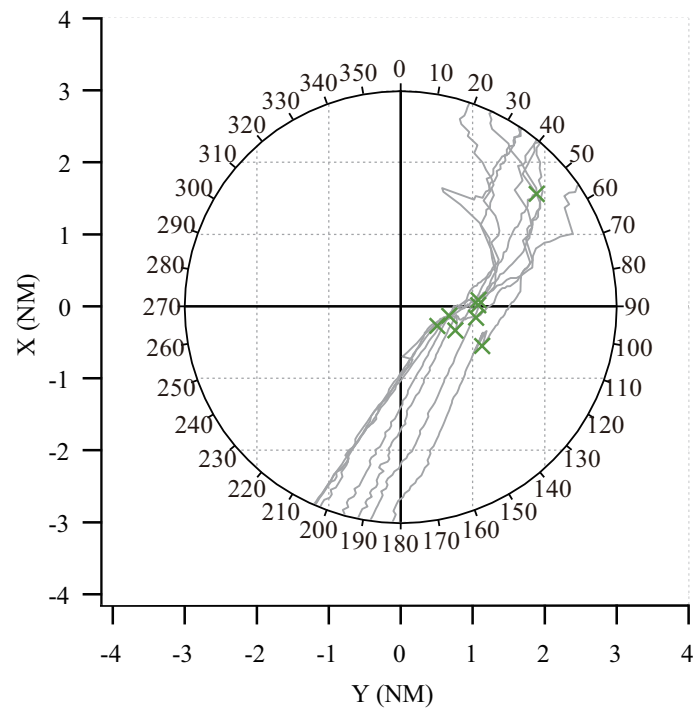
(a) 変針角保持時機 (T_2)(b) 避航終了時機 (T_3)

図 3.8 相対航跡と操舵時機（針路保持船が避航義務船の後方を通過した 8 ケース）

表 3.4 抽出した前方航過距離の数

ゲートラインの組 交通流 A & 交通流 B	避航義務船が避航する			避航義務船が避航しない		
	行会い	追い越し	横切り	行会い	追い越し	横切り
Gate3-6 & Gate1-3	77	24	270	159	28	454
Gate3-6 & Gate1-5	26	18	153	61	22	272
Gate3-6 & Gate1-6	25	18	86	60	19	214
Gate3-6 & Gate2-4	25	18	152	60	19	254
Gate3-6 & Gate3-5	53	29	434	98	30	844
小計	206	107	1,095	438	118	2,038
合計		1,408			2,594	

航過距離の分析に用いたケースは、避航義務船と針路保持船の二船の見合い関係をもとに抽出したものであるが、複数の針路保持船を対象に避航を行った状況も含むと考えられる。その場合、3.2.1 項 2) で述べたように、複数の針路保持船を対象に避航を行うときの最小離隔距離は、1 船対 1 船の状況での最小離隔距離よりも大きくなる傾向があることから、航過距離も同様の傾向を持つ可能性があると考えられる。また、分析に用いた前方航過距離は、表 2.3 に示す条件を満たす避航義務船と針路保持船の見合い関係から機械的に抽出したものであるため、避航を行ったと判定されたケースが実際には避航ではなく針路変更を目的とした変針である可能性を含んでいる。そのため、上述したような分析に不適切な前方航過距離を除いて分析する必要がある。

図 3.9 は、表 3.4 に示す横切りの見合い関係にある避航ケース 1,095 ケースについて、針路保持船が避航義務船の真正面を通過したときの相対速度ベクトルを相対座標系にて示している。相対速度ベクトルの色は相対速度の方向、すなわち相対針路を表す。また、図 3.10 は、表 3.4 に示す横切りの見合い関係にある避航ケースおよび非避航ケース別に、避航義務船の船長を 100 m ごとに分類して、前方航過距離からみる度数分布とその累積率を示している。

図 3.9 をみると、X 軸上の相対速度ベクトルの特徴から大きく二つに分類することができる。ひとつめとして、避航義務船からの相対距離（前方航過距離）がおおむね 9,260 m (5 NM) 未満である避航ケースの速度ベクトルは、そのベクトル方向がさまざまで、Y 方向成分が比較的大きい相対速度ベクトルが多く確認できる。ふたつめとして、前方航過距離がおおむね 5 NM 以上での避航ケースのほぼ全ての相対速度ベクトルは、Y 方向成分が小さく、X 方向成分が大きい特徴がある。3.2.3 項に述べた時間変化に伴う相対速度ベクトルの特徴を考慮すると、針路保持船の相対速度ベクトルの Y 方向成分が小さいケースは、針路保持船との相対距離が一定以上あり安全が確保できた状況であると考えられる。

次に、図 3.10 (a) から、前方航過距離の分布は 1.0 NM 以上 1.5 NM 未満をピークに持つ分布と、5.0 NM 以上 5.5 NM 未満をピークに持つ分布とのふたつに大別することができる。後者の分布での前方航過距離の相対速度ベクトルは、図 3.9 に示したようにそのほとんどケースの速度ベクトルは Y 方向成分が小さい。すなわち、前方航過距離が 5.0 NM 以上のケース

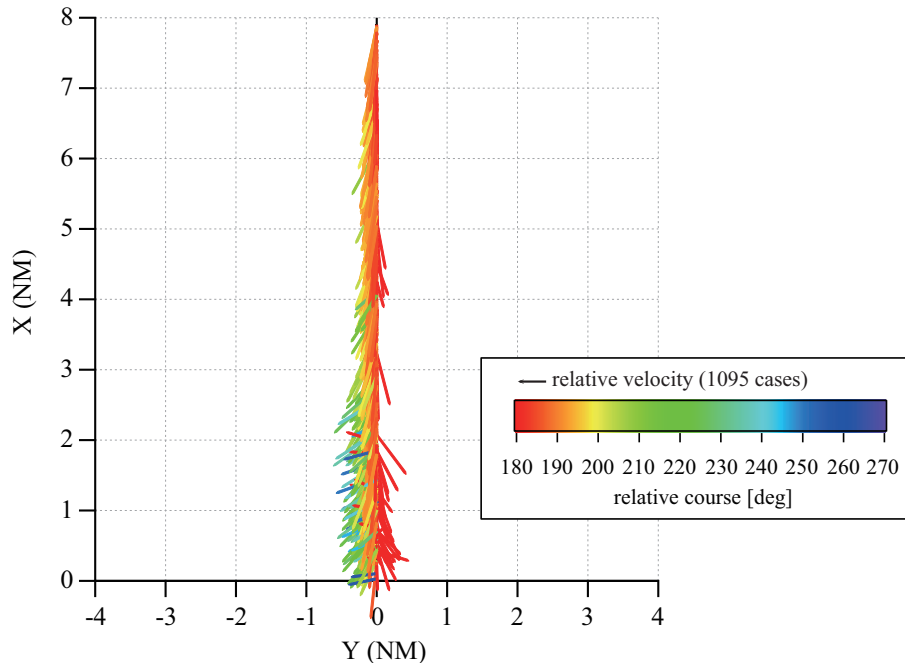


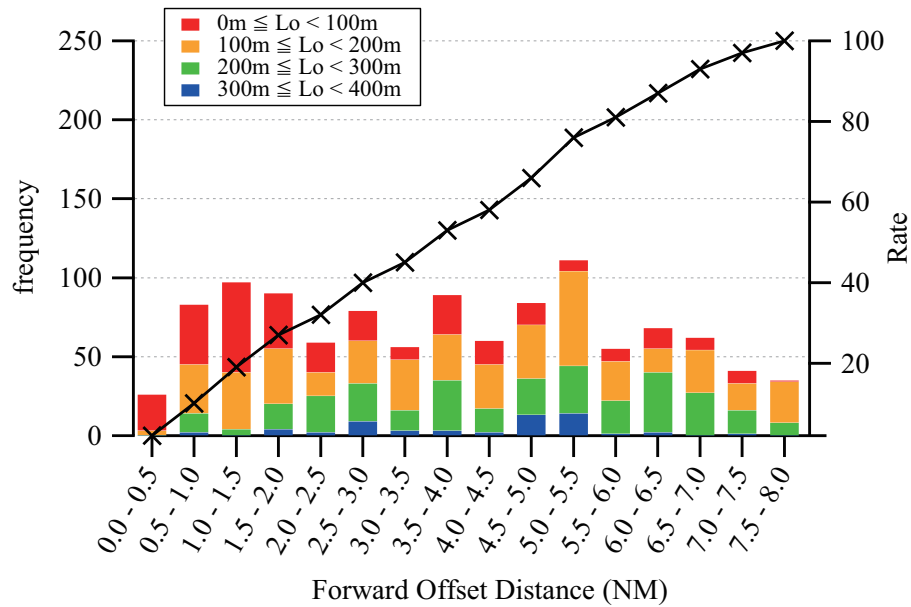
図 3.9 避航義務船の前方を通過したときの針路保持船の相対速度ベクトル

は、避航義務船の操船者はそのときの相対距離が安全であると判断したと考えられる。

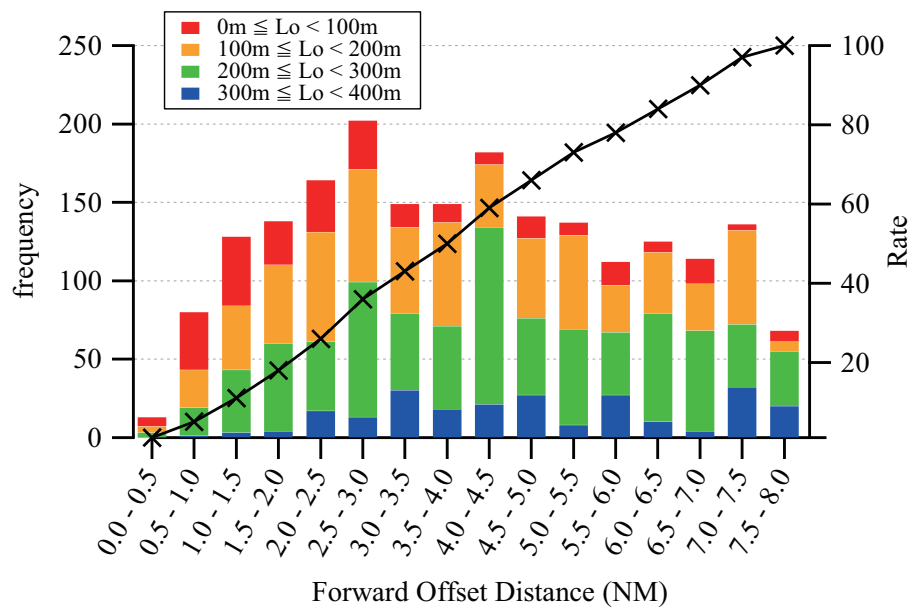
また、避航の有無別では、度数分布の形状は少し異なるが、0.5 NM より小さいケースはほとんど存在しない、また累積率はほぼ直線的に増加する、という点では両者に大きな差は見られない。よって、横切りの見合い関係においては、避航ケースおよび非避航ケースともに前方航過距離が5.0 NM 以上のケースを除いて分析する。

つづけて、行き会いや追い越しの見合い関係での前方航過距離についても同様に不適切なケースを除くため、表 3.4 に示す行き会いや追い越しの見合い関係にあるケースでの前方航過距離の分布を図 3.11 および図 3.13 に示す。また、図 3.12 および図 3.14 に、針路保持船が避航義務船の真正面を通過したときの相対進路でみる度数分布を前方航過距離 3,704 m (2.0 NM) ごとに分類して示す。

まず、行き会いの見合い関係についてみると、図 3.11 から、避航の有無に関わらず前方航過距離が 2.0 NM より小さいケースはほとんど確認できない。また、図 3.12 が示すように、避航の有無や前方航過距離の大きさにかかわらずほとんどのケースが、相対進路-180 度から-160 度に分布している。よって、行き会いの見合い関係では、避航義務船が避航したときの前方航過距離の大小に関係なく針路保持船を避航している状況と推測できる。また、避航の有無別では、前方航過距離でみた分布の形状は少し異なるが、2.0 NM より小さいケースはほとんど存在しないこと、5.0 NM を前後に多くのケースが分布していることの特徴が類似しており両者に大きな差は見られない。したがって、行き会いの見合い関係では避航ケースおよび非避航ケースも含めてすべての前方航過距離について分析する。

