

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船舶交通環境の危険度評価に関する基礎的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-09-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 月坂, 明広 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1949

博士学位論文

船舶交通環境の危険度評価に関する
基礎的研究

2019 年度

(2019 年 9 月)

月 坂 明 広

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 船舶交通環境の危険度評価の必要性	1
1.1.2 我が国の海上交通環境と瀬戸内海の特異性	2
1.1.3 海上交通安全に資する法規制や航行支援装置の動向	4
1.1.4 海上交通工学におけるバンパーモデルの考え方	6
1.2 既往の研究	9
1.2.1 海上交通環境に関する1960～1990年代の研究	9
1.2.2 海上交通環境に関する2000年代以降の研究	10
1.3 本研究の目的	12
1.4 本論文の構成	13
第2章 研究対象の整理	15
2.1 観測対象海域	15
2.1.1 来島海峡航路	15
2.1.2 解析対象海域の設定	19
2.2 観測システムの概要	20
2.3 観測対象海域における交通実態	21
2.3.1 船種別・総トン数別通航隻数	22
2.3.2 航跡図	23
2.3.3 航跡密度分布図	24
2.4 AIS搭載船の動向	25
2.5 まとめ	26
第3章 解析手法及び解析結果	27
3.1 行会いケースの抽出	27
3.1.1 抽出条件	27
3.1.2 抽出結果	28
3.2 相対航跡	53
3.3 進路交差角と航過距離の計算	59
3.4 解析結果と既往研究結果との比較	60
3.5 バンパーモデルによる正横航過距離と船首航過距離	62
3.5.1 バンパーモデルと航過距離の関係式	62
3.5.2 進路交差角と船首航過距離	64
3.6 まとめ	68
第4章 衝突予測線を利用した評価手法の提案	69
4.1 衝突予測線 (LOPC)	69
4.1.1 LOPCの概要	69
4.1.2 LOPCの計算手順	70

4.2	衝突予測位置 (PPC)	72
4.3	評価方法	74
4.3.1	評価方法の概要	74
4.3.2	評価手順	76
4.3.3	評価指標	78
4.4	任意シナリオによる評価例	79
4.5	まとめ	83
第5章	バンパーモデルによる危険度評価	84
5.1	バンパーモデルによる危険度評価例	84
5.2	実海域データによる解析結果	90
5.2.1	両船共に AIS を搭載している場合	90
5.2.2	両船共に AIS を搭載していない場合	97
5.3	まとめ	101
第6章	結論	102
6.1	結論	102
6.2	今後の課題	105
第7章	参考文献	106
謝辞		109

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 船舶交通環境の危険度評価の必要性

四面を海に囲まれた我が国では、2018年の貿易量（輸出入合計）はトン数ベースで約10億トン、金額ベースで164兆円となっている [1]。このうち海上貿易は、金額ベースで71.9%、トン数ベースで99.6%を海上輸送が占めている [1]。また、食料の6割、エネルギーも約9割は海外から輸入しており [1]、外航海運は必要不可欠な輸送手段となっている。一方、内航海運は、国内貨物輸送の約4割（2017年度、トンキロベース）を担っており、我が国の経済や国民生活を支える上で重要な産業基礎物資である鉄鋼、石油、セメント等については、その約8割を輸送している [2]。このように、外航海運、内航海運ともに、我が国の国民生活や経済活動を支える基幹的輸送インフラとして、極めて重要な役割を果たしている。

我が国周辺海域を利用する船舶には、前段に示す海上輸送貨物など海外から原材料を輸送する巨大タンカー・バルカーやコンテナ船などの一般商船だけでなく、訪日外国人旅行者の増大により近年増加した全長300mを超える大型クルーズ客船など大型化が進む船舶がある一方で、海域を漁場として利用する漁船やクルージング・釣りなどの海洋レジャーとして利用されるプレジャーボート等の小型船、さらには、取締を行う官公庁船、巡視船、艦艇、実習船、工事作業船ほか数多くの利用形態が存在する。