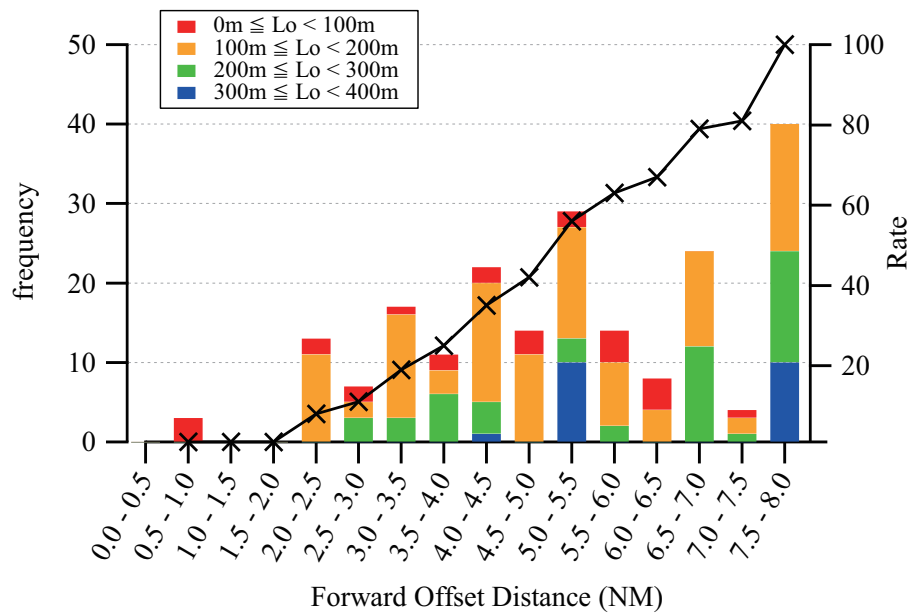


(a) 避航ケース

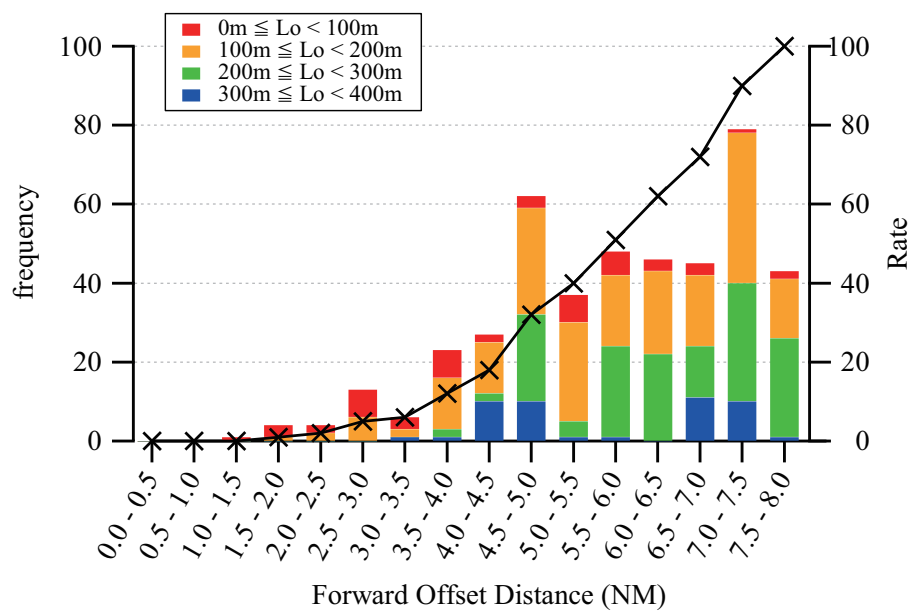


(b) 非避航ケース

図 3.10 横切りの見合い関係における前方航過距離の分布

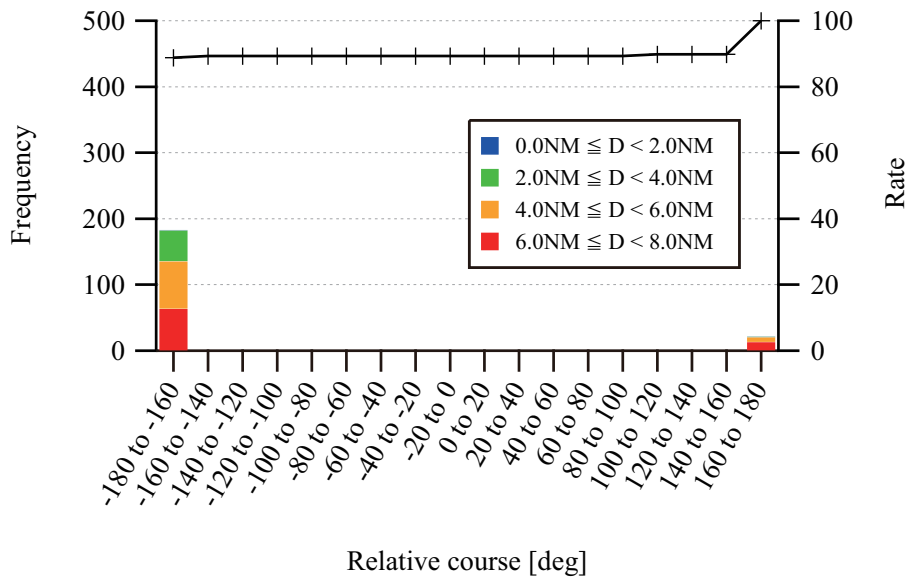


(a) 避航ケース

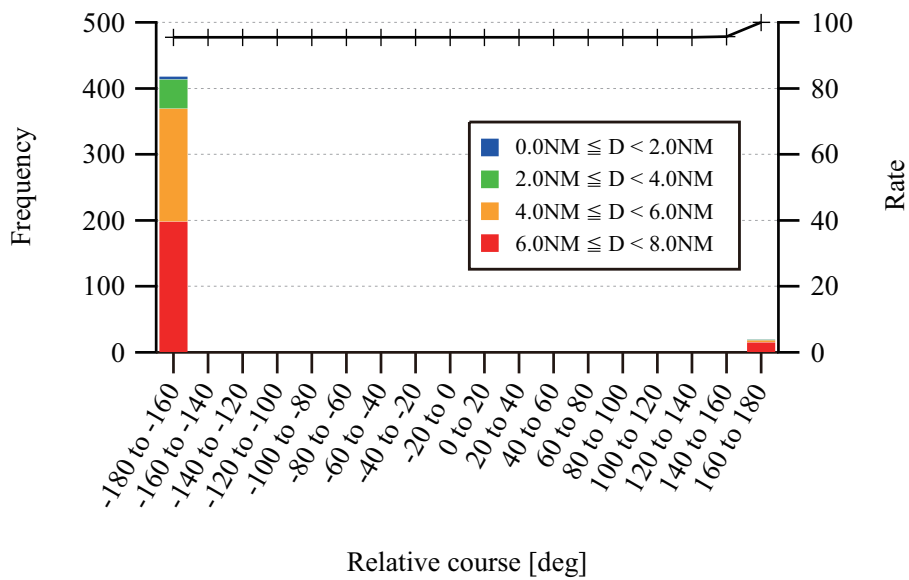


(b) 非避航ケース

図 3.11 行き会いの見合い関係における前方航過距離の分布

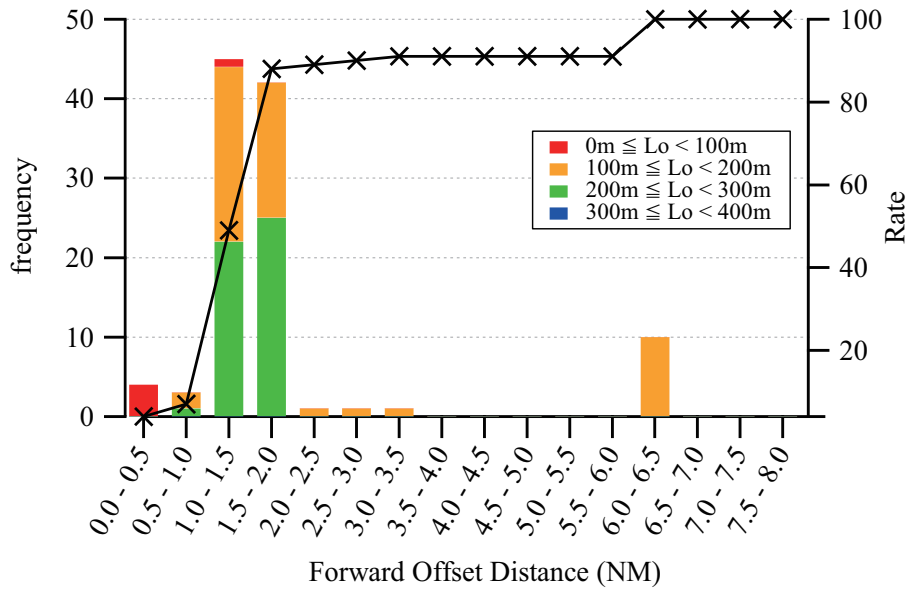


(a) 避航ケース

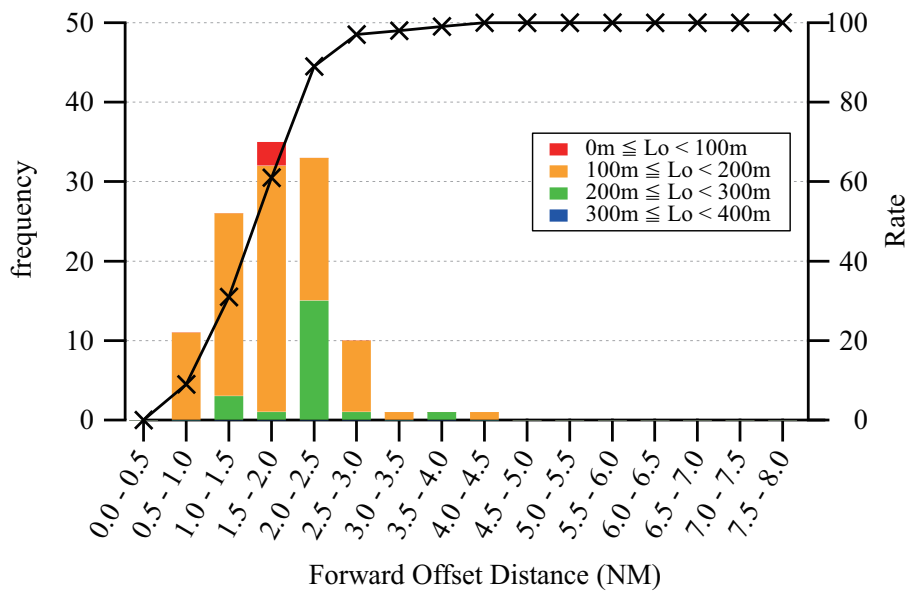


(b) 非避航ケース

図 3.12 行き会いの見合い関係における相対進路の分布

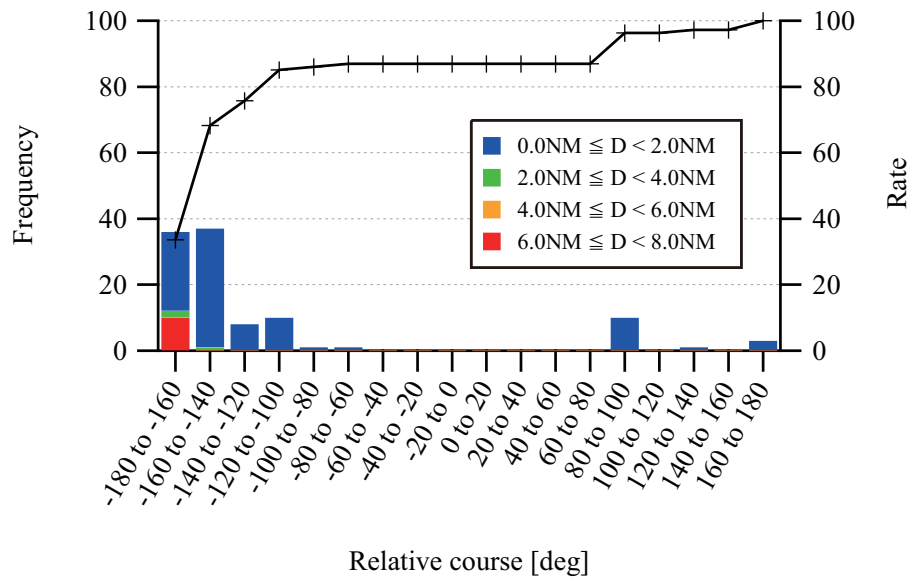


(a) 避航ケース

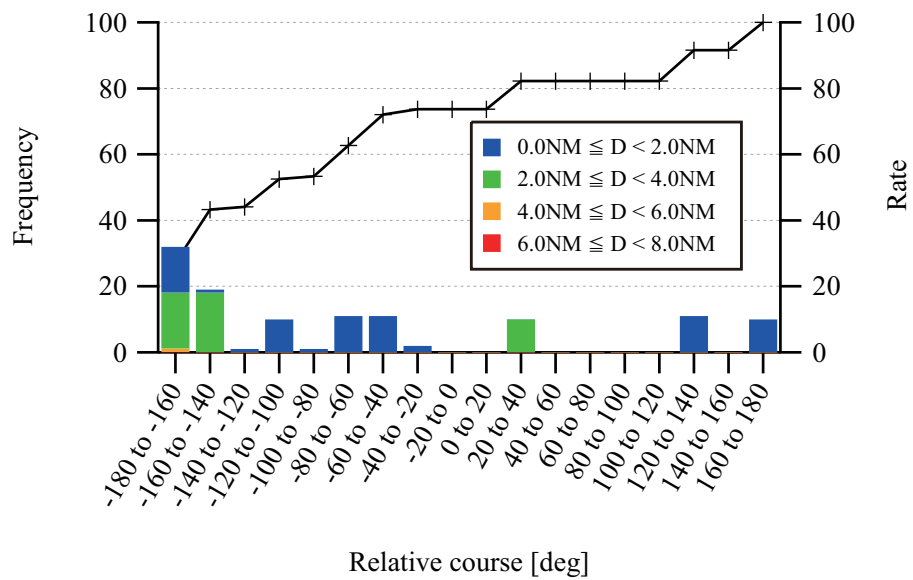


(b) 非避航ケース

図 3.13 追い越しの見合い関係における前方航過距離の分布



(a) 避航ケース



(b) 非避航ケース

図 3.14 追い越しの見合い関係における相対進路の分布

表 3.5 分析に用いるケースの航過距離

	行会い	追い越し	横切り
前方航過距離	5.0NM 未満	制限なし	制限なし
右方航過距離	2.0NM 未満		

追い越しの見合い関係では，図 3.13 から避航の有無に関わらずほとんどのケースは前方航過が 0.5 NM 以上 2.0 NM 未満であることがわかる．また図 3.14 が示すように，相対進路と前方航過距離のふたつの関係に目立つ特徴が見られないこと，また，ほとんどの前方航過距離が 2.0 NM 未満があることから，行き会いの見合い関係と同様に避航義務船からの相対距離に関係なく避航している状況と考えられる．したがって，追い越しの見合い関係では避航ケースおよび非避航ケースも含めてすべての前方航過距離について分析する．

右方航過距離についても同様の分析を行い，表 3.5 に示す分析に用いる相対距離の閾値を設定した．表 3.6 は一般的な航過距離を分析するために用いた前方航過距離の数を示す．

表 3.6 分析に用いた前方航過距離の数

ゲートラインの組 交通流 A & 交通流 B	避航義務船が避航する			避航義務船が避航しない		
	行会い	追い越し	横切り	行会い	追い越し	横切り
Gate3-6 & Gate1-3	77	24	154	159	28	274
Gate3-6 & Gate1-5	26	18	110	61	22	191
Gate3-6 & Gate1-6	25	18	48	60	19	129
Gate3-6 & Gate2-4	25	18	116	60	19	176
Gate3-6 & Gate3-5	53	29	295	98	30	576
小計	206	107	723	438	118	1,346
合計		1,036			1,902	

3.3.2 見合い関係と航過距離の関係

航過距離が見合い関係に依存するかの検証を行う．図 3.10，図 3.11 および図 3.13 が示すように，見合い関係によって前方航過距離の分布は全く異なる傾向を示していることから，前方航過距離は見合い関係に依存することが明確である．一方，右方航過距離について，見合い関係別に航過距離の分布を分析したがその傾向に違いが確認できなかった．したがって，一般的な航過距離の分析方法は，前方航過距離は見合い関係を区別し，右方航過距離は見合い関係を区別せず分析する．

ところで，前方航過距離が見合い関係に依存する理由について考察する．行き会いの見合い関係は，横切りの見合い関係と比較して，針路保持船が避航義務船に向かって接近する相対速度（図 3.9 の X 方向の成分）が大きく，また針路保持船が避航義務船のほぼ正面か

ら接近している状況である。そのため、小さい変針角で容易に避航でき、また早めに避航を行っても計画航路からの変位量は小さいため特段の理由がなければ早めに避航する避航義務船の操船者が多いと考えられる。その結果、行き会いの見合い関係での前方航過距離は、横切りの見合い関係のそれよりも大きくなると考えられる。

また、追い越しの見合い関係では、避航義務船は針路保持船の後方から追いかける状況であり、前方を航行している針路保持船は基本的にその針路を保持しなければならないため、避航義務船の操船者は自身が行動するために最低限必要な相対距離を確保して航行していると考えられる。その結果、追い越しの見合い関係での前方航過距離は、横切りの見合い関係のそれよりも小さくなると考えられる。

以上を考慮すると、前方航過距離は見合い関係に影響される相対速度に依存していると考えられる。一方、右方航過距離については、針路保持船は避航義務船の後方を通過した状況であるため、相対速度や針路保持船が予期しない行動をとっても、比較的容易に避航できるため見合い関係に依存しなかったと考える。

3.3.3 避航により確保する一般的な航過距離

1) 既往の研究におけるアンケート結果に基づく航過距離

既往の研究に、港内において操船者が確保したいと考える航過距離をアンケートの調査結果から分析したものがある⁴²⁾。簡単にその既往研究における調査方法および分析方法を示す。操船者へのアンケート調査では、「限界航過距離*1」と「十分航過距離*2」に対する操船者の意識を、自船（既往の研究では避航義務船および針路保持船の区別はない）の船首前方、船尾後方、右舷および左舷の4方向の相対距離を調査している。このときの自船の船長はアンケートの回答者が自由に設定し、他船（上述の自船と同様である）の船長は10 m, 50 m, 150 m, 300 mの4種類を設定している。アンケート調査結果の分析方法は、まず、想定した4種類 of 他船の船長別に、自船の船長と航過距離の関係から回帰直線を近似している。次に、得られた4本の回帰曲線の勾配と4種類 of 他船の船長の関係をさらに近似することによって、操船者が必要と考える航過距離の大きさを自船の船長と他船の船長の関数として表現している。

2) 一般的な前方航過距離の分析

一般的な前方航過距離を分析するため横切りの見合い関係を例に示す。前述した既往の研究での分析方法を参考に、表3.6に示す前方航過距離を用いて分析を行ったが、強い相関を持つ回帰式が得られなかった。この原因は、既往の研究では、アンケート調査により操船者が意識する航過距離を調査したため操船者の理想的な航過距離がある範囲に収束したが、本研究では実際の航行中の航過距離を用いたためそのばらつきが大きかったことが考えられる。

そこで、航過距離は避航義務船の船長に依存すると考え、避航義務船の船長に対する前方航過距離の割合と、避航義務船の船長の関係について分析する。表3.6に示

*1 港内において他船と接近する際に、この距離以内に他船が入ることに強い不安を感じるため絶対に許容できない距離

*2 港内において、他船と接近してもこの距離以上で航過する他船には何の不安も感じないという距離

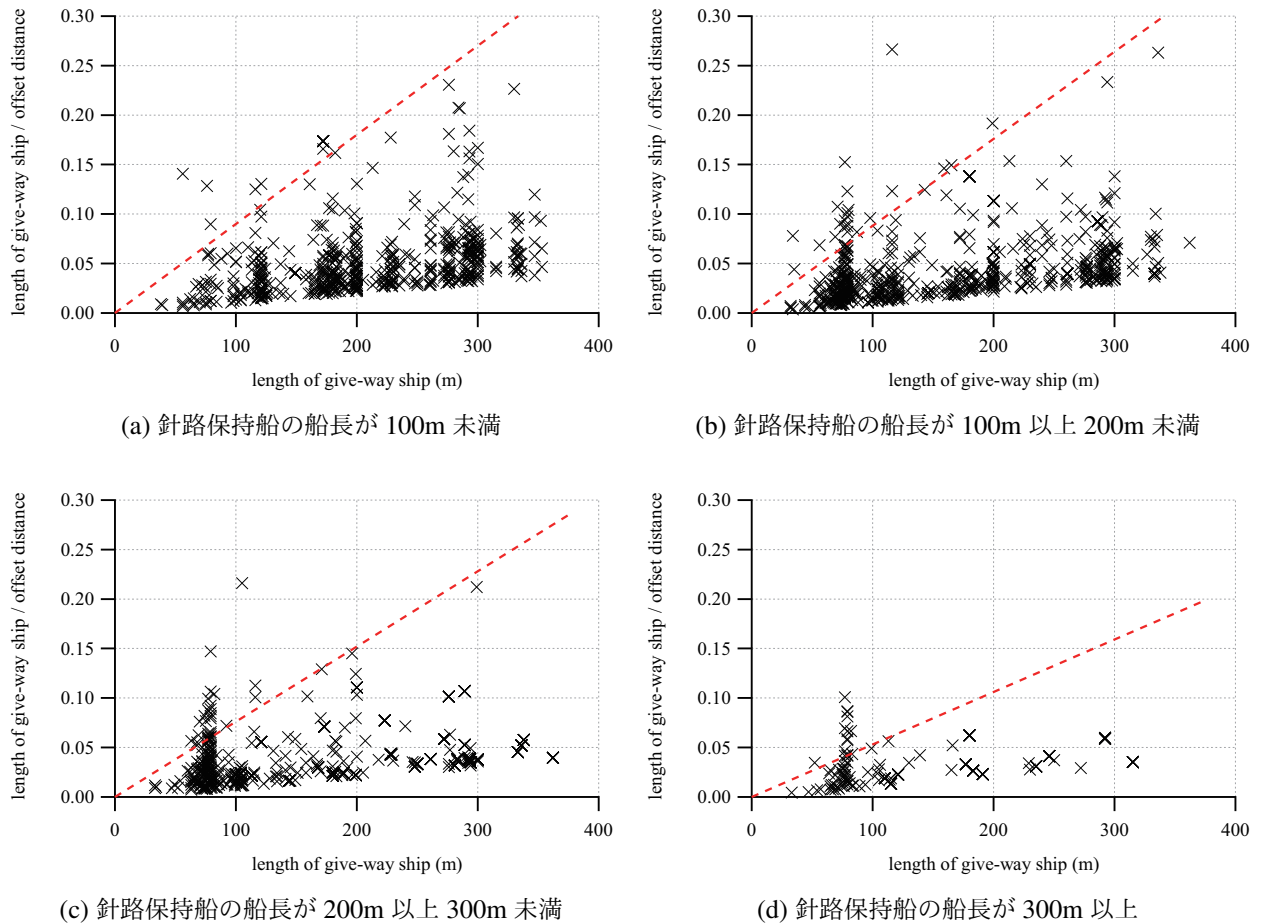


図 3.15 避航義務船の船長と前方航過距離の関係（横切りの見合い関係）

す避航ケースでの 723 個と非避航ケースでの 1,346 個をあわせた 2,069 個の前方航過距離のデータを用いて針路保持船の船長を 100m ごとに分類して分析した。図 3.15 に避航義務船の船長に対する前方航過距離の割合と、避航義務船の船長の関係を示す。縦軸は避航義務船の船長に対する前方航過距離の割合を、横軸は避航義務船の船長を示す。図 3.15 の直線でわけられるように前方航過距離の多くが分布するところと分布しないところの確認でき、その直線が避航するしないに関わらず操船者が確保する前方航過距離の閾値に相当すると考える。なお、図 3.15 の直線は主観的に設定したものであるが、ケース全体の分布の傾向として密度差があるところで分割するように設定した。

次に、図 3.15 の縦軸は避航義務船の船長に対する前方航過距離の割合であるため、直線の傾きの逆数が直線に相当する航過距離として表現できる。表 3.7 は、図 3.15 の直線の傾きに相当する前方航過距離を示している。表 3.7 の中央の列が示す針路保持船の船長は、分析に用いた前方航過距離を針路保持船の船長を 100 m ごとに分類したときの針路保持船の船長の中央値である。図 3.16 は表 3.7 をプロットしたものであ

表 3.7 針路保持船の船長区分別の前方航過距離（横切りの見合い関係）

針路保持船の船長 (L_t [m]) の区分	針路保持船の 船長の中央値 [m]	前方航過距離 [m]
$L_t < 100$	74	1,110
$100 \leq L_t < 200$	142	1,140
$200 \leq L_t < 300$	277	1,320
$300 \leq L_t$	327	1,890

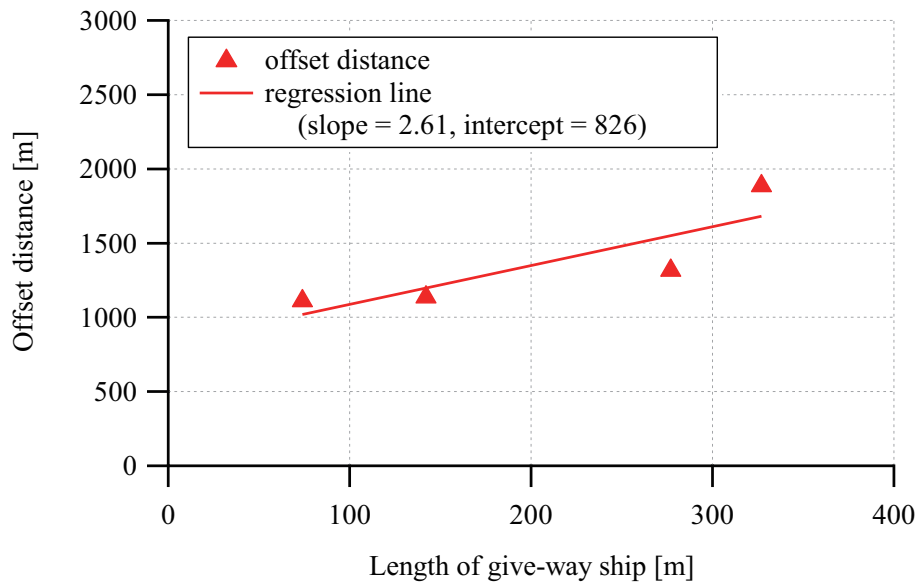


図 3.16 針路保持船の船長と前方航過距離の関係（横切りの見合い関係）

り，横軸は保持船船長，縦軸は前方航過距離である．図 3.16 の赤色の▲印が示すように，針路保持船の船長に比例して前方航過距離が大きくなっていることがわかる．そこで，最小二乗法により，(3.1) 式で表現される図 3.16 の直線を近似した．

$$D_{fc} = 2.62 \cdot L_t + 826 \dots\dots\dots (3.1)$$

(3.1) 式で表される前方航過距離の近似式から，横切りの見合い関係において避航義務船は，針路保持船の船長 L_t [m] に依存する相対距離 D_{fc} を自身の正面に確保して航行しており，針路保持船からの相対距離がこの D_{fc} よりも小さい場合は避航を行っていると言える．ここで，変数 D_{fc} は，相対距離を示す変数 D に，避航義務船の正面における相対距離（前方航過距離：forward offset distance）と横切りの見合い関係（crossing）のそれぞれの頭文字を添え字で記したものである．

さらに，横切りの見合い関係以外の行き会いと追い越しの見合い関係について同様

の方法で分析した結果，行き会い（head-on）の見合い関係にある前方航過距離は(3.2)式，追い越し（overtake）の見合い関係にある前方航過距離は(3.3)式で表現される．

$$D_{fh} = 11.40 \cdot L_t + 3,347 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$D_{fo} = 3.66 \cdot L_t + 2,309 \dots\dots\dots (3.3)$$

すなわち行き会いと追い越しの見合い関係においても避航義務船の操船者は，針路保持船が自身の前方を通過する場合は，針路保持船の船長 L_t [m] および見合い関係に依存する相対距離 D_s を自身の真正面に確保して航行していると言える．

3) 一般的な右方航過距離の分析

右方航過距離についても同様の方法で分析した．なお，3.3.2 項で述べたように，右方航過距離で見た度数分布は見合い関係別でその分布に傾向に違いが確認できなかったことから見合い関係を区別せず，避航ケースおよび非避航ケースを合わせて分析した．その分析の結果，右方航過距離 D_s は(3.4)式で表現される．ここで，右方航過距離 D_s の添え字は，前方航過距離（starboard offset distance）の頭文字である．

$$D_s = 0.31 \cdot L_t + 394 \dots\dots\dots (3.4)$$

すなわち避航義務船の操船者は，針路保持船が自身の後方を通過する場合は，見合い関係にかかわらず針路保持船の船長 L_t [m] に依存する相対距離 D_s を自身の右正横に確保して航行していると言える．

3.4 操舵時機と操船者が感じる衝突危険度の関係

3.2.3 項に示したようにほとんどの避航義務船は，針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を通過した直後に避航を終了し，原針路もしくは次の変針点に向かっていくことから，操船者が感じる衝突危険度はそのときに減少すると考えられる．そこで，避航義務船が複数の針路保持船と連続して出合った状況での，避航に伴う操舵時機とそのときの針路保持船の相対位置について分析する．図 3.17 は，避航義務船が2隻の針路保持船（先行船 D 丸、後続船 E 丸）に連続して出合った状況での針路保持船の相対航跡と，それぞれの針路保持船に対する避航開始時機（ T_1 ）および変針角保持時機（ T_2 ）における保持船の相対位置を相対座標系で示している．図 3.18 は，図 3.17 の状況における避航義務船の針路とそれぞれの針路保持船に対する $DCPA$ の時間変化を示す．

このときの避航は，避航義務船ははじめに先行船 D 丸に対して避航を開始し（ T_1 ；●印），先行船 D 丸が避航義務船の真正面を通過する直前に避航義務船は変針角を保持した（ T_2 ；○印）．その後，先行船 D 丸の船尾側を避航義務船が通過している最中に，避航義務船の右前方から後続船 E 丸が接近してきたため，避航義務船はさらに大きな変針角をとって避航を開始した（ T_1 ；■印）．さらに，後続船 E 丸が避航義務船の真正面を通過する直前に，避航義務船は変針角を保持した（ T_2 ；□印）．

この避航ケースでは，避航義務船が先行船 D 丸に対して避航を開始した後の $DCPA$ の値は，後続船 E 丸に対して避航を開始した後の $DCPA$ の値と同じであったが，避航に伴う操