このような我が国周辺海域を利用する多数の船舶、とりわけ一般商船は、国民生活を支える食料や我が国基幹産業を支えるエネルギー・物資の安定的かつ安価な物流サプライチェーンの確保のため、海事関係法令を遵守した安全運航はもとより、定時運航や輸送品質の確保が強く求められる。

しかしながら、我が国の主要港湾の多くは、船舶交通が輻輳し危険性の高い東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の3つの閉鎖性水域に立地しており、安全運航や定時運航、輸送品質の確保が困難な海域となっている。このことは、この3海域が海上交通安全法の適用海域となっており、同法の目的が、「船舶交通が輻輳する海域における船舶交通について、特別の交通方法を定めるとともに、その危険を防止するための規制を行なうことにより、船舶交通の安全を図ること」とされていることから、規制しなければ危険な船舶交通環境にある海域であるということが分かる。

また、前段に述べた船舶交通の輻輳に伴う危険な見合い関係の発生だけでなく、狭水道を通航する際には、海域の地形や風・波浪・潮流などの自然条件による操船の困難度が高い海域も多数存在しており、これら3海域のなかでも瀬戸内海は強潮流かつ狭水道の操船の難所が多い海域となっている。一方で、瀬戸内海は、我が国産業を支える基幹航路として開発保全が必要な国直轄管理航路や緊急確保航路などの重要な水域施設も数多く設定されており、安全性や効率性を確保するため適切な整備・保全も欠かせない重要な海域となっている。

このように、理想的な船舶交通環境を実現するためには、トレードオフの関係にある交通規制と整備・保全による効率性確保の最適なバランス確保が必要であり、バランスの妥当性確認のため船舶交通環境の危険度を適切に評価できる評価手法や指標の開発が必要不可欠である。

なお、本研究における船舶交通環境の危険度とは、航行船舶同士の見合い関係と行会い時の離隔距離に着目し、この離隔距離をベースとした衝突の危険度と定義する。

1.1.2 我が国の海上交通環境と瀬戸内海の特異性

図 1.1.1 は、前段に示す利用形態の異なる船舶について飛行機やセミトレーラ連結車と船舶の長さが概観できるよう図示したものである。これをみると、その大きさの違いが明らかであり、世界最大級のコンテナ船とプレジャーボートを比較すると、180cm の人間と 4cm 程度の昆虫の違いに相当する。