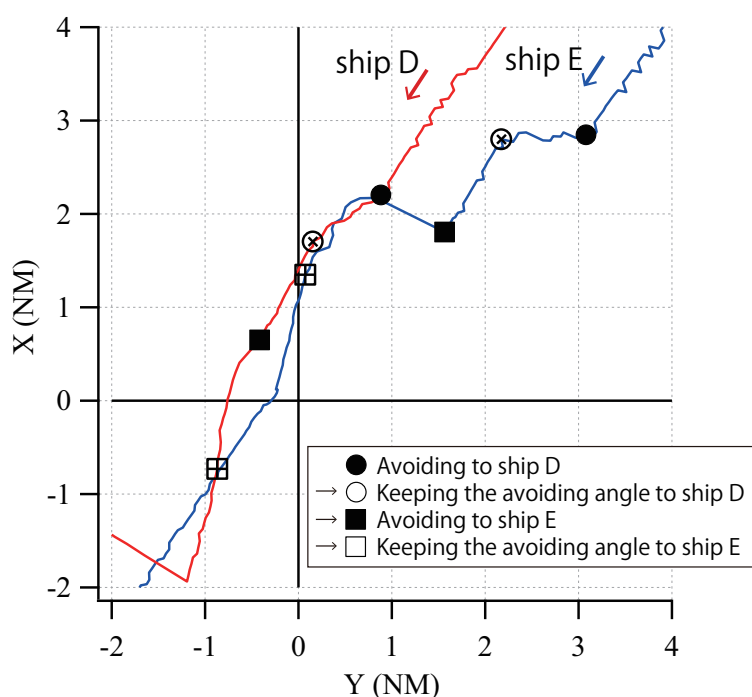


図 3.17 連続する見合いにおける操舵時機と針路保持船の相対位置

舵時機と針路保持船の相対位置の関係から、先行船D丸が避航義務船の真正面を通過した後の主たる避航対象は後続船E丸に移ったと考えることが自然である。すなわち、操船者が感じる衝突危険度は針路保持船が避航義務船の真正面を通過した直後に減少すると言える。ここでは、針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースのみの検証を行ったが、針路保持船が避航義務船の後方を通過する状況では、3.2.3項に示したように、針路保持船が避航義務船の右正横を通過する直前もしくは直後に変針角の保持や避航を終了しているから、操船者が感じる衝突危険度は避航義務船の右正横を通過する前後で減少すると言える。

既往の研究²¹⁾²²⁾では、二船が最も接近する時機（時間的には避航義務船の真正面もしくは右正横を針路保持船を通過した時機よりも後）に至るまで、衝突危険度が上がり続けるようにメンバシップ関数を設定しているが、実際には操船者はそれよりも早く避航を終了している。自律航行船舶が避航する状況では、予期しない事象が発生したときでも対処できるように、二船間の相対関係を考慮してCPAを通過するまで避航を継続することが望ましいと考える。しかし、操船者に危険を周知するような場合では、針路保持船が避航船の真正面および右正横を通過した後も危険と判定すると、操船者にとっては過大評価となり、操船者に違和感を与える結果となる。つまり衝突危険度の評価においては、適用する対象を明確にすることが重要であると言える。

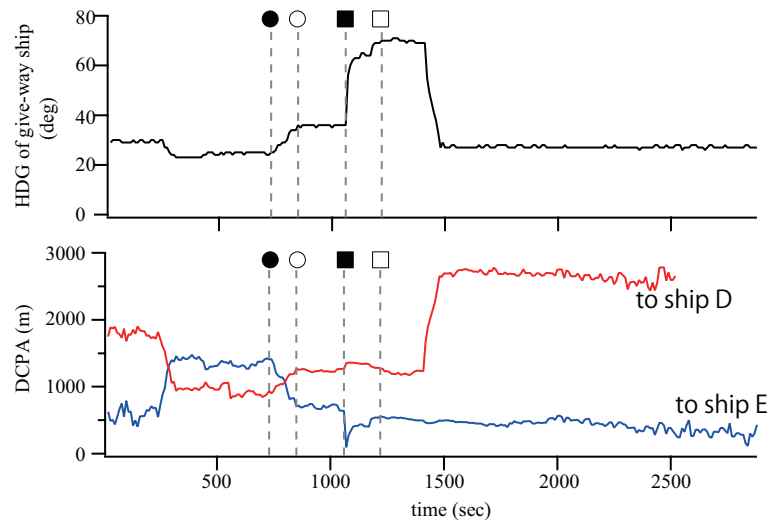


図 3.18 避航義務船の針路と二船に対する DCPP の時間変化

3.5 結論

操船者が避航を行う際に意識している避航義務船と針路保持船の相対距離に着目し、避航の実態を分析しその特徴を示した。

まず、特定の一隻の避航義務船について着目し分析を行った。

- 避航ケースと非避航ケースを比較分析し以下を明らかとした。
 - － 避航義務船と針路保持船が最も接近したときの相対距離を最小離隔距離として、各ケースにおける最小離隔距離を分析した結果、避航義務船の操船者は最小離隔距離が確保できない場合は避航を行っていることを示した。
 - － 避航義務船の船首尾線上および正横線上を針路保持船が通過したときの相対距離を航過距離として、各ケースにおける航過距離を分析した結果、避航義務船の操船者は、前方航過距離もしくは右方航過距離が確保できない場合は避航を行っていることを示した。
- 避航に伴う操舵時機における針路保持船の相対位置を分析して以下を明らかとした。
 - － 針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースでは、多くの避航義務船は針路保持船が自身の真正面を通過した直後に原針路へ復帰する行動（避航終了時機）を行っていることを示した。
 - － 針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースでは、多くの避航義務船は針路保持船が自身の右正横を通過する前後に原針路へ復帰する行動（避航終了時機）を行っていることを示した。
 - － 操舵時機における相対位置と、最小離隔距離および航過距離の位置関係を分析して、避航義務船の操船者は、前方航過距離もしくは右方航過距離を確保するために避航を行っていることを示した。

次に，避航義務船の操船者が確保している一般的な前方航過距離もしくは右方航過距離を分析して以下を明らかとした．

- 前方航過距離は，見合い関係と針路保持船の船長に依存することを示した．
- 右方航過距離は，針路保持船の船長に依存することを示した．
- 見合い関係は相対速度が影響しているであろうことを示した．

最後に，避航に伴う操舵時機と針路保持船の相対位置の関係から，避航義務船の操船者が感じる衝突危険度は，

- 針路保持船が避航義務船の前方を通過する場合は，避航義務船の真正面を通過した直後
- 針路保持船が避航義務船の後方を通過する場合は，避航義務船の右正横を通過した直後

に減少することを示した．

第 4 章

二船間の衝突危険度の定量的評価

4.1 緒言

第 3 章では、操船者が避航を行う際に意識していると思われる避航義務船と針路保持船との相対距離に着目して分析を行った。その結果、避航義務船の操船者は、自身の真正面および右正横を針路保持船が通過するときの相対距離（前方航過距離および右方航過距離）がある一定の値以上か未満かによって避航するかしないかの判断をしているであろうことを示した。

そこで、時間的に針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を通過するよりも前の避航開始時機の相対距離について分析する。ここで、避航開始時機における相対距離を方位変化を用いた関数で表現した既往の研究がある⁴⁵⁾。しかし、その関数は個々の避航義務船の操縦性能の影響を考慮しているため、船舶全体の一般的な傾向を表すためには、操縦性能の条件を実態に合わせる必要があるとしている。第 4 章では、その既往の研究と同様に、操船者が避航の際にもうひとつの指標として意識していると思われる方位変化と避航開始時機の相対距離との関係について分析することによって操船者が感じる衝突危険度の評価方法を検討する。

なお、第 4 章の分析には、2.4.2 項で述べたように表 2.5 に示す操舵時機を特定した 199 の避航ケースを用いた。

4.2 避航開始時機のばらつきが示す意味合い

図 4.1 は避航開始時機 (T_1) における針路保持船の相対速度ベクトルを相対座標系にて示している。図 4.1 の各矢印の始点は避航開始時機 (T_1) における針路保持船の相対位置を示し、矢印の色は方位変化の大きさを表している。図 4.1 をみると、原点から各矢印の始点までの距離（相対位置）と方位変化の関係は、原点からの相対距離が大きくなるほど方位変化が小さく、原点に近づき相対距離が小さくなるほど方位変化が大きいという傾向が確認できる。199 ケースについて、方位変化と相対距離の関係を最小二乗法により近似したが、避航ケースのばらつきが大きく相関が強い近似式を得られなかった。

そこで避航ケースのばらつきを平均すると方位変化と相対距離の関係がより明確になると考え、表 4.1 が示すように避航ケースを方位変化別に分類して、それぞれの区分におけ

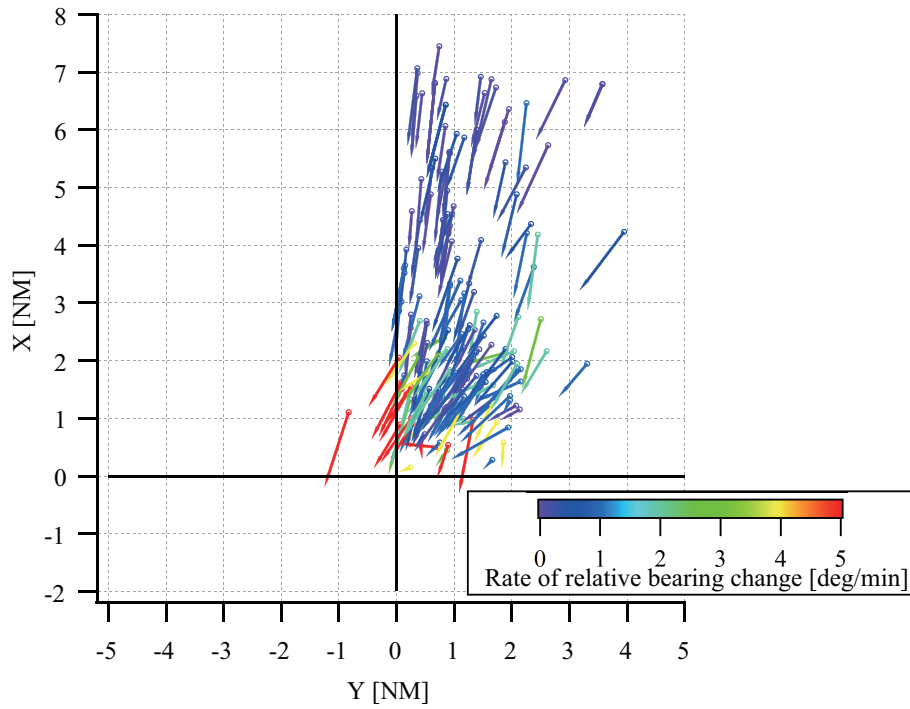
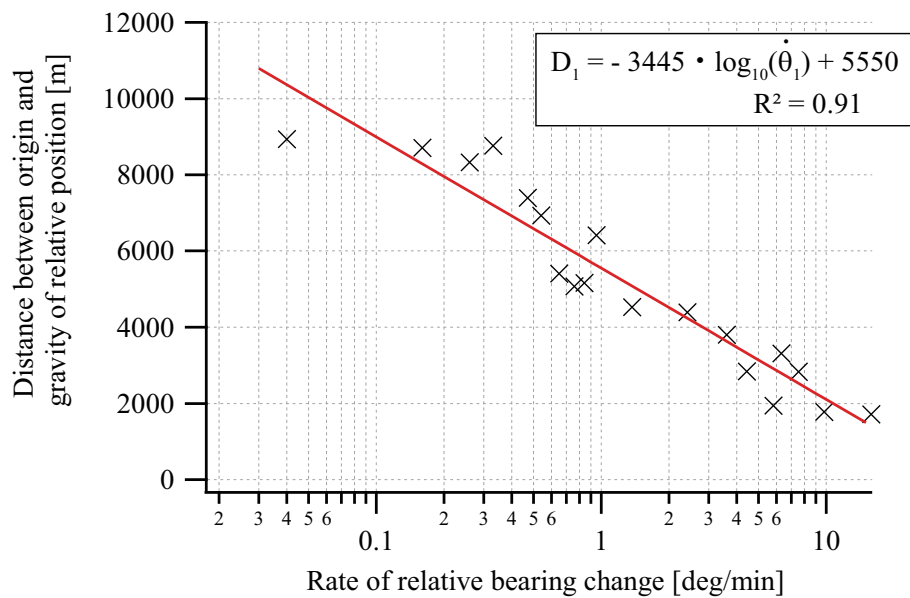
図 4.1 避航開始時機 (T_1) における保持船の相対位置と相対速度ベクトル図 4.2 避航開始時機 (T_1) における方位変化別の相対距離の近似線

表 4.1 方位変化別の方位変化と相対距離の平均値

方位変化 $\dot{\theta}$ の区分 [deg/min]	ケース 数	方位変化の平均値 [deg/min]	重心までの距離 の平均値 [m]
$0.0 \leq \dot{\theta} < 0.1$	22	0.04	8938
$0.1 \leq \dot{\theta} < 0.2$	16	0.16	8711
$0.2 \leq \dot{\theta} < 0.3$	16	0.26	8326
$0.3 \leq \dot{\theta} < 0.4$	11	0.33	8758
$0.4 \leq \dot{\theta} < 0.5$	7	0.47	7392
$0.5 \leq \dot{\theta} < 0.6$	17	0.54	6928
$0.6 \leq \dot{\theta} < 0.7$	3	0.65	5408
$0.7 \leq \dot{\theta} < 0.8$	4	0.76	5068
$0.8 \leq \dot{\theta} < 0.9$	8	0.84	5158
$0.9 \leq \dot{\theta} < 1.0$	5	0.95	6416
$1.0 \leq \dot{\theta} < 2.0$	42	1.37	4528
$2.0 \leq \dot{\theta} < 3.0$	19	2.41	4389
$3.0 \leq \dot{\theta} < 4.0$	8	3.61	3802
$4.0 \leq \dot{\theta} < 5.0$	8	4.43	2843
$5.0 \leq \dot{\theta} < 6.0$	3	5.82	1940
$6.0 \leq \dot{\theta} < 7.0$	2	6.31	3307
$7.0 \leq \dot{\theta} < 8.0$	2	7.52	2827
$8.0 \leq \dot{\theta} < 9.0$	0	—	—
$9.0 \leq \dot{\theta} < 10.0$	2	9.8	1782
$10.0 \leq \dot{\theta}$	4	15.85	1713
合計	199		

る方位変化の平均値と、相対位置に関する重心までの距離を求めた。図 4.2 に示す各点（×印）は、表 4.1 をもとにプロットしたものである。縦軸は重心までの距離，横軸は方位変化を対数表示で示している。方位変化の平均値と相対位置に関する重心までの距離について、最小二乗法により近似式を求めたところ、図 4.2 の直線が示すように相関関数 $R^2 = 0.91$ の極めて強い相関をもつ近似式を得られた⁴⁶⁾。

図 4.2 の近似線により表される避航開始時機と衝突危険度の関係について考えると、避航義務船と針路保持船の状態がその近似線より下方にあるときは避航を行っている危険な状況であり、それより上方であれば避航を行っていない安全な状況に分類できる。しかし、この近似曲線が示す避航開始時機を考えると、相対距離が極めて小さいときに方位変化が大きければ避航していない状況が存在していることとなり、一般的に考えて不自然である。個々の避航ケースのばらつきを小さくするために、方位変化別に避航ケースを分類したことが不自然な結果となったことから、逆に言うと、操船者の避航開始時機を表現するには避航ケースのばらつきを含めて分析する必要があると言える。

4.3 衝突危険度の定量的評価

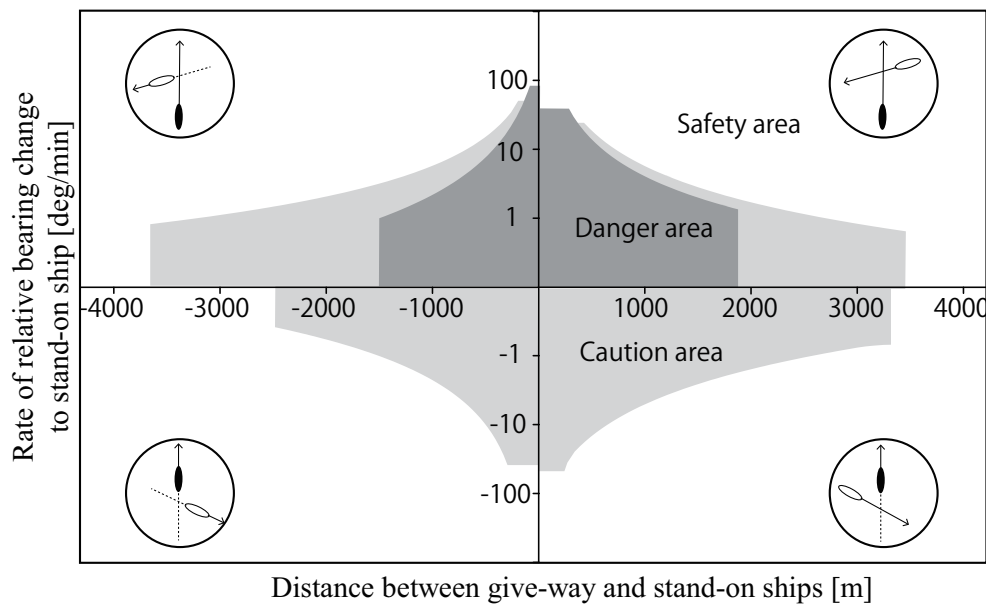
4.3.1 分析に用いるケースの選別

避航開始時機について再び分析する前に、避航ケースのばらつきの原因を考察する。分析に用いた199の避航ケースは、避航義務船が針路変更を行った直後にDCPAが増大した場合に避航義務船が針路保持船を避航したと判断して抽出したものである。しかしながら、これらの避航ケースは実際の海上を航行しているときの避航ケースであり、地形的な制約などから到着地点などに向かう針路変更のための変針を含んでいると考えられる。そこで、199の避航ケースから、変針の目的が針路変更の意図が強いと思われるケースを分析から除外する。

3.2.1項2)に示したように、避航義務船が避航したときのほとんどのケースは最小離隔距離が370 m以上1,482 m未満(0.2 NM以上0.8 NM未満)に分布していたことから、ここでは避航開始時機(T_1)でのDCPAが0.8 NMより大きいケースは針路変更を主たる目的とした変針とする。

一方で、外航船の操船経験者へのインタビューにおいて、航行しているときの状況にもよるが1,852 m(1 NM)のDCPAを確保するように航行している、という回答が得られているため、1,482 m(0.8 NM)の値が避航を目的とした変針か針路変更を目的とした変針かを判別する条件として適切かどうかを検証する。3.2.1項2)で分析した最小航過距離は、67 mの船舶(内航船)が避航したときの針路保持船との相対距離であるため、それと類似する船長の船舶は類似する相対距離を確保すると考え、それより大きい船長の船舶について0.8 NMというDCPAが閾値として適切かどうかを検証する。避航開始時機(T_1)でのDCPAが0.8 NM以上1.0 NM以下であった20ケースのうち12ケースは、避航義務船の船長が200 m未満であることから、それらを類似する船長の船舶と考えると閾値0.8 NMは適当である。一方、残りの8ケースは避航義務船の船長が200 m以上であった。そこで、8ケースについて変針後の避航義務船の動向を分析したところ、そのうちの7ケースは変針後の針路で航行しており、変針の主たる目的は針路変更であったと考える。残りの1ケースは、DCPAが1,846 mでほぼ1 NMであることから、変針の目的は針路変更であったと考える。したがって、避航を目的とした変針か針路変更を目的とした変針かを判別する条件として、1,482 m(0.8 NM)の値は妥当と考える。避航開始時機(T_1)でのDCPAが0.8 NMより大きいケースを解析対象から除外し、166ケースを用いて分析する。166ケースはさらに、針路保持船が避航義務船の前方を通過した132ケースと、後方を通過した34ケースに分けることができる。

なお、この200 mという船長は、「操船の困難性は船舶の大きさ(長さ)がおおよそ200メートル辺りで顕著になる(以下略)」⁴⁷⁾という理由により、海上衝突予防法の特別法である海上交通安全法第2条第2項第2号において「長さ200 m以上の船舶を巨大船という」と定義され、航法において巨大船とそれ以外という区別が行われていることから、ここでの検証においてもその区別を適用することが適切と考えた。

図 4.3 原らの衝突危険度（文献⁴⁸⁾をもとに作成）

4.3.2 避航開始時機の分析

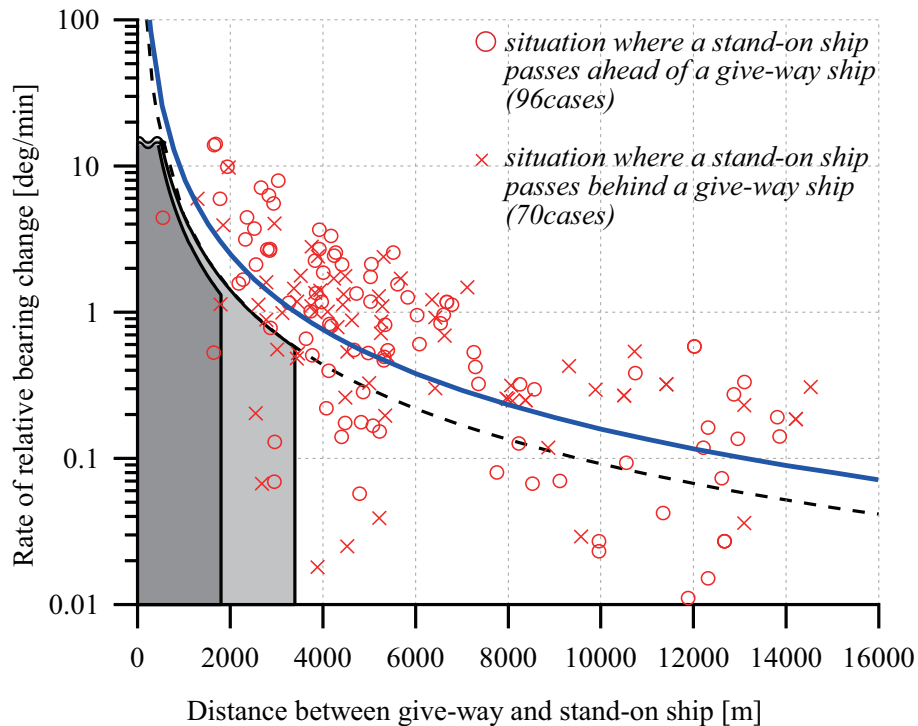
1) 避航開始時機の平均値

操船者のばらつきを含む避航開始時機を分析するため、方位変化と相対距離を変数として衝突危険度を表現した既往研究⁴⁸⁾をもとに分析した。原らは、延べ300人の海技資格者を対象として、2NMレンジで表示したレーダの航跡をもとに衝突危険度の評価実験を行い、ふくそう海域*¹における操船者の主観的な衝突危険度を、図4.3に示すように危険領域・注意領域・安全領域に分けて表現している（以下、原らの衝突危険度と呼ぶ）。避航義務船（図4.3の円内の塗りつぶされた船舶）と針路保持船（図4.3の円内の白抜きの船舶）の位置関係により、相対距離と方位変化からなる座標系を4つの象限別に分類して、それぞれの象限について衝突危険度を表す領域が定義されており、それらの領域は方位変化と相対距離の関数で判別される。なお、本研究では簡単のため、避航において最も基本的な避航義務船と針路保持船の位置関係である「避航船の前方を保持船がこれから通過する（第一象限）」をもとに検討を行う。

図4.4は、166ケースの避航開始時機（ T_1 ）を示す図であり、以下の4つを重畳して示している。

- 濃い網掛け部と薄い網掛け部が示す原らの衝突危険度での危険領域と注意領域（図4.3の第一象限をもとに作図）

*¹ 海上衝突予防法の特別法である海上交通安全法が適用される海域のことで、東京湾・伊勢湾・大阪湾を含む瀬戸内海がその対象となる。「ふくそう（輻輳）」とは、「方々からいろいろな物が一か所に集まること。こみあうこと。」（三省堂 大辞林より引用）である。

図4.4 原らの衝突危険度と避航開始時機（ T_1 ）の関係

- 各点（○印および×印）が示す避航開始時機（ T_1 ）
- 青色実線が示す避航開始時機（ T_1 ）の近似曲線
- 黒色破線が示す原らの衝突危険度における注意領域と安全領域の境界の延長線

なお、原らの衝突危険度における注意領域と安全領域の境界は、(4.1) 式で定義される。

$$\dot{\theta} = 5.8 \cdot 10^5 \cdot D^{-1.7} \quad [\text{deg/min}] \quad \dots \quad (4.1)$$

避航開始時機（ T_1 ）の○印と×印の区別は、そのときの状態量により針路保持船が避航義務船の前後のどちらを通過するかを判別したものである。○印は、(2.2) 式の絶対値の中が正、すなわち針路保持船が避航義務船の前方を通過する状況、×印はその逆の負の場合の針路保持船が避航義務船の後方を通過する状況を示し、それぞれ96ケースと70ケースである。

ほとんどのケース（158 ケース（95.2%））の避航開始時機（ T_1 ）が、ふたつの網掛け部の外側の領域に分布している。ふたつの網掛け部は前述したように2 NM レンジのレンジでのレーダーの航跡をもとに衝突危険度を評価したものであり、その2 NM の範囲内で3段階の衝突危険度を設定したため安全領域とされたが、実際にはそれよりも遠方の時点で避航を開始していることがわかる。また、避航開始時機（ T_1 ）の

分布が示すように、相対距離が極めて大きいときに避航を開始するケースや、ある程度接近したときに避航を開始するケースなどさまざまである。これらのケースには、操船者の個性や航行している条件などのさまざまな影響を含んいると考えられるが、それらすべてを含めた避航開始時機 (T_1) として分析を行った。

図4.4から、方位変化の正負に関わらず、避航開始時機 (T_1) は緩やかな右肩下がりの傾向を示している。そこで、最小二乗法により(4.1)式の黒色破線と同様の指数関数となる近似式を求め青色実線で示す。その近似曲線は、(4.2)式で表され、相関関数は $R^2 = 0.43$ である。この近似曲線の相関は強くはないが、4.2節で述べたように避航開始時機 (T_1) は操船者の個性や航行している条件などのさまざまな影響を含んだ上で、この近似曲線は避航開始時機の平均値を示すと言える。

$$\dot{\theta}_1 = 1.0 \cdot 10^6 \cdot D_1^{-1.7} \quad [deg/min] \dots\dots\dots (4.2)$$

2) 標準的な避航開始時機

4.2節で述べたように、操船者の個性や航行状況などによる避航ケースのばらつきは、避航開始時機 (T_1) を表現するには重要であり、2.3.3項2)で述べたように避航開始時機は操船者が感じる衝突危険度と関連があると考えられる。そこで、ほとんどの避航義務船が避航を開始している時機を分析するため、(4.2)式の近似曲線の信頼区間を求める。避航開始時機 (T_1) のばらつきは、(4.2)式の近似曲線を中心とした正規分布に従うと仮定して、全体の約3分の2以上が含まれる範囲として一般的によく使用される 1σ (68.3%を含む) の信頼区間を求める。

信頼区間を求める前に、避航開始時機 (T_1) のばらつきが正規分布に従うかを検証する。相対距離に対する避航開始時機 (T_1) と近似曲線の差を求め、さらに相対距離からみるその差の度数分布と累積分布を求める。その結果をそれぞれ、図4.5の棒グラフと赤色実線(凡例の Observed)で示す。図4.5の横軸は、方位変化についての近似曲線からの差を示す。近似曲線を中心として、方位変化の差が ± 5.0 [deg/min] までの範囲にほぼすべての避航開始時機 (T_1) が分布している。近似曲線と避航開始時機 (T_1) の差について、平均値と標準偏差から正規分布を求め、その正規累積分布関数を図4.5に青色実線(凡例の SD)で示す。また、参考として、正規分布での 1σ の信頼区間の両端を、右縦軸の累積分布上に2本の黒色点線で示す。避航開始時機 (T_1) のばらつきが正規分布であるとき、累積分布が0.1587と0.8413の間には68.3%のケースが含まれる。

近似曲線からの差の累積分布を示す赤色実線と、正規累積分布関数を示す青色実線では累積分布の形状が異なり、 1σ の信頼区間に含まれる方位変化の範囲が両者では異なることがわかる。ここでの目的は、近似曲線からの差について全体の分布確率を求めることではなく、 1σ の信頼区間の両端での近似曲線からの差を求めることである。そこで、赤色実線と同じ累積確率になるように、近似曲線からの差が分布の山から大きく離れているものを除いて平均値と標準偏差を再び求め、それらで表現される正規累積分布関数を青色破線(凡例 Modified SD)で示す。これにより、正規分布

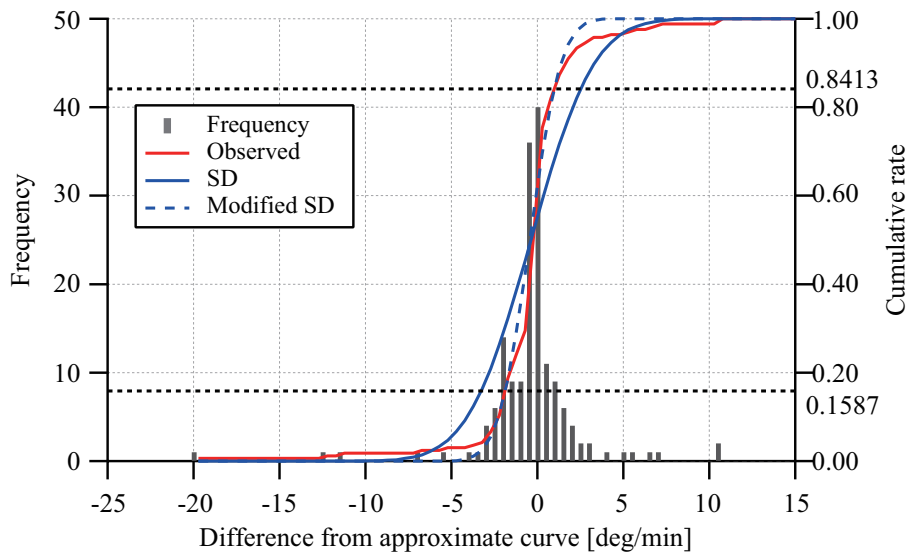
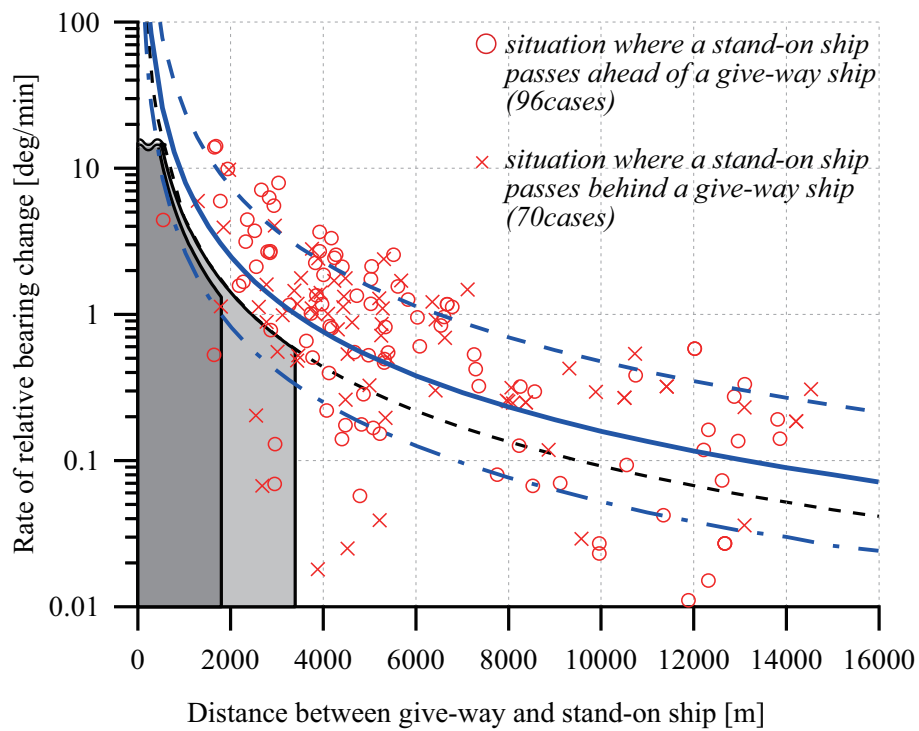


図 4.5 近似曲線と避航ケースの偏差の分布

図 4.6 避航開始時機 (T_1) の近似曲線と信頼区間

関数を用いて避航開始時機 (T_1) の分布が表現でき、 1σ の信頼区間には正に 68.3% のケースが含まれる。

正規分布での 1σ の信頼区間は (4.3) 式および (4.4) 式で表現され、それらが示す曲線を図 4.6 に青色一点鎖線と青色破線で示す。なお、便宜上、図 4.6 において信頼区間の下端を示す (4.3) 式による曲線を下方限界、上端を示す (4.4) 式による曲線を上方限界と呼ぶ。図 4.6 において下方限界より上方の領域は、ほとんどの避航義務船が避航を開始している領域であり、言い換えれば、下方限界より下方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。これはすなわち、ほとんどの避航義務船が避航を開始する時機は、方位変化および相対距離を二変数とした平面上のある領域に広がっており、操船者が感じる衝突危険度は方位変化と相対距離に関係があると言える。

$$\text{下方限界: } \dot{\theta}_1 = 3.3 \cdot 10^5 \cdot D_1^{-1.7} \quad [\text{deg/min}] \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\text{上方限界: } \dot{\theta}_1 = 3.0 \cdot 10^6 \cdot D_1^{-1.7} \quad [\text{deg/min}] \dots\dots\dots (4.4)$$

ところで、図 4.4 および図 4.6 の黒色破線は、原らが危険領域と安全領域をわけするために、シミュレータ実験結果から最小二乗法により近似した回帰曲線を延長したものである。そのため、その回帰曲線の上下方には、図 4.5 に示すような実験結果のばらつきが広がっている領域が存在していると言える。すなわち、図 4.6 の青色一点鎖線および黒色破線は、ほぼ同じ意味合いをもち、この違いは操船者の個性や航行状況などの影響によると考えられる。そこで、同じ相対距離でも方位変化が大きい、すなわち危険が低い黒色破線を、ほとんどの操船者が避航を開始する標準的な避航開始時機の下方の境界線とする。

なお、原らの衝突危険度での注意領域は、前述した理由から、その適用範囲に 2 NM という距離の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できることがわかる。

4.3.3 衝突危険度の検討

避航は衝突もしくは接近を回避するために行われることから、避航を開始している領域には危険が存在すると仮定し、方位変化と相対距離を軸とする平面上に、表 4.2 に示す 4 段階の衝突危険度（領域）を設定する。図 4.7 は、この仮定に基づき設定した領域を示す。

図 4.7 で定義する衝突危険度の妥当性を検証するため、衝突危険度と、避航中の方位変化と相対距離の時間変化との関係について検証する。図 4.8 は、分析に用いた 166 ケースのうちの 1 ケースを用いて、避航中の時間変化を折れ線グラフで図 4.7 の上に重畳している。折れ線グラフの色は、避航に伴う操舵時機別にわけて示し、時間的には赤から青、青から緑、緑から黄色、黄色から水色に経過する。なお、避航開始時機 (T_1) は赤色から青色に変化する時機、変針角保持時機 (T_2) は青色から緑色に変化する時機、避航終了時機 (T_3) は緑色から黄色に変化する時機、復帰終了時機 (T_4) は黄色から水色に変化する時機である。

図 4.8 に示すように、方位変化が上下に変動しているが、概ね避航開始後は上方限界（青色破線）の上方を這うように状態量に変化していることがわかる。このことから、上方限

表 4.2 仮定の衝突危険度の定義

領域	範囲	状態
危険の領域	原らの衝突危険度において 危険領域と定義された領域	ただちに避航が 必要な状態
注意の領域	平均的な避航開始時機の 下方限界より下方の領域	避航することを 強く推奨する状態
要監視の領域	下方限界より上方かつ 上方限界より下方の領域	操船者が平均的に 避航を開始する状態
安全の領域	上方限界より上方の領域	避航が行われない 安全な状態

界は安全と要監視の領域の境界線となる可能性があると言える。また、操船者は過剰な安全を担保するのではなく、適度な安全を保って航行していると考えられる。

次に、上方限界が安全と要監視の領域の境界線として妥当かどうかを検証する。図 4.9 は、避航開始時機 (T_1) 以外の避航に伴う操舵時機 (T_2 から T_4) を図 4.7 の上に重畳してい

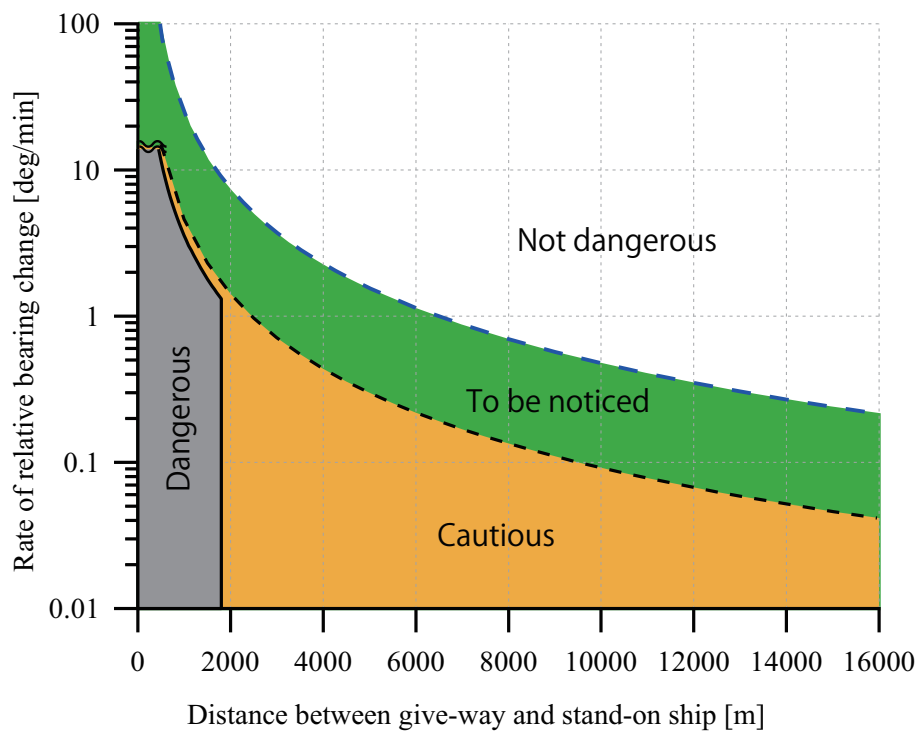


図 4.7 衝突危険度（領域）の仮定

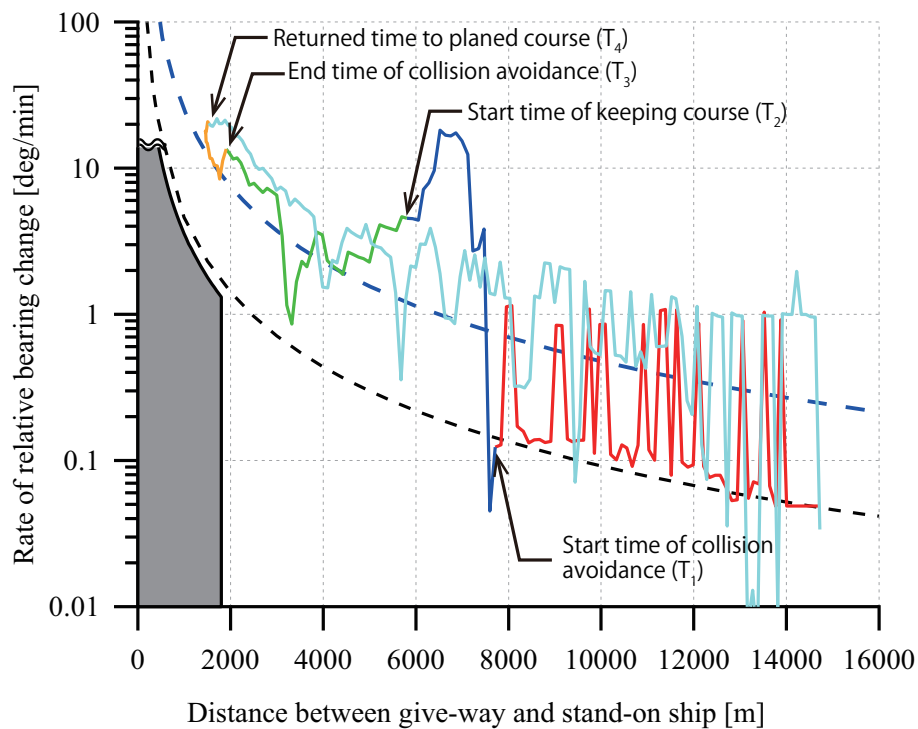
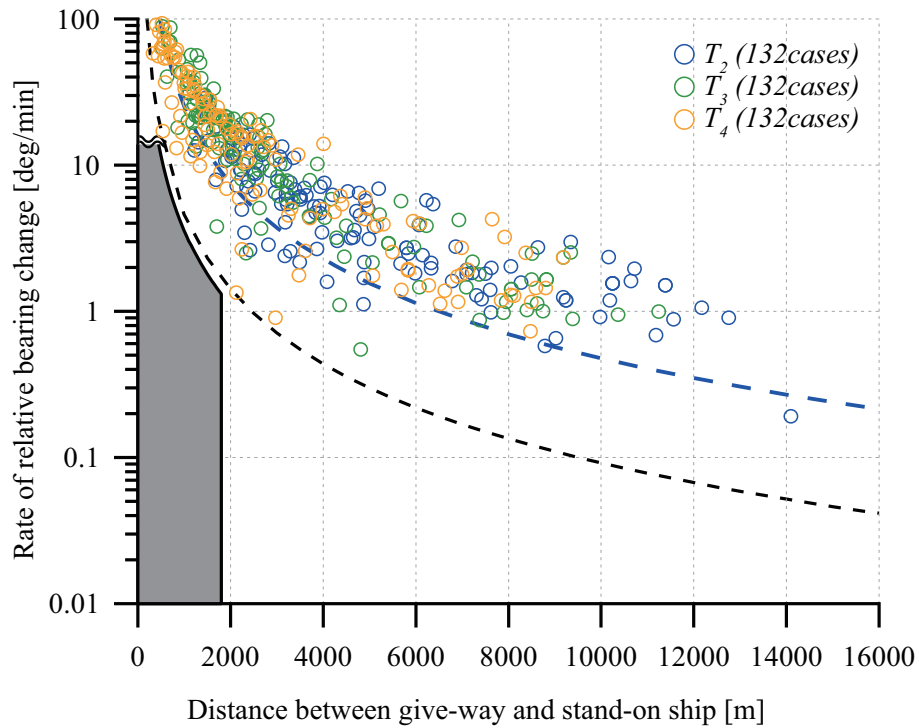