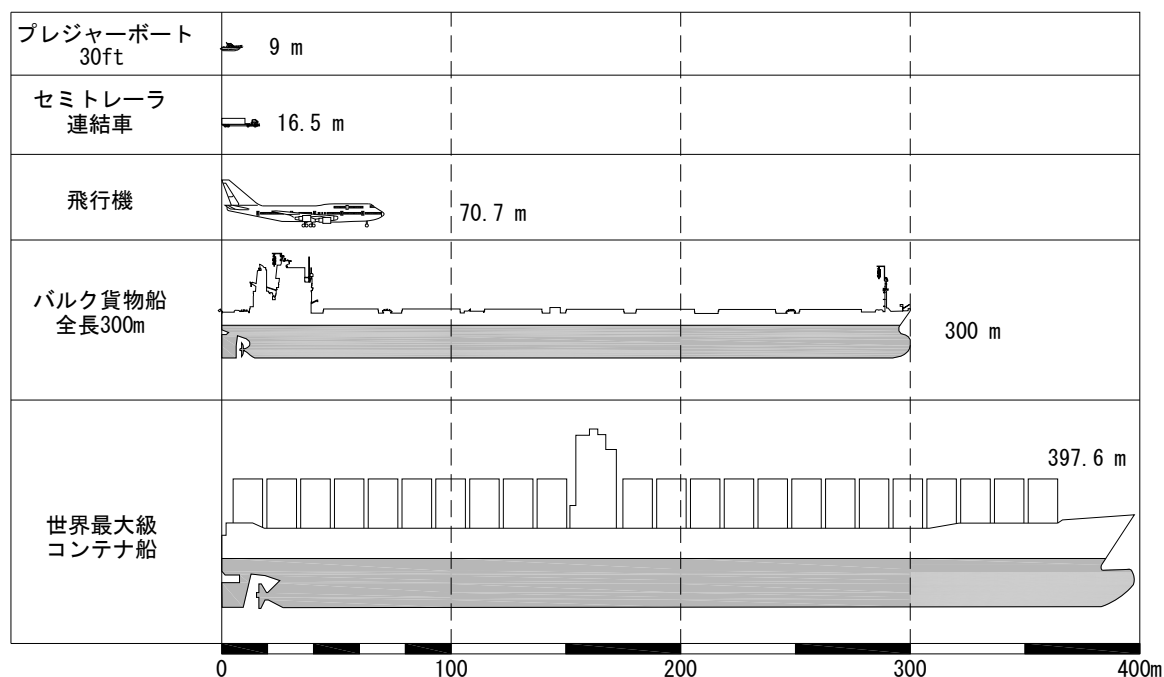


図 1.1.1 飛行機やセミトレーラ連結車と比較した船舶の大きさ

前段までに示したように多種多様な利用形態や長さの異なる船舶が利用する我が国の海上交通環境のなか、強潮流かつ閉鎖性水域として、また船舶の輻輳海域として海上交通安全法に指定された法定航路を有する瀬戸内海について注目してみる。

瀬戸内海は、年間を通じて静穏かつ温暖な海域という良好な自然特性を活かし、大和朝廷時代から北部九州と関西を結ぶ主要航路や朝鮮・中国への使節航路など海上交通の要所として栄え [3]、19～20 世紀の現代にかけて、臨海部には石油化学コンビナートをはじめ、製鉄所、自動車工場、造船所など日本有数メーカーの主力工場が立地している。また、豊富な栄養分を海へと供給する多数の河川を背後に抱える内海特有の海域特性から水産資源も豊富で、良好な漁場として数多くの伝統漁法を営む水産業も盛んな海域となっている。さらに、世界遺産、歴史的景勝地や多数の島が織りなす美しい景観を活かした観光ルートとして外航クルーズ客船の寄港も多く、島しょ部フェリー航路や、釣り・クルージング等のレジャー活動の場としても広く活用されている。

このように、多種多様な海域利用が行われる瀬戸内海は、船舶交通の輻輳する日本有数の海域であり、また、狭水道や潮位の干満差の大きさから複雑な潮流が発生する海上交通の難所が多数存在するため、法律等に基づく海域ごとの安全な通航方法等が定められるなど、海上交通秩序の維持が図られている。