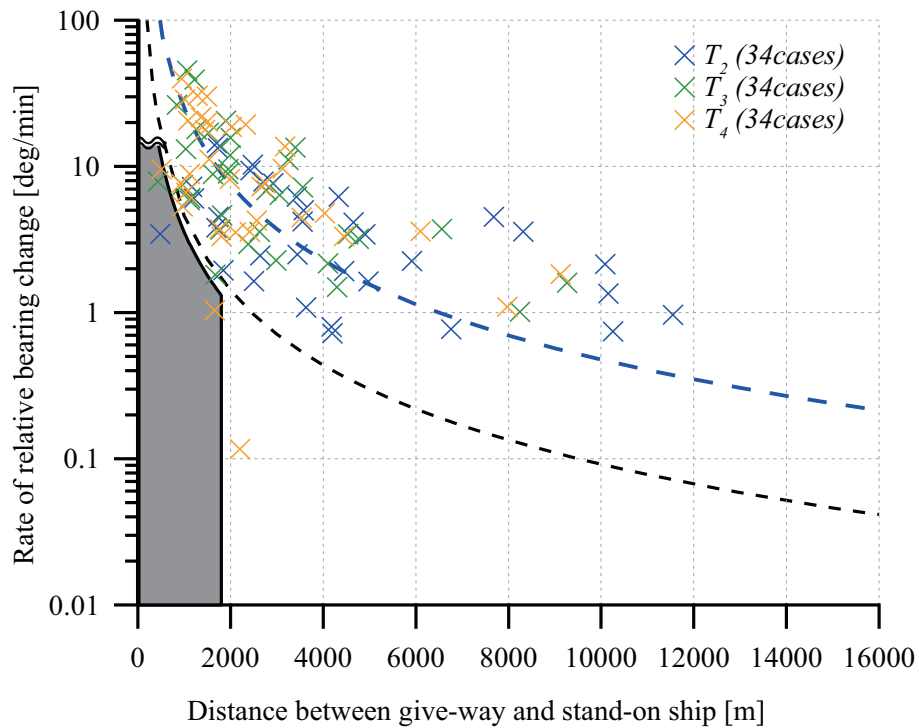
図 4.8 避航における方位変化と相対距離の時間変化

る．図 4.9 (a) は、航跡が示す最終的な結果として、針路保持船が避航義務船の前方を通過したケース、(b) は針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースを示しており、それぞれ 132 ケースと 34 ケースである．図 4.9 (a) ではほとんどの操舵時機が上方限界の上方に分布しているが、(b) では上方限界を中心としてその上下方に操舵時機がほぼ均等に分布していることがわかる．すなわち、避航義務船の操船者にとって、二船の方位変化と相対距離が同じであるならば、針路保持船が避航義務船の前方を通過する状況よりも、針路保持船が避航義務船の後方を通過する状況が許容しやすいと言える．

本研究において、最終的には二船間の衝突危険度の評価方法を自律航行船舶へ適用することを目的としていることから、海上衝突予防法に従って避航義務船が針路保持船を避航するときの状況として針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースをもとに衝突危険度を設定する．表 4.3 は、図 4.9 (a) に示す針路保持船が避航義務船の前方を通過した 132 ケースのそれぞれの操舵時機が、避航実施の上限の上下方のどちらに分布しているかを示している．表 4.3 が示すように、ほとんどの操舵時機 (T_2 から T_4) が避航実施の上限よりも上方に分布していることがわかる．したがって、上方限界は安全と要監視の領域の境界線として妥当であると言える．



(a) 避航義務船の前方を針路保持船が通過したケース



(b) 避航義務船の後方を針路保持船が通過したケース

図 4.9 衝突危険度と避航に伴う操舵時機 (T_2 から T_4) の関係

表 4.3 避航ケースと避航実施の上限の位置関係

操舵時機の区別	上方	下方	合計
変針角保持時機 (T_2)	118	14	132
避航終了時機 (T_3)	121	11	132
復帰終了時機 (T_4)	105	27	132

4.4 衝突危険度の評価方法

4.4.1 衝突危険度（領域）の定義と妥当性の検証

1) 衝突危険度の定義

二船間の衝突危険度を図 4.7 をもとに定義する．図 4.7 の領域の境界線は，(4.1) 式（注意と要監視の境界線）と (4.4) 式（要監視と安全の境界線）で表され，その一般式は，方位変化 $\dot{\theta}$ [deg/min] と相対距離 D [m] を用いて (4.5) 式である．

$$\dot{\theta} = a \cdot D^b \quad (a, b = \text{const.}) \cdots \cdots (4.5)$$

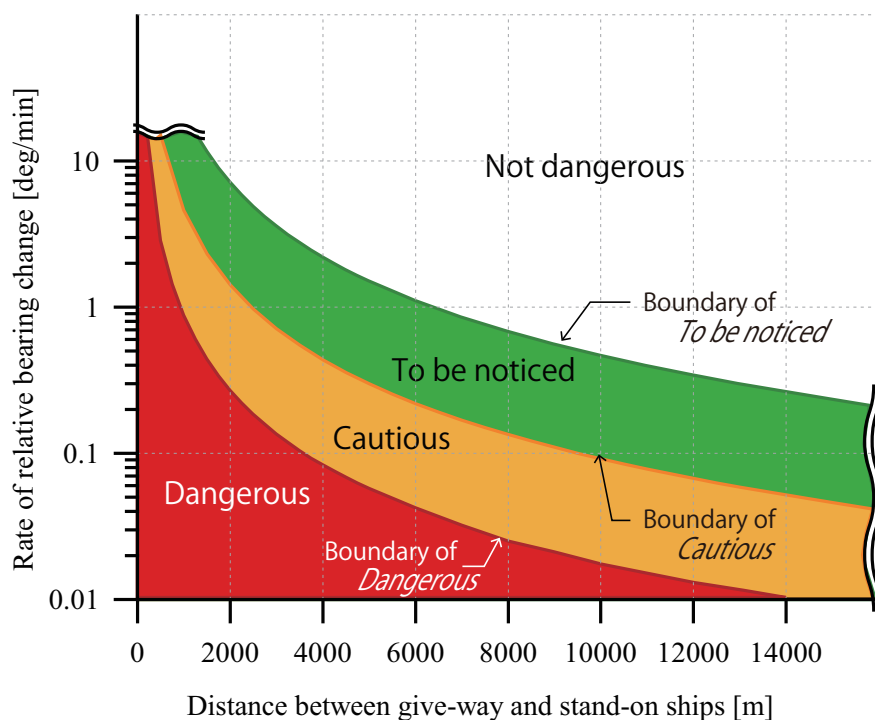


図 4.10 危険の領域を再定義した衝突危険度（領域）

表 4.4 領域の境界線を示す係数

境界線	a	b	境界線の位置
危険の境界線	$1.1 \cdot 10^5$	-1.7	危険と注意の領域の間
注意の境界線	$5.8 \cdot 10^6$	-1.7	注意と要監視の領域の間
要監視の境界線	$3.0 \cdot 10^6$	-1.7	要監視と安全の領域の間

表 4.5 衝突危険度（領域）の定義

領域	範囲	状態
危険の領域	危険の境界線以下	ただちに避航が 必要な状態
注意の領域	危険の境界線より上 かつ 注意の境界線以下	避航することを 強く推奨する状態
要監視の領域	注意の境界線より上 かつ 要監視の境界線以下	操船者が平均的に 避航を開始する状態
安全の領域	要監視の境界線より上	避航が行われない 安全な状態

図 4.7 での危険の領域は原らの衝突危険度の危険領域をもとに設定したものである。その危険領域は原らがレーダー・シミュレータの実験結果から最小二乗法により求めた回帰曲線を境界線として設定したものであるから、その境界線を中心として実験結果が分散している領域があると考えられ、原らの衝突危険度の危険領域と注意領域の間の境界線と、注意領域と安全領域の間の境界線は同じ意味合いを持つ。それはすなわち、図 4.7 の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 ($D < 1,800$) ときの状態であり、その危険の領域は、(4.5) 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と言える。そのときの危険の領域は (4.5) 式の方位変化と相対距離の関係では、注意の領域と等しいにもかかわらず、相対距離のみによって注意の領域から危険が高くなっていることから、危険の領域は、操船者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感じていることを表しており、(4.5) 式で表される方位変化と相対距離による衝突危険度とは別の要因によるものとする。つまり、操船者は常に針路保持船との間に一定以上の相対距離を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。この操船者の心理的な影響を除いたとしても、方位変化と相対距離の関係によって操船者が危険を感じる領域が注意の領域の下方あることが自然と考える。

そこで、4.3.2 項 2) で行った分析と同様に、(4.2) 式の避航開始時機の平均値を表す曲線のまわりに、避航開始時機 (T_1) が分布する 2σ 信頼区間（全体の 95.4%）を求め、方位変化と相対距離の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

し、図4.10に示す。図4.10に示す衝突危険度の領域をわける(4.5)式で表される各領域の境界線の係数、および衝突危険度の領域の定義を表4.4と表4.5に示す。

なお、各領域の間の境界線をその境界線より下方の領域を定義する線として、表4.4に示すように、危険の境界線は危険と注意の領域の間の境界線、注意の境界線は注意と要監視の領域の間の境界線、要監視の境界線は要監視と安全の領域の間の境界線を指すものとする。

2) 妥当性の検証

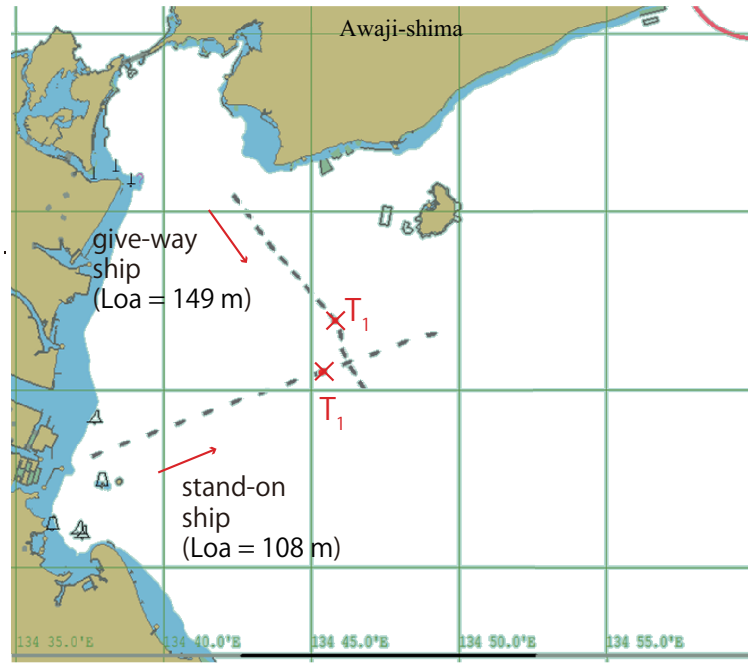
図4.10に示す衝突危険度の妥当性を検証するため、分析に用いた周防灘および伊豆大島から東京湾に至る海域のAISデータから抽出した避航ケース以外に、淡路島の南の海域において観測された避航ケースをAISデータから新たに2ケース抽出した。図4.11(a)および図4.12(a)は、避航義務船と針路保持船の航跡を3分間隔で表示した航跡図に、それぞれの船舶の進行方向と避航開始時機(T_1)での位置を×印で示している。図4.11(b)および図4.12(b)は、避航中の方位変化と相対距離の時間変化を図4.10の上に重畳して示しており、横軸を対数表示にしたものである。(b)の折れ線グラフの色は操舵時機(T_1 から T_4)別を表し、●印から◆印に向かって時間が経過し、避航開始時機(T_1)は赤色から青色に変化するときである。なお、折れ線グラフが折り返しているところは、最小離隔距離を通過したときに相当する。

図4.11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義務船と針路保持船は互いの視野の中にあったと思われる。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、要監視の境界にほぼ平行の状態を保ちながら航行しており、避航義務船と針路保持船の衝突危険度は一定の状態で行っていることを示している。避航を開始した後は、継続して安全の領域を保って航行していることがわかる。次に、図4.12のケースでは、(a)が示すように避航を開始するよりも前は、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。このときの状況は、(b)が示すように互いに視野に入っていないと思われる避航開始時機(T_1)より前では危険と注意の領域になっている。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る、安全な領域を保って航行していることがわかる。最小離隔距離を通過したあとは、要監視の状態にあるが、4.3.2項で述べたように、針路保持船が避航義務船の後方を通過する状況は、避航義務船の前方を通過する状況よりも許容しやすいことからこのケースにおいては要監視であっても避航義務船の操船者にとっては危険を感じない状況であったと考える。

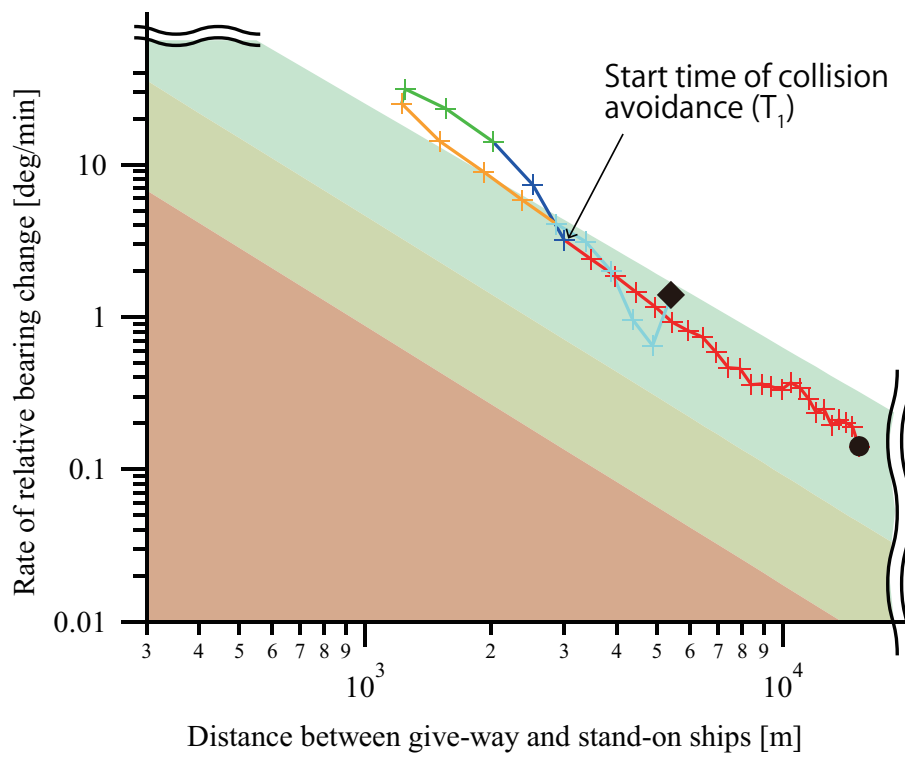
したがって、検証したケースにおいては、図4.10による衝突危険度の評価は妥当であり、実際の操船において多くの操船者は要監視より危険が低い状態を保ちながら航行していると言える。また適切に操船を行った場合は、(4.5)式の関係を保ちながら航行していると言える。

3) 領域と衝突危険度の定量的評価の関係

ここで再び、図4.10を見たとき、4段階の領域として衝突危険度を表現しているが、

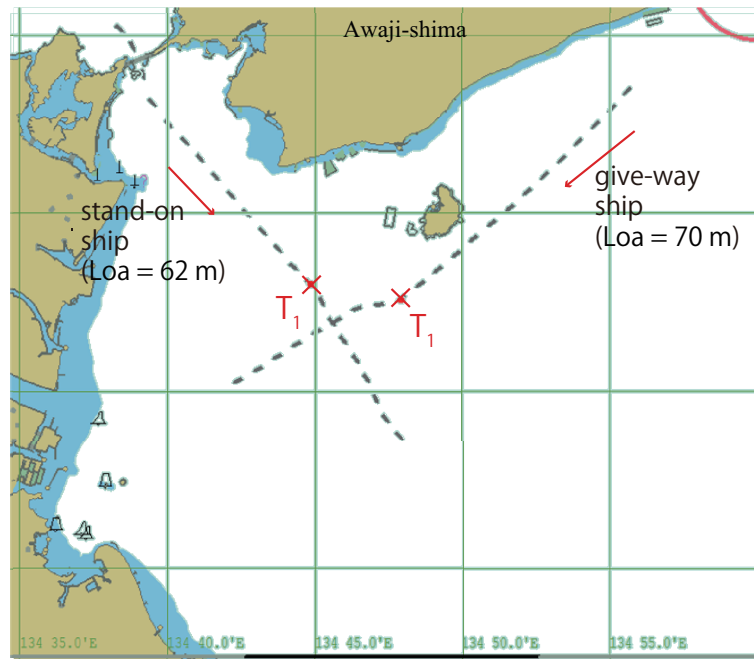


(a) 航跡図

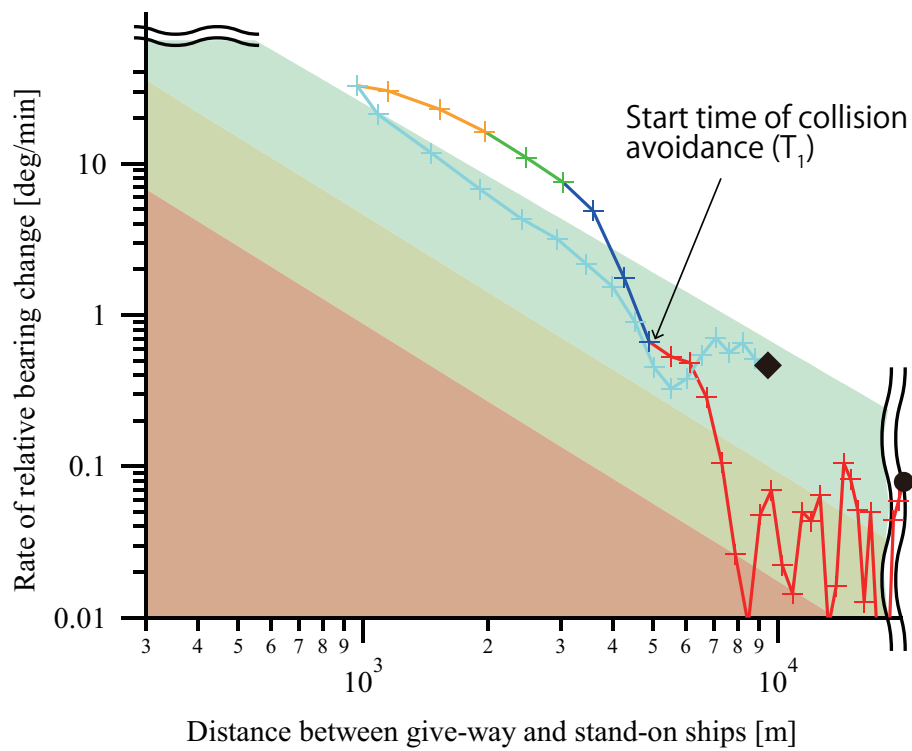


(b) 衝突危険度と避航中の時間変化

図 4.11 淡路島の南の海域から抽出した避航ケース（ケース 1）



(a) 航跡図



(b) 衝突危険度と避航中の時間変化

図 4.12 淡路島の南の海域から抽出した避航ケース（ケース 2）

これらの領域は、方位変化と相対距離の平面上に分布する避航開始時機 (T_1) の信頼区間や既往の研究での実験結果の回帰曲線をもとに、(4.5) 式で表される境界線により4段階にわけたものである。すなわち、それぞれの領域の中には、(4.5) 式の形をもつ曲線が連続して存在しており、(4.5) 式で表される曲線それぞれが、避航義務船と針路保持船の二船間での衝突危険度を表現するものであると言える。

言い換えれば、図4.11 (b) および図4.12 (b) のように方位変化と相対距離の二変数を両対数としたとき、表4.4 に示す係数 a および b を用いて (4.5) 式の一般式で表される衝突危険度は、

$$\log \hat{\theta} = \log a \cdot D^b = \log a + b \log D \cdots \cdots (4.6)$$

となり、傾き b を持つ直線の関係を保ちながら連続的に変化すると言える。

4.4.2 船長および相対速度による影響

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と考えられることから、これらを考慮して一般化された衝突危険度さらに検討する。避航の判断は一般的に分単位で行われることを考慮すると、相対速度 V_r [m/sec] のときに1分あたりに進む相対距離は、 $V_r \cdot \Delta t = V_r \cdot 60$ [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、二船間の相対距離 D [m] を、避航義務船の船長 L_o [m] と相対速度 V_r [m/sec] (付録の図A1 参照) を用いて (4.7) 式のように無次元化する。つまり、(4.7) 式は、相対距離を避航義務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時間を掛けたものであり、これを無次元相対距離 D' と呼ぶ。

$$D' = \frac{D^2}{L_o \cdot V_r \cdot 60} \cdots \cdots (4.7)$$

図4.13 に、図4.10 に照らし合わせて領域別に分類した避航開始時機 (T_1) での無次元相対距離の分布を示す。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示し、下の図は無次元相対距離でみた度数分布を示す。

ほとんどの避航開始時機 (T_1) は、無次元相対距離が0から600の範囲に分布しており、無次元相対距離が大きくなるにつれて分布がまばらになり、無次元相対距離1800以上はほとんど存在していない。そこで、無次元相対距離の分布を確率密度関数で近似し、避航義務船の船長と針路保持船との相対速度を考慮した無次元相対距離を用いて避航開始時機の分布を表現する。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。なお、無次元相対距離が約3,000よりも大きい2ケースは、ほとんどの避航開始時機 (T_1) が分布している範囲 ($D' < 1800$) から大きく逸脱しており、避航開始時機としては特異な状況であると考え分析対象から除外する。

さらに、操船者が危険をより強く感じる状況の方が、避航開始時機に明確な差が現れると考える。4.3.3 項で示すように操船者にとって針路保持船が避航義務船の後方を通過するほうが避航義務船の前方を通過するよりも許容しやすいことから、無次元相対距離が約

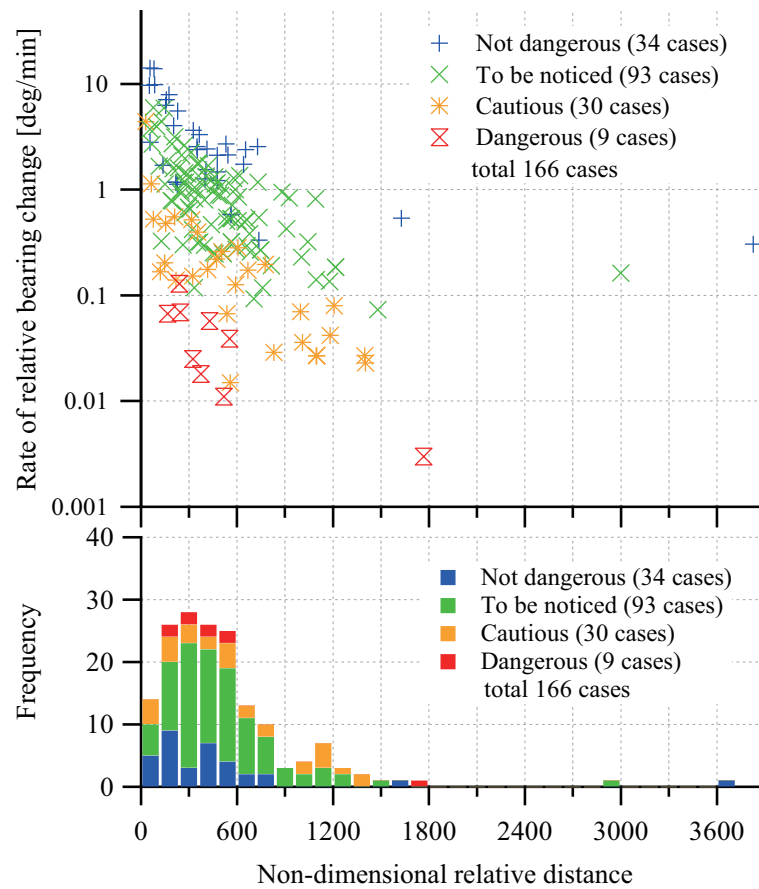
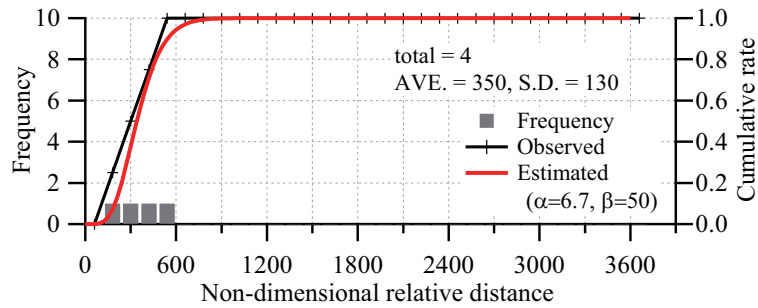
図 4.13 方位変化と無次元相対距離の平面上における避航開始時機 (T_1) の分布

表 4.6 衝突危険度の領域別の内訳

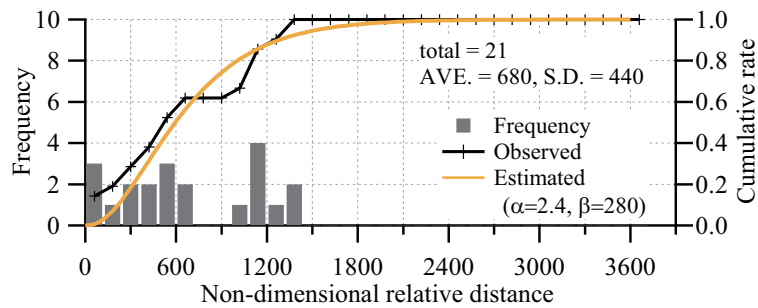
領域	ケース数
危険	4
注意	21
要監視	46
安全	24
合計	95

3,000 よりも大きい2ケースを除く164ケースのうち、避航開始時機 (T_1) における方位変化が正、すなわち針路保持船が避航義務船の前方を通過する状況の95ケースを対象に分析する。表4.6は、95ケースについての衝突危険度の領域別の内訳を示す。

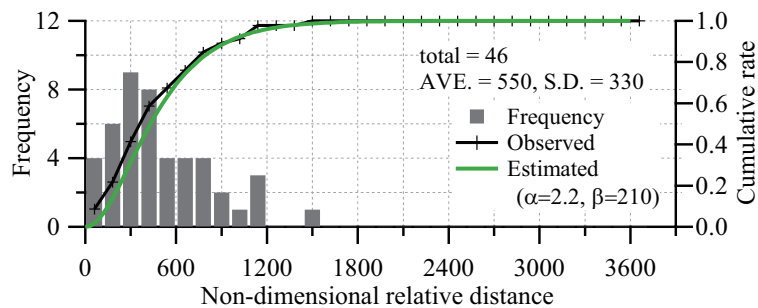
領域別の無次元相対距離の分布からガンマ分布累積分布関数を求めた。図4.14は、無次元相対距離で見た度数（凡例 Frequency）と累積率（凡例 Observed）と、その分布から推定したガンマ分布累積分布関数（凡例 Estimated）を示し、上から順に危険、注意、要監視、安全



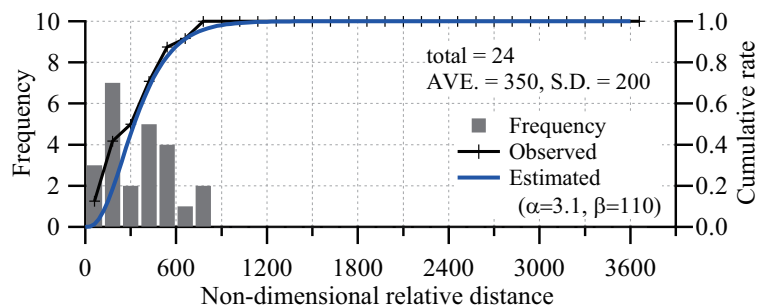
(a) 危険の領域



(b) 注意の領域

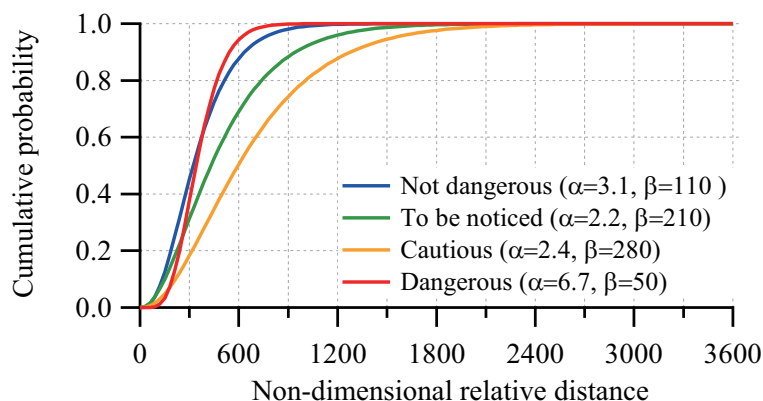


(c) 要監視の領域



(d) 安全の領域

図 4.14 無次元相対距離 D' の度数分布と累積率

図 4.15 無次元相対距離 D' のガンマ分布累積分布関数表 4.7 無次元相対距離 D' のガンマ分布の母数

領域 (Region)	形状母数 (α)	尺度母数 (β)
危険	6.7	50
注意	2.4	280
要監視	2.2	210
安全	3.1	110

の領域である。図 4.14 の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）は累積確率である。さらに，図 4.14 の領域別のガンマ分布累積分布関数を比較するため，それぞれを切り出して図 4.15 に重畳して示す。

図 4.14 の凡例に示す無次元相対距離の平均 (AVE.) と標準偏差 (S.D.) を見ると，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として考えられるが，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と度数分布の累積率（折れ線）とを比較すると，どの領域においても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。

したがって領域別の避航開始時機が，避航船の船長と相対速度を考慮した無次元相対距離により表現できていると言える。また，避航開始時機 (T_1) での無次元相対距離 D' の分布は，表 4.7 に示す母数 α と β を用いて (4.8) 式で表現できる。

$$f(D') = \frac{e^{-D'/\beta}}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} \cdot D'^{\alpha-1} \quad (D' \geq 0) \dots\dots\dots (4.8)$$

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

表 4.8 方位変化と無次元相対距離による領域の境界線を示す係数

境界線	a'	b'
危険の境界線	$2.3 \cdot 10^2$	-0.85
注意の境界線	$1.2 \cdot 10^3$	-0.85
要注意の境界線	$6.3 \cdot 10^3$	-0.85

4.4.3 一般化された衝突危険度の評価方法

1) 一般化された衝突危険度の定義

方位変化と相対距離で表される衝突危険度（図 4.10）を船長および相対速度の影響を考慮した無次元相対距離により表現する．4.4.1 項で示したように，図 4.10 の領域の境界線の一般式は，方位変化 $\dot{\theta}$ [deg/min] と相対距離 D [m] を用いた (4.5) 式で表現される．これを無次元相対距離 D' ，すなわち相対距離 D [m]，避航義務船の船長 L_O [m] と相対速度 V_r [m/sec] を用いて表現すると (4.9) 式となる．

$$\dot{\theta} = a \cdot D^b = a(\sqrt{D' \cdot c})^b = ac^{b/2} \cdot D'^{b/2} = a' \cdot D'^{b'} \dots\dots\dots (4.9)$$

また，(4.9) 式は，両辺を対数をとると

$$\log \dot{\theta} = \log a' \cdot D'^{b'} = \log a' + b' \log D' \dots\dots\dots (4.10)$$

となる．

ここで， a', b', c は，表 4.4 に示す係数 a と b を用いて， $a' = ac^{b/2}$ ， $b' = b/2$ ， $c = L_O V_r \cdot 60$ で表され，避航義務船の船長および相対速度により変化する．一例として，避航義務船の船長 L_O [m] と相対速度 V_r [m/sec] をそれぞれ，分析に用いた 166 ケースの避航義務船の船長の平均 ($L_O = 132$ [m]) および避航開始時機での相対速度の平均 ($V_r = 10.7$ [m/sec]) としたとき， a', b', c は表 4.8 となる．このとき，方位変化と無次元相対距離の平面上に領域として表現すると，図 4.16 となる．なお，各領域の定義は表 4.5 と同様である．

2) 一般化された衝突危険度の妥当性の検証

一般化された衝突危険度の妥当性を検証する．図 4.17 は，4.3.2 項の分析に用いた 166 ケースの操舵時機 (T_1 から T_4) を図 4.16 の上に重畳して示している．

ここでは，166 ケースの避航義務船の船長平均と相速度の平均をもとにした衝突危険度と，それぞれの操舵時機との関係についてみる．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) では要監視の境界線より情報にほとんどが分布しており，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．

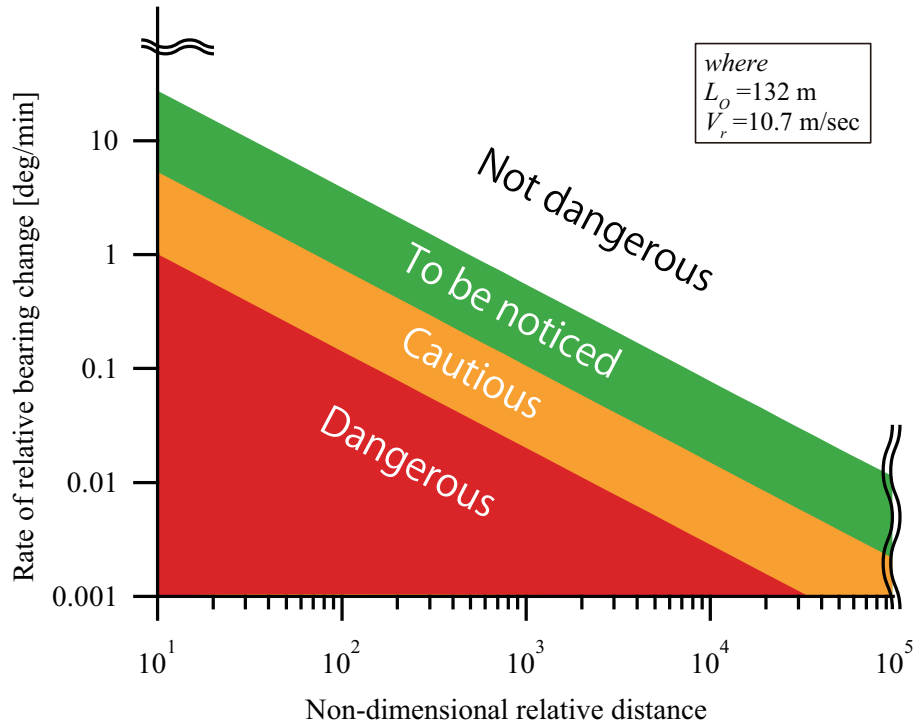


図 4.16 一般化された衝突危険度（領域）の一例

さらに 4.4.1 項 2) での妥当性の検証に用いた淡路島の南の海域から抽出した 2 ケースについて、避航中の時間変化と一般化された衝突危険度の関係を図 4.18 (b) および図 4.19 (b) に示す。折れ線グラフの色は避航に伴う操舵時機 (T_1 から T_4) 別を表し、●印から◆印に向かって時間が経過し、避航開始時機 (T_1) は赤色から青色に変化するときである。図中の 3 本の点線で表される直線は、折れ線グラフでの●印から折り返し地点（最小離隔距離を通過したとき）までの時々刻々変化する避航中の相対距離と方位変化のときに (4.9) 式で表される領域の境界線を示したものである。なお、折れ線グラフでの折り返し地点（最小離隔距離を通過したとき）から◆印までの領域の境界線は、ここでは掲載していないが図中の 3 本の点線で表される直線とほとんど同じ線で表される。図 4.18 (a) および図 4.19 (a) は、図 4.11 (a) および図 4.12 (a) に示す航跡図の再掲である。

4.4.1 項 2) で示した評価結果と同様に、避航を開始した後はどちらのケースも安全の領域を航行していることがわかる。ここでは、4.4.1 項 2) での評価結果との違いについて考察する。図 4.11 と図 4.18 に示すケース 1 では、折れ線グラフの●印のときの状態が、前者では要監視の領域のほぼ中間にあるのに対し、後者では要監視の境界線近くの状態にある。同様に、折れ線グラフの赤色（避航開始時機 (T_1) 以前）の部分、前者の方が後者よりも全体的に要監視の領域内で下方にある。すなわち、船長および相対速度を考慮した図 4.18 の方が、少し危険が低く評価されていることを示す。

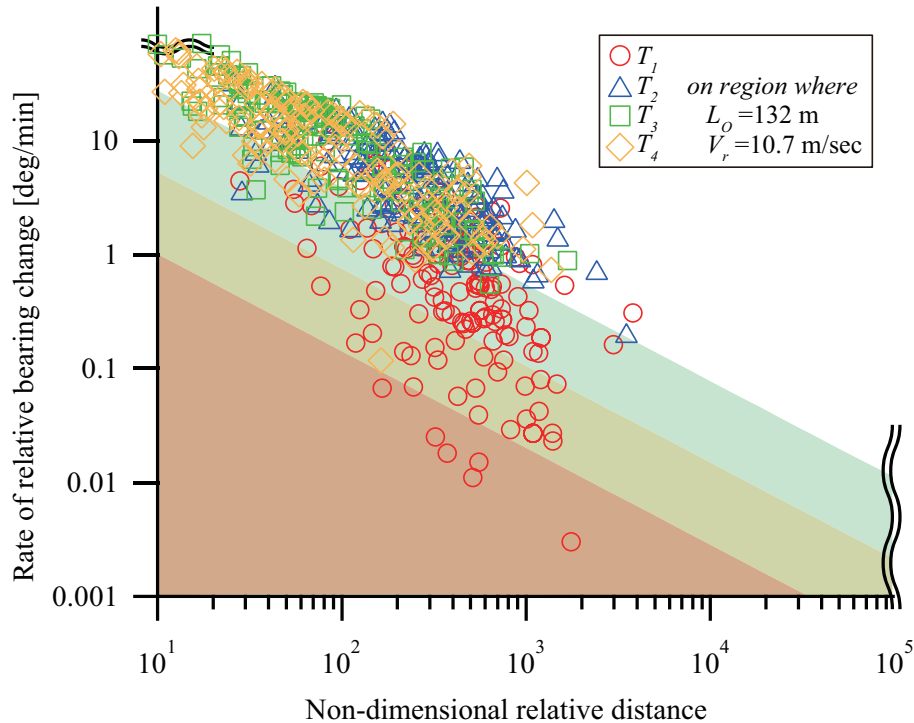
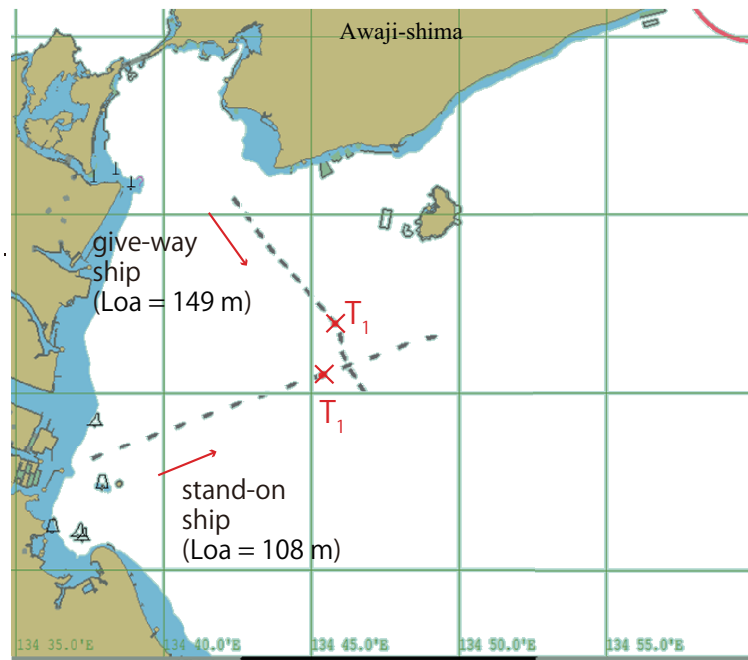


図 4.17 一般化された衝突危険度と操舵時機の関係

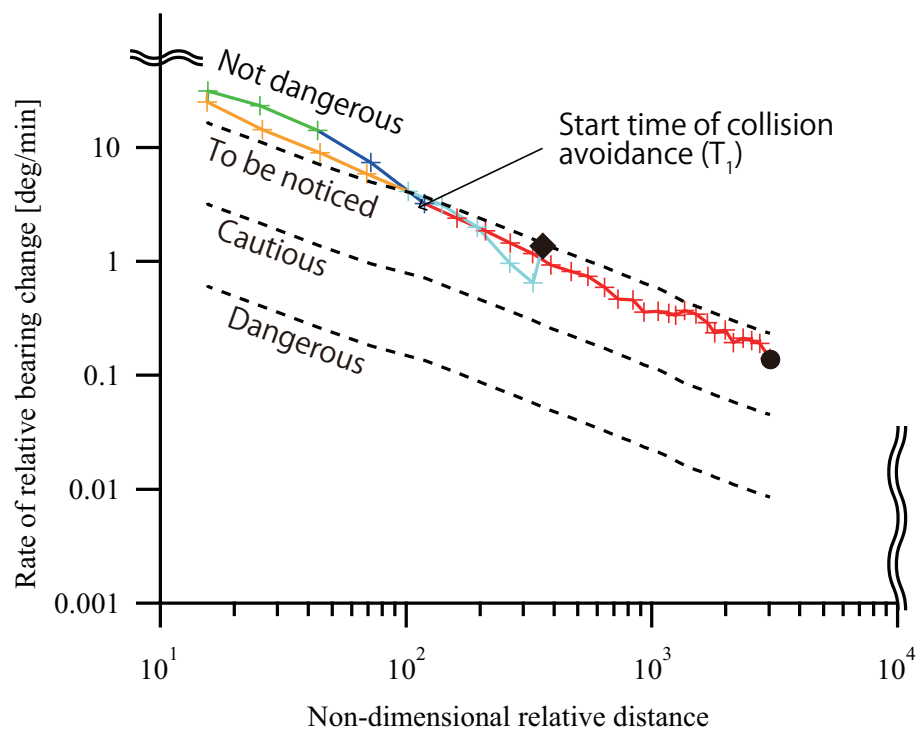
また、図 4.12 と図 4.19 に示すケース 2 では、折れ線グラフの●印のときの状態が、前者では要監視の領域にあるのに対し、後者では安全の領域にあり、船長および相対速度を考慮した図 4.19 の方が少し危険が低く評価されている。ここでは、操船者が、船長および相対速度を考慮しないときと考慮したときの衝突危険度の差をどう評価するかを検証することは困難であるが、少なくとも衝突危険度の評価に大きな影響を及ぼす船長および相対速度を考慮することは重要と言える。また、図 4.18 に示すケース 1 のように、お互いを認識して適切に操船していると思われる状況では、(4.9) 式で表される衝突危険度が大きく変化することなく、ほぼ一定の状態を保ちながら航行し、避航を開始した後も同様にほぼ一定の衝突危険度を保って航行するものと考えられる。さらに避航の一連の行動を方位変化と無次元相対距離の関係で説明できることから、操舵時機による検証、および淡路島の南の海域から抽出したふたつの例に関しては一般化された衝突危険度の評価は妥当であると言える。

4.4.4 衝突危険度の定量的評価

二船間の衝突危険度の定量的評価の手法を示す。例えば図 4.16 に示すそれぞれの領域は、図 4.10 をもとにしたものであるため、4.4.1 項 3) と同様に、両対数グラフとしたときのそれぞれの領域の中には (4.10) 式の形をもつ直線が連続して存在しており、(4.10) 式で表さ