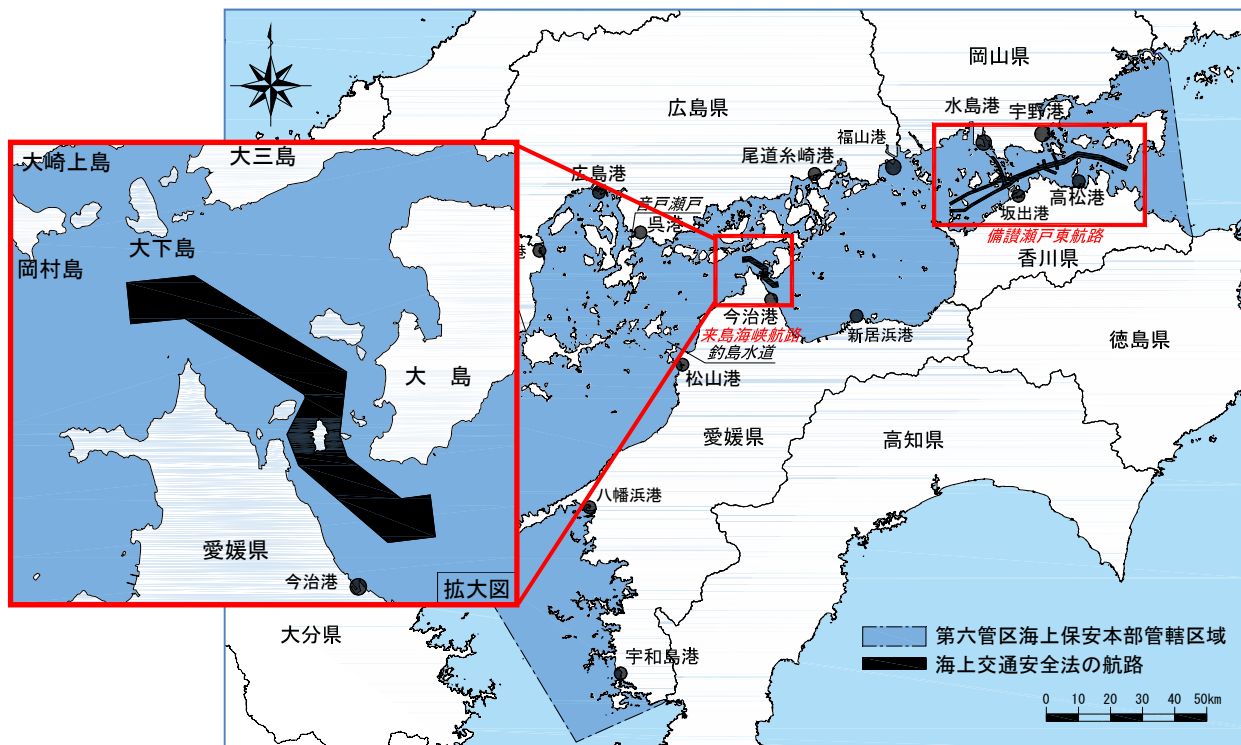


図 1.1.2 海上交通安全法に指定された法定航路を有する瀬戸内海

一方、図 1.1.3 に示すとおり平成 20 年（2008 年）から平成 29 年（2017 年）までの過去 10 年間の全国の管区別要救助海難（一般船舶）の推移 [4] をみると第六管区海上保安本部内の海難発生隻数が最も多く 2,235 隻となっており、10 年間の推移も大きな減少はみられず、**海難事故は後を絶たない現状にある。**