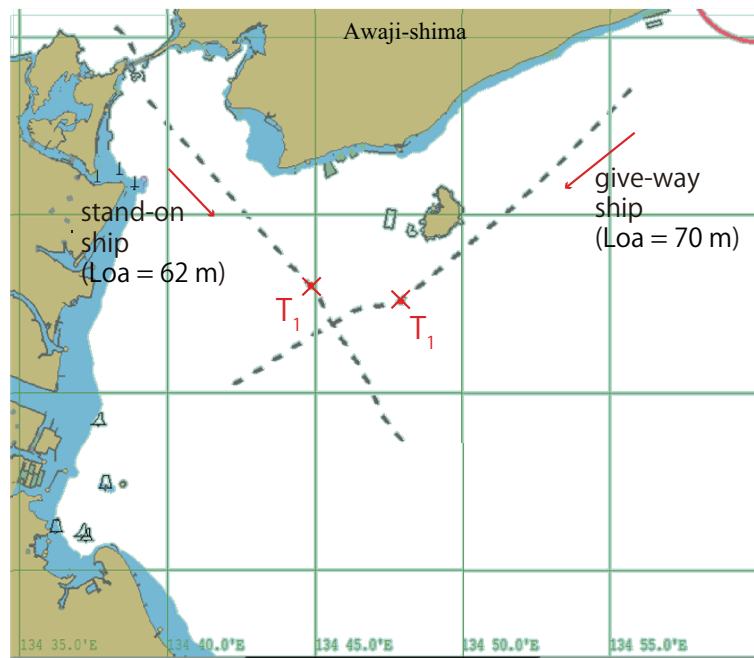


(a) 航跡図 (図 4.11 の再掲)

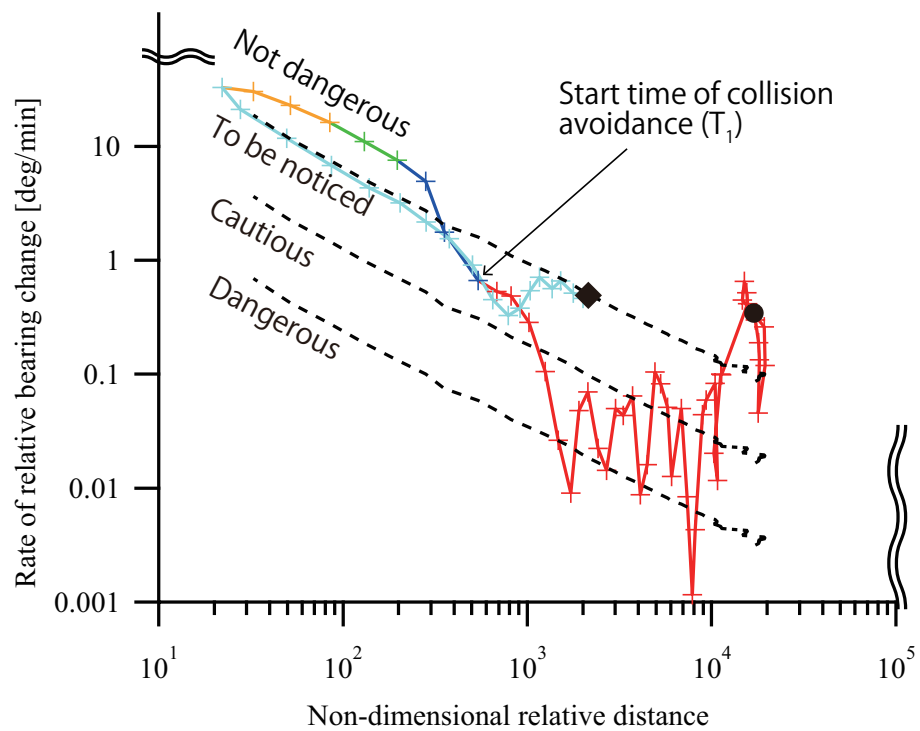


(b) 一般化された衝突危険度と避航中の時間変化

図 4.18 淡路島の南の海域から抽出した避航ケース (ケース 1)



(a) 航跡図 (図 4.12 の再掲)



(b) 一般化された衝突危険度と避航中の時間変化

図 4.19 淡路島の南の海域から抽出した避航ケース (ケース 2)

表 4.9 衝突危険度の定量的評価

領域	衝突危険度
安全の領域	0.0 未満
要監視の領域	0.0 以上
注意の領域	1.0 以上
危険の領域	2.0 以上

れる直線それぞれが、避航義務船と針路保持船の二船間での衝突危険度を表現するものであると言える。すなわち、二船間の衝突危険度は、方位変化 $\dot{\theta}$ [deg/min] と無次元化相対距離 D' の二変数を両対数としたとき、(4.11) 式で表現され、傾き b' を持つ直線の関係を保ちながら、切片 a' によって衝突危険度の大きさが連続的に変化すると言える。

$$\text{衝突危険度} = \log a' - \log \dot{\theta} + b' \log D' \dots\dots\dots (4.11)$$

具体的な衝突危険度の定量的評価としては、表 4.9 に示すように、要監視、注意、危険の境界線が示す衝突危険度をそれぞれ 0.0、1.0、2.0 として、それぞれの領域内の衝突危険度を切片 a' に応じて増減させて表現する。

最後に、操船者が感じる衝突危険度は、例えば図 4.16 が示すように二船が時間的距離的に十分離れている、すなわち無次元相対距離が大きいときは方位変化が支配的であり、時間が経過することにより二船が接近したとき、すなわち無次元相対距離が小さくなったときは方位変化よりも無次元相対距離の影響が支配的となる。これはすなわち、避航義務船の操船者は、針路保持船までの距離が十分離れているときは針路保持船を点として見なして方位変化のみにより二船間の衝突危険度を判断し、針路保持船までの距離が近くなると、方位変化に加えて無次元相対距離、つまり船長および相対速力を考慮して衝突危険度を判断していると考えられる。

さらに、その一連の行動が方位変化と無次元相対距離の関係で表現できることから、避航開始時機はその後の避航に伴う操舵時機を含め、結果として第3章で述べた操船者が避航するかしないかの判断としている前方航過距離もしくは右方航過距離を確保するための行動であり、それら航過距離がすべて方位変化と無次元相対距離の関係で説明できると言える。

4.5 結論

第3章で着目した相対距離に加え、操船者が避航を行う際に用いていると思われるもう一つの指標、相対方位に着目し、避航時機を特定した 199 の避航ケースを統計的に分析して、二船間の衝突危険度を定量的に表現する手法を示した。

まず、避航開始時機について、避航義務船と針路保持船の方位変化と相対距離を分析し以下を示した。

- 操船者の平均的な避航開始時機を表現するため、方位変化別に分類したときの方位変化の平均値と相対距離の平均値を近似したところ、不自然な関係になったことから、ばらつきを含めた避航開始時機が操船者の平均的な避航開始時機を表現することを示した。
- 避航開始時機のばらつきを含めて方位変化と相対距離の関係を分析した結果、ほとんどの避航義務船が避航を開始する時機は、その二変数を用いて表現される平面上に領域として広がっていることを示し、操船者が感じる衝突危険度はその二変数と関係があることを示した。

次に、避航開始時機以外の避航に伴う他の操舵時機にも適用して、

- 別の研究者が操船シミュレータ実験により推定し提案した領域とほぼ一致する形で、方位変化と相対距離の平面上に領域として広がる複数の衝突危険度を定義できること、
- 操船シミュレータ実験により検討された海域よりも遠方にも、その領域が連続的に広がっていること、
- それぞれの領域の境界線が、方位変化と相対距離を両対数としたときに直線の関係になること、

を示した。さらに、相対距離を避航義務船の船長および相対速度を考慮した無次元相対距離として表し、二船間の衝突危険度を方位変化と無次元相対距離により表現して以下を示した。

- 避航開始から原針路へ復帰するまでの一連の避航が、方位変化と無次元相対距離の二変数の関係で説明できることを示し、二船間の衝突危険度がその二変数で評価できることを示した。
- 二変数を両対数としたとき、衝突危険度は直線の関係で表されることを示し、衝突危険度は直線の傾きを一定に保ちながら切片によってその大きさが連続的に変化することを示した。
- 操船者が感じる衝突危険度は、時間的距離的に十分余裕があるときは方位変化のみによって決定され、二船が近づいたときは方位変化に加えて船長と相対速度の影響を加味した無次元相対距離により決定されることを示した。

最後に、避航の一連の行動が方位変化と無次元相対距離の関係で表現できることから、避航に伴う操舵時機はすべて、第3章で述べた操船者が避航をするかしないかを判断する前方航過距離もしくは右方航過距離を確保するための行動であり、それら航過距離はすべて方位変化と無次元相対距離の関係で説明できることを示した。

第5章

結論

本研究では、将来的に有人のトラックコントロールのような自律航行機能を持つ自律航行船舶に人間が乗船した場合に、自律航行機能による避航が操船者の感覚と合致するものであるように、実際の航行中の避航を分析し、それに基づく船舶間の衝突危険度を評価する手法を提案した。

第2章では、AIS データから避航ケースと非避航ケースの抽出を以下の手順で行い、避航に伴う操舵時機 (T_1 : 避航開始時機, T_2 : 変針角保持時機, T_3 : 避航終了時機, T_4 : 復帰終了時機) を特定した。

1. 海域に複数本の仮想ゲートを設定してOD 調査を行い、交通流が交差して避航が発生しやすい見合い関係にある船舶を AIS データから抽出した。
2. 交差する交通流を航行する船舶の AIS データから、10 秒毎の同期した情報に加工した。
3. 同期した情報をもとに、ある程度接近した見合い関係にある避航義務船と針路保持船の二船を抽出し時刻歴データを作成した。
4. 時刻歴データをもとに避航が行われたかどうかを判定し、避航ケースおよび非避航ケースを分類した。

第3章では、操船者が避航を行う際に意識している相対距離に着目して、AIS データから抽出した避航ケースと非避航ケースを比較して避航の特徴を分析した。避航義務船の操船者は、針路保持船が避航義務船の真正面あるいは右正横を通過する際の相対距離（前方あるいは右方航過距離）が一定の値未満にならないように航行していること、さらに避航に伴う操舵時機での針路保持船の相対位置を分析した結果、針路保持船が避航義務船の前方を通過したケースでは、多くの避航義務船は針路保持船が自身の真正面を通過した直後に原針路へ復帰する行動（避航終了時機）を行っていたことから、避航義務船の操船者は、前方航過距離を確保するために避航を行っていると言える。針路保持船が避航義務船の後方を通過したケースでは、多くの避航義務船は針路保持船が自身の右正横を通過した直後に原針路へ復帰する行動（避航終了時機）を行っていることから、避航義務船の操船者は右方航過距離を確保するために避航を行っていると言える。すなわち、前方航過距離もしくは右方航過距離が一定以上か未満かによって、避航義務船の操船者は避航するかしないかを判断していると言える。

次に、避航義務船の操船者が避航の際に確保する前方航過距離は見合い関係および針路保持船の船長に依存し、右方航過距離は針路保持船の船長に依存することを示した。前方航過距離だけが見合い関係に依存する理由は、針路保持船が避航義務船に向かってくる相対速度が見合い関係によって大きく異なること、また、針路保持船が予期しない行動を取った場合でも十分な相対距離を確保することの難易に差があるためと考えられる。したがって前方航過距離は、針路保持船の船長や見合い関係に影響される相対速度に依存すると言える。一方、右方航過距離については、針路保持船は避航義務船の後方を通過した状況であるため、相対速度や針路保持船が予期しない行動への対処行動の難易に差が少ないため見合い関係に依存しなかったと考えられる。

さらに、先に示した避航に伴う操舵時機での針路保持船の相対位置を分析した結果から、避航義務船の操船者が感じる衝突危険度は、針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を通過した直後に減少すると言える。本研究の目的とした自律航行機能を持つ船舶における避航を考えた場合は、予期しない事象が発生したときでも対処できるように、二船間の相対関係を考慮してCPAを通過するまで避航を継続することが望ましいと考える。しかし、操船者に危険を周知するような場合では、針路保持船が避航船の真正面および右正横を通過した後も危険と判定すると、操船者にとっては過大評価となるため、目的に応じて適用する衝突危険度が減少する時機を選択することによって操船者に与える違和感を少なくすることができる。

第4章では、操船者が避航を行う際に用いている避航義務船と針路保持船の方位変化と相対距離に着目し、避航の実態から操船者が感じる衝突危険度を定量的に評価する手法を提案した。避航開始時機に関して避航義務船と針路保持船の方位変化と相対距離を分析した結果、ほとんどの避航義務船が避航を開始する時機は方位変化と相対距離を二変数とした平面上のある領域として広がっていたことから、操船者が感じる衝突危険度は方位変化および相対距離と関係があると言える。

また、避航開始時機以外の避航に伴う他の操舵時機にも適用した結果、別の研究者が操船シミュレータ実験により推定し提案した領域とほぼ一致する形で、この二変数の平面上にいくつかの衝突危険度（領域）として定義でき、しかも、操船シミュレータで適用された海域より遠いところでもその領域が連続的に広がっていること、その領域よりも二変数が大きく安全とされる領域でほとんどの操船者が避航を行っていること、それぞれの領域の境界線が方位変化と相対距離を両対数にしたときに直線の関係になることを示した。すなわち、方位変化と相対距離を軸とする平面を両対数にしたとき衝突危険度は直線の間隔を保ちながら連続的に変化すると言える。

次に、相対距離を避航義務船の船長および相対速度を考慮した無次元相対距離と方位変化の関係で衝突危険度を表現することにより、避航の開始から原針路へ復帰するまでの一連の行動がこのふたつの関係で説明できたことから、二船間の衝突危険度は方位変化と無次元相対距離により評価できると言える。さらに、その二変数を両対数としたとき、衝突危険度は直線の傾きを一定に保ちながら連続的に変化し、衝突危険度の大きさは切片によって決まると言える。避航中の状態量の時間変化と衝突危険度の関係を見ると、適切に操船した場合は衝突危険度がほぼ一定になるように操船者は航行していると言える。操船者が感じる衝突危険度は、無次元相対距離が十分大きいときは方位変化が支配的であり、

無次元相対距離が小さくなるに伴い方位変化よりも船長や相対速度に依存する無次元相対距離の影響が支配的になると言える。結果として、避航開始時機はその後の避航に伴う操舵時機を含め、第3章で述べた操船者が避航をするかしないかを判断している避航義務船の前方航過距離もしくは右方航過距離を確保するための行動であり、それらはすべて方位変化と無次元相対距離の関係で表現される衝突危険度に含まれる。

最後に、本研究では、これまでに類を見ない方法として、AISデータを用いて避航の実態を分析することによって操船者が感じる衝突危険度を客観的かつ定量的に評価する手法を提案した。また、衝突危険度と二船が出合ったときの操船者の行動を、方位変化と無次元相対距離を両対数とした平面上に重畳する表現方法は、すなわち、二船が出合ったときの状態量と衝突危険度の関係が、原因と結果に相当すると言えることから、衝突の事故分析に適用すると事故時の状況が理解しやすくなると考える。以上から、本研究で提案した船舶間の衝突危険度の評価手法は、さまざまな用途に適用することができる有用な手法と言える。

参考文献

- 1) 海上保安庁：海難の現況と対策について ～大切な命を守るために～（平成 27 年版），2016.
- 2) 国土交通省：我が国の船員数の推移，<http://www.mlit.go.jp/common/001017532.pdf>
- 3) 国土交通省：平成 27 年度船員需給総合調査の概要，
<http://www.mlit.go.jp/common/001146560.pdf>
- 4) MUNIN：<http://www.unmanned-ship.org/munin/>
- 5) DNV-GL：ReVolt，<https://www.dnvgl.com/technology-innovation/revolt/index.html>
- 6) Rolls-Royce plc：Remote and Autonomous Ships - The next steps -<http://www.rolls-royce.com/media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>.
- 7) 武田幸男：小特集 III. 自動化船，電気学会雑誌，第 98 巻 6 号，pp. 519-522，1978.
- 8) 土屋睦夫：「高信頼度知能化船」と「造船ロボット」の研究開発 - 運輸技術審議会が答申 -，日本船舶機関学会誌，第 18 巻 1 号，pp. 7-11，1983.
- 9) (財) シップアンドオーシャン財団：内航船近代化のための実証試験事業報告書（平成 9 年度），日本財団図書館 (<http://nippon.zaidan.info/index.html>)
- 10) 公益社団法人 日本海難防止協会：伊豆大島西方海域における安全対策の構築に関する調査研究報告書，2016.
- 11) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構：NEDO：国内初！沖合における洋上風力発電への挑戦 - プロジェクト現場レポート -，
<http://www.nedo.go.jp/fuusha/index.html>
- 12) 伊藤博子，石村恵以子，柚井智洋，工藤潤一：AIS 非搭載船舶を含む船舶通航量の推定について，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第 19 号，pp.327-330，2014.
- 13) 河島園子，伊藤博子，木村新太：交通流解析に基づく洋上発電設備への衝突危険性の検討，日本航海学会講演予稿集，第 4 巻 1 号，pp.58-61，2016.
- 14) 遠藤真，山崎祐介：避航操船における操船者の取得する視覚情報について：昼、夜の影響，日本航海学会論文集，第 86 号，pp.29-37，1992.
- 15) 小林弘明，濱田俊秀，片岡高志：操船シミュレータによる海難の事故分析に関する研究：第拾雄洋丸とパシフィック・アレス衝突事件について，日本航海学会論文集，第 98 号，pp.151-159，1998.
- 16) 西村知久，小林弘明：船舶交通流中を航行する船舶に対する避航操船特性，日本航海学会論文集，第 126 号，pp.31-37，2012.
- 17) 瀧真輝，古莊雅生，藤本昌志，白井伸之介：操船方略の経験による違い，日本航海学会

- 論文集, 第 117 号, pp.199-206, 2007.
- 18) 伊藤耕二, 小林弘明: 単独操船における経験の浅い航海士の行動特性の分析, 日本航海学会論文集, 第 126 号, pp.1-9, 2012.
 - 19) R. MIYAKE, J. FUKUTO, Y. NIWA M. MINAMI: A user test of Automatic Navigational Intention Exchange Support System using an intelligent ship-handling simulator, Proceedings of CAMS 2013, 2013.
 - 20) 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.
 - 21) 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.
 - 22) K. HASEGAWA, J.FUKUTO, R. MIYAKE and M. YAMAZAKI: An intelligent ship handling simulator with automatic collision avoidance function of target ships, Proceedings of INSLC 17, 2012.
 - 23) 原潔: 輻輳海域における避航操船基準の有効性, 日本航海学会論文集, 第 85 号, pp. 33-40, 1991.
 - 24) 長澤明, 原潔, 井上欣三, 小瀬邦治: 避航操船環境の困難度-II: シミュレーションによる評価に向けて, 日本航海学会論文集, pp.137-144, 1993.
 - 25) 井上欣三, 原潔, 金子光浩, 増田憲司: 操船者の危険感に基づく操船環境の評価: 評価指標としての環境ストレス値の定義, 日本航海学会論文集, 第 95 号, pp.147-153, 1996.
 - 26) 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.
 - 27) 今津隼馬, 福戸淳司, 沼野正義: 相手船による妨害ゾーンとその表示について, 日本航海学会論文集, 第 107 号, pp.191-197, 2002.
 - 28) 今津隼馬: 衝突針路を使った OZT 算出方法, 日本航海学会誌 Navigation, 第 188 号, pp.78-81, 2014.
 - 29) ITU-R: Technical characteristics for an automatic identification system using time-division multiple access in the VHF maritime mobile band, Rec. ITU-R M. 1371-5, 2014.
 - 30) 高欣佳, 塩谷茂明: AIS を用いた大阪湾の船舶航行実態解析に関する研究, 土木学会論文集 b3 (海洋開発), 第 69 巻, 第 2 号, pp. I.616-I.621, 2013.
 - 31) 高欣佳, 牧野秀成, 古莊雅生: AIS データを用いた沖待ち船舶の航行実態解析に関する研究, 土木学会論文集 b3 (海洋開発), 第 70 巻, 第 2 号, pp. I.948-I.953, 2014.
 - 32) X.GAO, H.MAKINO, M.FUCHI and M.FURUSHO: Comparison of Navigation Risk between the Seto Inland Sea Route and Open Sea Route by Actual Ship Behavior Analysis, Journal of maritime researches of Kobe University, Vol.6, pp. 9-20, 2016
 - 33) 瀬田広明, 鈴木治, 鎌田功一, 天野宏: AIS を用いた海上交通のリアルタイム解析: ES モデルによる操船困難性評価, 日本航海学会論文集, 第 115 号, pp. 45-50, 2006.
 - 34) 瀬田広明, 大木未来, 白井英夫, 酒出昌寿: 三大湾の海上交通解析: AIS 搭載船の操船困難度評価, 日本航海学会論文集, 第 123 号, pp. 13-19, 2010.
 - 35) 牧野秀成: AIS データを用いた津波の早期検知・通報システムの構築に関する研究-船舶挙動解析による津波の検知-, 土木学会論文集 b3 (海洋開発), 第 70 巻, 第 2 号, pp.