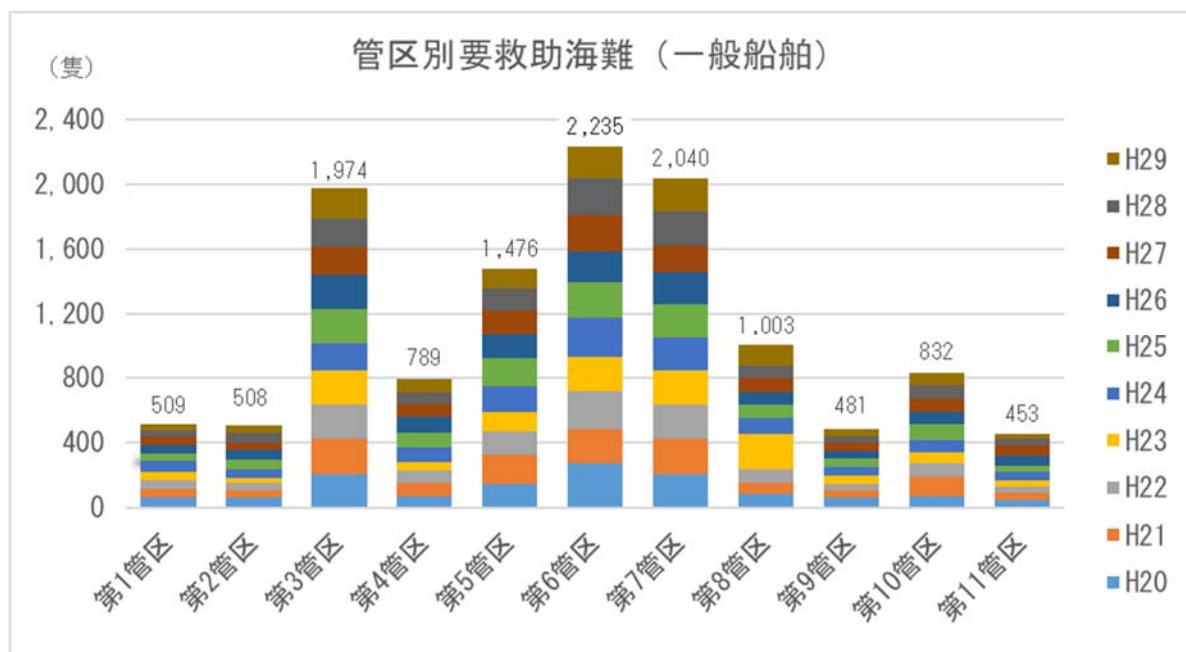


図 1.1.3 管区別要救助海難（一般船舶）

資料：海上保安統計年報 2008（平成 20）～2017（平成 29）年 [4]

1.1.3 海上交通安全に資する法規制や航行支援装置の動向

前項に述べたような我が国の海上交通環境は狭隘かつ船舶輻輳が激しく海難事故が多いという特殊環境にある一方で、世界的にも海難事故が人命に与える影響や海域環境に与える影響が懸念されている。

具体的には、1912年4月に発生し世界に大きな衝撃を与えたタイタニック号沈没事故は、当時世界最大の豪華客船タイタニック号（46,328総トン）がその処女航海において冰山と衝突・沈没した事件（1912年4月14日の深夜、北大西洋上にて発生）で、乗船者約2,200人中、約1,500人の犠牲者を出すという大惨事となった海難事故があげられる [5]。

この事故が船舶の安全に関する措置の国際的な取決め策定へ向けた大きなきっかけとなり、1914年1月に「1914年海上人命安全条約」（1914SOLAS条約）が採択されている（第一次世界大戦の影響により未発効）。この流れを汲み、1974年に船舶の構造、救命設備、無線通信、航行安全、特殊貨物の運送、危険物の運送、船舶の安全運航管理、海上の保安のための措置等を定めた「海上における人命の安全のための国際条約」（1974SOLAS条約）が発効されている [2]。

また、1989年にアラスカのプリンス・ウィリアム湾において座礁により約4万トンの原油が流出したVLCCエクソンバルディス号（214,861DWT、船齢3年）による油流出事故 [6]も記憶に残る重大海難事故として有名である。この油流出により2,400kmにわたる海岸線が汚染され、米国沿岸での過去最大規模（対策費用約20億ドル）と言われる甚大な海洋汚染を引き起こした [7]。

この事故を契機として、国際海事機関(IMO)において、事故の再発防止対策が検討され、大規模な油流出事故への国際協力の枠組みを定めたOPRC条約が1990年に締結され、さらに、1992年には海洋汚染防止条約(MARPOL)が改正され、タンカーに二重船殻構造が強制化された [6]。

1990年以降の海難事故では、1997年1月に日本海沖で発生したタンカー「ナホトカ号」事故 [6]、1999年12月にフランス・ブルターニュ沖で起きたタンカー「エリカ号」事故 [6]、2003年にスペイン沖で発生したタンカー「プレスティージュ号」事故 [5]、2012年1月にイタリア中部沖で発生したクルーズ船「コスタ・コンコルディア号」事故 [5]など世界での重大事故も多いが、国内に目を向けてみると、2008年2月に千葉県野島埼南方海域において発生した護衛艦「あたご」と漁船「清徳丸」衝突事故 [8]、2009年10月に関門海峡航路において発生したコンテナ船CARINA STAR 護衛艦くらま衝突 [8]、2014年1月に広島県阿多田島東方沖において発生した輸送艦おおすみプレジャーボートとびうお衝突事故など [8]国内での重大事故も多発している。

1990年以降、海難事故が多発するなか、船舶を識別することにより衝突防止に役立つ情報を提供することなどを目的として、2002年（平成14年）7月1日には、SOLAS条約（海上における人命の安全のための国際条約）に基づく国内法である船舶安全法改正の施行により、2008年までの猶予期間を経て、船舶自動識別装置（Automatic Identification System）（以下、「AIS」という。）の搭載が義務付けられた。同法に基づく船舶設備規程におけるAIS搭載義務の根拠法令概要を表1.1.1に示す。

表 1.1.1 AIS搭載義務の根拠法令概要

＜船舶安全法施行令に基づく 船舶設備規程（施行日：平成14年7月1日）～抜粋～＞

第146条の29 総トン数300トン未満の旅客船及び総トン数300トン以上の船舶であって国際航海に従事するもの並びに総トン数500トン以上の船舶であって国際航海に従事しないものには、機能等について告示で定める要件に適合する船舶自動識別装置を備えなければならない。ただし、管海官庁が当該船舶の航海の態様等を考慮して差し支えないと認める場合には、この限りでない。

船舶の総トン数	国際航海への従事の有無	
	従事	非従事
300トン未満	旅客船	なし
300トン以上	全船舶	なし
500トン以上	全船舶	全船舶

このような重大海難事故を踏まえた条約や国内法改正を経て、AISの搭載が義務化されてからは、船種や長さ、仕向港などの静的情報に加え、針路や速力などの動的情報を互いに共有することによりAIS搭載船同士の操船意図が明確になり衝突の未然防止措置が図り易くなったと考えられる。このため、AISは、画期的な操船支援装置であったといえる。

しかしながら、このように近年急速に普及したAISではあるが、500総トン未満の内航船舶や小型船舶などAISを搭載しない船舶も多く、図1.1.4に示すとおり海難事故に占める小型船舶の割合が多いことからAIS情報の共有が課題となっている。

このため、**AIS搭載船とAIS非搭載船では、情報量が異なるため船舶の行き会い状態における避航操船方法が異なるのではないか**という仮説を考え、研究を進めた。

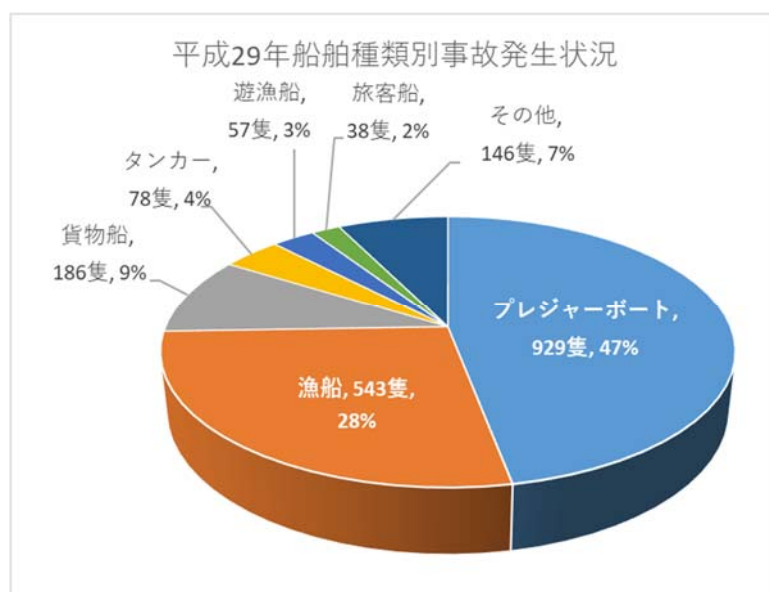


図 1.1.4 平成29年船舶種類別事故発生状況

資料：海上保安レポート2018 [9]

1.1.4 海上交通工学におけるバンパーモデルの考え方

海上交通工学において、バンパーモデルは、自船の周囲のみの閉塞領域を楕円等でモデル化され、他船を点で表現するケースが多い。具体的には、自船、他船ともに中心点あるいは船橋位置を考慮した操船者の視点を中心点とみた場合に他船の中心点が進入しないよう他船の進入を避ける領域、すなわち、避航動作を開始する領域を空間としてモデル化したもので、藤井弥平ら [10] により提案された避航領域をベースとした考え方である。