- I.984-I.989, 2014.
- 36) 牧野秀成, 小葉武史: 船舶ビッグデータを用いた津波の動向把握に関する研究, 土木学会論文集 b2 (海岸工学), 第 70 巻, 第 2 号, pp. I.1421-I.1425, 2014.
- 37) Coello, J., Williams, I., Hudson, D. A., and Kemp, S.: An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet, *Atmospheric Environment*, Vol. 114, pp. 1-7, 2015.
- 38) R. MIYAKE, J. FUKUTO, K. HASEGAWA: Procedure for Marine Traffic Simulation with AIS Data, *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 9, No. 1, pp.59-66, 2015.
- 39) 海上交通工学: 藤井弥平, 巻島勉, 原潔, 海文堂, 1981, ISBN4-303-23401-X.
- 40) 松本宏之: アジア太平洋地域における海上交通網を巡る諸問題」調査報告書, シリーズ No. 6 海上交通の安全に関わる基礎研究, シップ・アンド・オーシャン財団, 2002, 日本財団図書館 (<http://nippon.zaidan.info/index.html>).
- 41) 大山雅清: 推薦航路の性格, 日本航海学会誌 航海, 第 37 号, pp. 61-63, 1972.
- 42) 井上欣三, 宇佐美茂, 柴田登紀子: 制約水域における航過距離と離隔距離に関する操船者意識のモデル化, 日本航海学会論文集, 第 90 号, pp. 297-306, 1994.
- 43) 有村信夫, 福戸淳司, 丹羽康之: 船舶の航行環境安全性評価指標に関する研究 閉塞避航領域指標について, 第 116 号, pp.99-106, 2007.
- 44) 序説海上交通工学: 藤井弥平, 海文堂, 1971.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) 図説 海上交通安全法 新訂 12 版: 福井淡, 岩瀬潔, 海文堂, 2010, pp. 10, ISBN978-303-37817-2.
- 48) 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.
- 49) 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.

本論文を構成する論文

1. 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, 2015.
2. R. MIYAKE, J. FUKUTO, K. HASEGAWA: Procedure for Marine Traffic Simulation with AIS Data, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9, No. 1, pp.59-66, 2015.
3. 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.
4. 三宅里奈, 長谷川和彦, 福戸淳司: 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, 日本航海学会論文集, Vol. 135, pp. 43-52, 2016.
5. 三宅里奈, 長谷川和彦, 福戸淳司: 実際の避航操船の行動分析に基づく船舶間の衝突危険の定量的評価, 船舶海洋工学会論文集集, Vol. 24, 2016.12.

謝 辞

本研究は，国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所における重点研究の一部をまとめたものである．また，本論文に含まれる研究の一部は，日本学術振興会科学研究費若手研究(B)(No. JP15K18297)の助成を受けたものである．

本研究を進めるにあたり，非常に多くの方々のお世話になりました．ここに深く感謝の意を表します．

本研究を行うにあたり，研究の趣旨をご理解をいただき，ご多忙中，終始細部にわたるご指導とご助言を賜りました大阪大学 長谷川和彦教授に，心より感謝の意を表します．

論文に審査に際しましては，大阪大学 梅田直哉教授，鈴木博善准教授，および神戸大学 橋本博公准教授には，本論文の作成に際しご指導をいただきました．ここに謝意を表します．

海上技術安全研究所 運航・物流系長 福戸淳司氏には，研究全般にわたりご助言とご指導を賜りました．東京海洋大学先端科学技術研究センター 井上一規教授には，AISデータを使用する海域の選定において貴重なご助言をいただきました．海上技術安全研究所 運航・物流系嘱託職員 三木幸寿氏には，衝突危険度の妥当性検証において多大なご助力をいただきました．株式会社日本海洋科学 専務取締役 中村紳也氏，同海事事業グループ 増田憲司氏および北山行一氏には，衝突危険度の妥当性の検証方法について貴重なご助言を頂きました．ここに，心より感謝申し上げます．

海上技術安全研究所の運航・物流系をはじめ多くの職員の方から，研究に取り組む姿勢等のご助言と研究活動に対して激励を頂きました．厚く御礼申し上げます．

最後に，研究活動を常に応援してくれた両親へ感謝申し上げます．

付録 A

「方位変化と相対距離」と「DCPA と TCPA」の関係

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 の相対位置関係を図 A1 のように定義する²⁰⁾⁴⁹⁾.

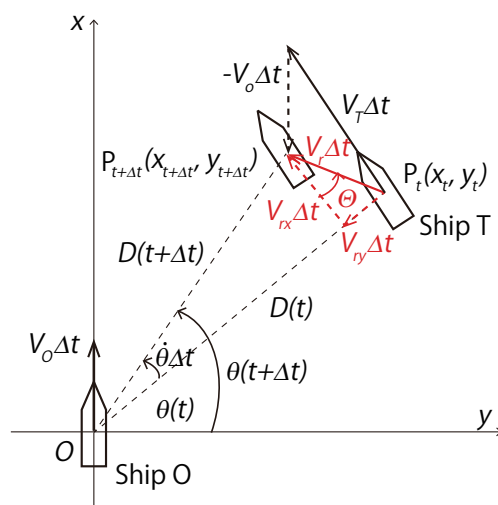


図 A1 Relative relation between Ships O and T in small time difference Δt

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

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

となり, 相対距離 D に比例する. 一方, $DCPA$ は

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

である. 一方, 図 A1 より, V_{rx} は θ が小さければ

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

となるので

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

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，(4.5) 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

$$D = T CPA \cdot V_{ry} \dots\dots\dots (A5)$$

$$\dot{\theta} = D CPA \cdot \frac{V_{ry}}{D^2} \dots\dots\dots (A6)$$

となり，(4.5) 式の左辺は

$$\dot{\theta} = D CPA \cdot \frac{V_{ry}}{D^2} = \frac{D CPA}{T CPA^2 \cdot V_{ry}} \dots\dots\dots (A7)$$

となる．さらに，(4.5) 式の右辺は

$$a \cdot D^b = a(T CPA \cdot V_{ry})^b = a(T CPA^b \cdot V_{ry}^b) \dots\dots\dots (A8)$$

となる．すなわち (4.5) 式は，

$$D CPA = a \cdot V_{ry}^{b+1} \cdot T CPA^{b+2} \dots\dots\dots (A9)$$

となり，結局，方位変化 $\dot{\theta}$ と相対距離 D を用いて (4.5) 式で表される衝突危険度は， $TCPA$ と $DCPA$ を使っても表すことができる．

さらに，(A9) 式を，

$$D CPA = a'' \cdot T CPA^{b''} \dots\dots\dots (A10)$$

と表したとき，避航義務船の船長 L_O [m] を用いて $D CPA' = D CPA / L_O$ とおくと，

$$D CPA' \equiv D CPA / L_O = \frac{a''}{L_O} \cdot T CPA^{b''} = a''' \cdot T CPA^{b''} \dots\dots\dots (A11)$$

ここで， a', b', c は， $a' = a c^{b/2}$ ， $b' = b/2$ ， $c = L_O V_r \cdot \Delta t$ であるから，

$$a' = a \cdot (L_O V_{ry} \cdot \Delta t)^{b/2} = a L_O^{b/2} \cdot V_{ry}^{b/2} \dots\dots\dots (A12)$$

である．また，(A9) 式において， $a'' = a \cdot V_{ry}^{b+1}$ であるから，

$$a''' = \frac{a''}{L_O} = \frac{a}{L_O} \cdot V_r^{b+1} = a \cdot \frac{L_O^{b/2} \cdot V_{ry}^{b+1}}{L_O^{b/2} \cdot V_{ry}^{b+1}} \cdot \frac{V_{ry}^{b+1}}{L_O} \dots\dots\dots (A13)$$

となり、さらに (A12) 式の関係から、

$$a''' = \frac{a''}{L_O} = \frac{a}{L_O} \cdot V_r^{b+1} = a \cdot \frac{L_O^{b/2} \cdot V_r^{b+1}}{L_O^{b/2} \cdot V_{ry}^{b+1}} \cdot \frac{V_{ry}^{b+1}}{L_O} = a' \cdot L_O^{-1-b/2} \cdot V_{ry}^{b+1-(b+1)} = \frac{a'}{L_O^{1+\frac{b}{2}}} = \frac{a'}{L_O^{\frac{b+2}{2}}} \dots\dots (A14)$$

である。また、(A9) 式と $b' = b/2$ の関係より

$$b'' = b + 2 = 2b' + 2 = b' + b' + 2 = b' + \frac{b}{2} + 2 = b' + \frac{b+2}{2} \dots\dots\dots (A15)$$

である。よって、(A11) 式は、(A14) 式および (A15) 式の関係から、

$$DCPA' = \frac{a'}{L_O^{\frac{b+2}{2}}} \cdot TCPA^{b''+\frac{b+2}{2}} = \frac{a'}{L_O^{\frac{1}{2}(2b'+2)}} \cdot TCPA^{b'+\frac{2b'+2}{2}} = \frac{a'}{L_O^{b'+1}} \cdot TCPA^{2b'+1} \dots\dots\dots (A16)$$

となる。

これはすなわち、(4.9) 式で表される

$$\dot{\theta} = a' \cdot D'^{b'}$$

と同じである。

したがって、本研究では、操船者が避航の際に用いていると思われるふたつの指標として方位変化と相対距離に着目し、その関係を一般化した方位変化と無次元相対距離によって衝突危険度を表現したが、それは結局 DCPA と TCPA の関係で表現できる。

付録 B

避航抽出アルゴリズムについて

B1. 避航抽出アルゴリズムの手順

本研究で用いた避航抽出アルゴリズムについて紹介する。

図 B1 に示すアルゴリズムは、2.3.2 項で作成した時刻歴データを用いて、避航開始時機 (T_1) を特定し避航の有無を機械的に判別するものである。横切りの見合い関係にある避航義務船と針路保持船の二船を例に避航抽出アルゴリズムの手順を示す。図 B2 (a) は二船の航跡と矢印が示すおよその進行方向、(b) は相対航跡と以降に述べる避航アルゴリズムでの探索点 (Te_1 , Te_2 , Te_3) を示している。また、図 B3 は、後述する平滑化を行ったあとの時系列データのうち、避航義務船の船首方位、速力、および針路保持船との $DCPA$, $TCPA$ を抜粋し、横軸を時間 [sec] としたそれぞれの変数についての時間変化を示している。

AIS データは、例えば、変針せず針路を保持する操船を行ったとしても微細な船首方位の変化がある場合はそのままの針路が記録されている。そこでまず、10 秒ごとの時刻歴データの移動平均により平滑化を行い微細な変化を除去する。本研究では、1 分間の運動量をもとに平滑化を行った。

次に、第 3 章で述べたように、避航した結果として前方もしくは右方航過距離が確保されることから、時間的に針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を通過するよりも前に避航を開始 (T_1) すると言える。そこで平滑化した時刻歴データをもとに、針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を通過した時機 (Te_1) を探索する。なお、 Te_1 は、針路保持船が避航義務船の前方を通過した場合においては避航義務船の真正面を通過したとき、針路保持船が避航義務船の後方を通過した場合においては避航義務船の右正横を通過したときである。このとき、複数個の Te_1 が探索された場合は、原点に最も近い点、つまり針路保持船が避航義務船の真正面もしくは右正横を横切ったときの相対距離が最も小さい点を Te_1 とする。

次に、避航を開始した直後に前方もしくは右方航過距離だけでなく $DCPA$ も変化すると考えられることから、 $DCPA$ が急激に上昇し始める時機 (Te_2) を探索する。このとき、避航義務船が行った変針によって $DCPA$ が上昇した場合を避航と捉えるため、避航義務の船首方位が 0.10 [deg/sec] 以上の回頭角速度で変化することを条件に加味している。最後に、変針によって船首方位が急激に変化し始める時機 (Te_3) を探索する。この Te_3 が以下の条件を満足するとき、 Te_3 は避航開始時機 (T_1) に相当するとし、避航を行ったと判定する。

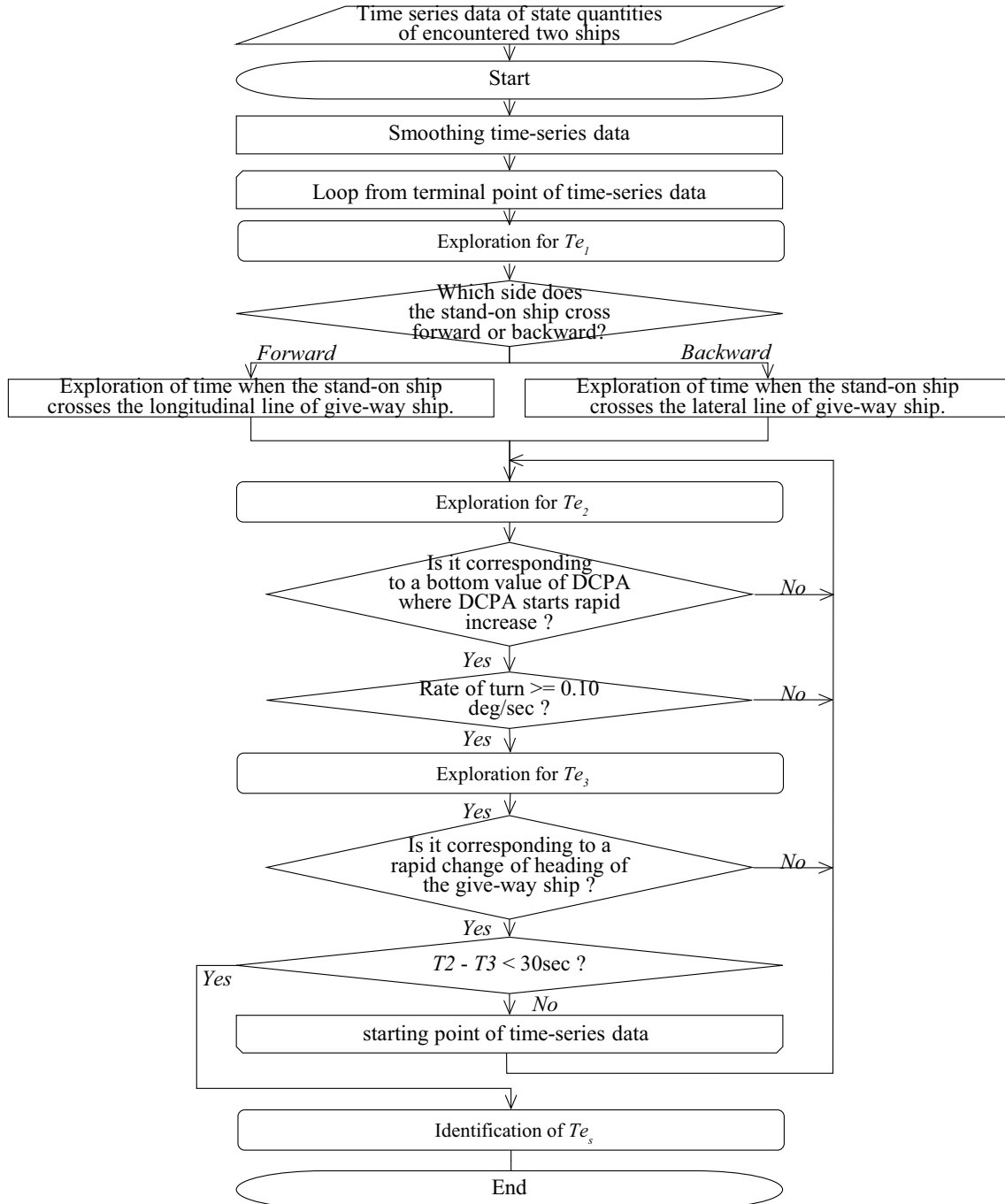


図 B1 避航抽出アルゴリズムの手順

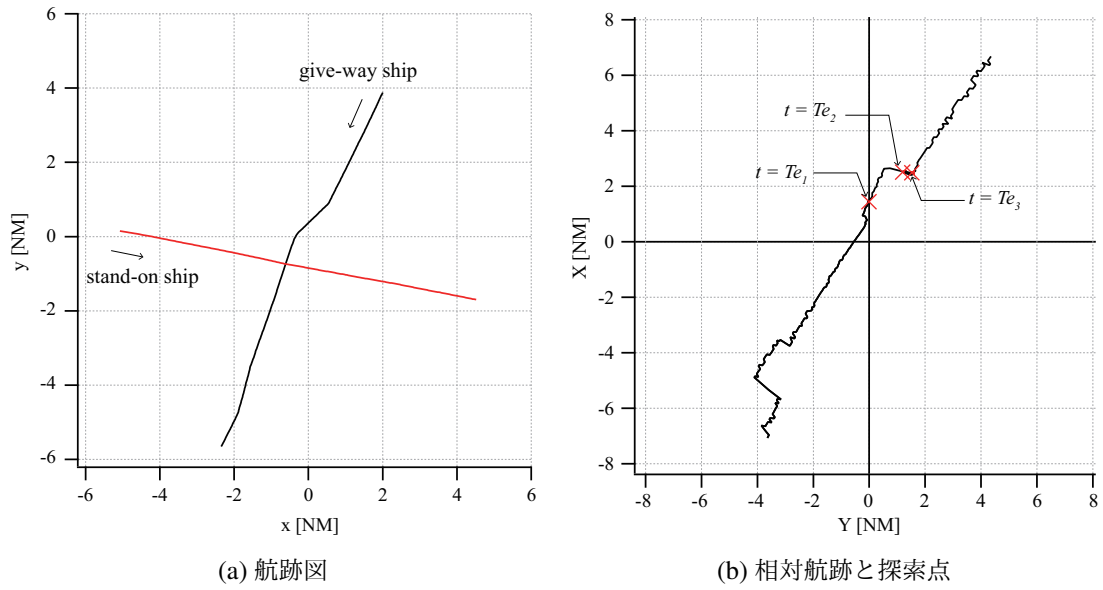


図 B2 航跡図における避航抽出アルゴリズムでの探索点

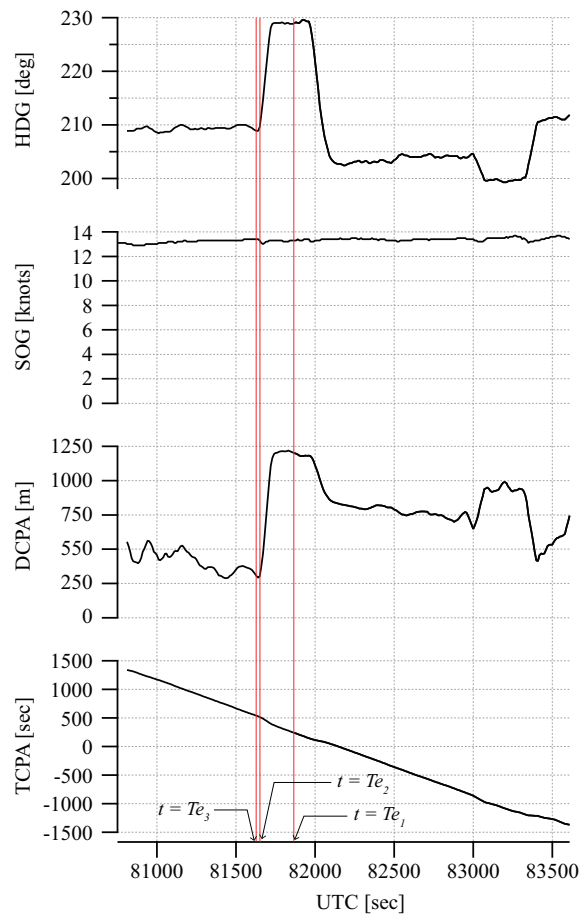


図 B3 平滑化された時刻歴データにおける避航抽出アルゴリズムでの探索点

- Te_1 と Te_2 が特定できること
- 時間的に Te_3 が Te_2 と同じかそれ以前であること
- 時間的に Te_3 と Te_2 の差が 30 秒以内であること

一方で、この Te_3 が条件を満足しなかったときには、避航開始時機 (T_1) が存在していないとし、避航を行わなかったと判定する。

B2. 避航抽出アルゴリズムにおける抽出結果の検証

避航抽出アルゴリズムにより機械的に避航ケースと非避航ケースに判別したケースの検証を行った。手作業で避航の有無および操舵時機を特定した図 2.5 の Situation(C) の 58 ケースについて、避航抽出アルゴリズムにより特定した避航開始時機 (T_1) との差を求め、表 B1 に示す。ここでは、表 B1 には、抽出した避航ケースの状況が、避航義務船が明確に 1 隻の針路保持船を対象に避航したケースと避航義務船の周囲に複数の針路保持船が航行していたケースにわけて示している。

なお、58 ケースのうち、手作業では避航を行ったと判定したにもかかわらず避航抽出アルゴリズムでは避航を行わなかったと判定されたケースが 2 ケースあった。この 2 ケースの詳細を確認すると、変針によって一次的に DCPA が減少していたため、上述した Te_2 が特定できなかったケースであった。

ここでは、AIS データが微細な変動を含んでいること、AIS データが前後の状態量から

表 B1 手作業と避航抽出アルゴリズムによる避航開始時機 (T_1) の差

差 Δt [sec]	ケース数	
	二船間	複数間
$\Delta t = 0$	0	4
$\Delta t = 10$	1	10
$\Delta t = 20$	4	10
$\Delta t = 30$	1	7
$30 < \Delta t < 60$	1	4
$60 \leq \Delta t < 90$	-	3
$90 \leq \Delta t < 120$	-	4
$120 \leq \Delta t < 150$	-	0
$150 \leq \Delta t < 180$	-	1
$180 \leq \Delta t < 210$	-	0
$210 \leq \Delta t < 240$	-	1
$240 \leq \Delta t < 270$	-	0
$270 \leq \Delta t < 300$	-	0
$300 \leq \Delta t$	49	
合計	56	

不連続な特異なデータを含む場合があること、AIS データをもとに同期させた時系列データが誤差を含んでいること、などを考慮して手作業により特定した避航開始時機 (T_1) からの差が 30 秒以内を正しく判定できたケースとする。誤差が 30 秒以内であったケースは、56 ケース中 37 ケース (66.0%) であり、避航しなかったと判別された 2 ケースを含めても 63.8% が機械的に判別することができた。傾向としては、1 回の大きな変針角によって避航を行っていたケースは、手作業で特定した場合と比較して避航開始時機 (T_1) の誤差が小さかった。したがって、この避航抽出アルゴリズムによる避航開始時機の判定の結果は、誤差が大きいケースを含んでいるが概ね妥当であると言える。特に、避航の有無の判別結果についてみると、58 ケース中 56 ケース (96.6%) が避航したと正しく判別できていることから避航の有無の判定については十分な精度を有していると言える。