これらの考え方には、他船（一方の船）を点として捉えた閉塞領域（通常の航行状態において、他船が入りこまない自船まわりの領域）と自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つ2つの考え方があり次のとおりである。

(1)他船を点として自船の周りにバンパーを持つ場合

他船を点として自船周りにバンパーを持つモデルを紹介する。

一つ目は、他船の相対進路（相対運動方向）が自船バンパーへ進入したかどうかにより危険度を判定した、図 1.1.5 に示す長澤らによるモデル [11]である。これは、他船の位置（点）と自船周りのバンパーにより、衝突危険度を評価した典型的なモデルである。

二つ目は、他船の航過距離が自船の前後・左右にどの程度あったかについて、自船バンパーと他船の位置（点）をもとに危険度を判定した、図 1.1.6 に示す井上らによるモデル [12]である。

これも、長澤らによるモデルと同様に他船の位置（点）と自船周りのバンパーにより、衝突危険度を評価した事例であり、他船の位置を相対ベクトルとして判定したか航過距離として判定するかといった判定の方法が違うだけで、考え方は同様である。

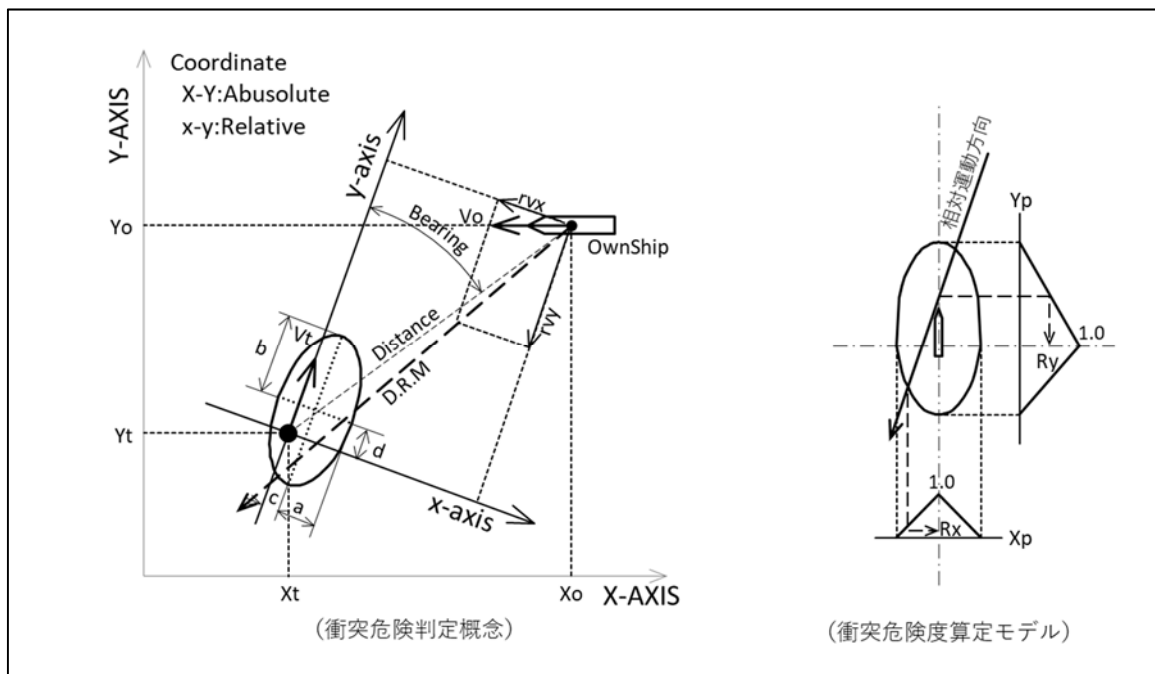


図 1.1.5 他船の相対進路と自船バンパーにより危険度判定したモデル

資料：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-[11]

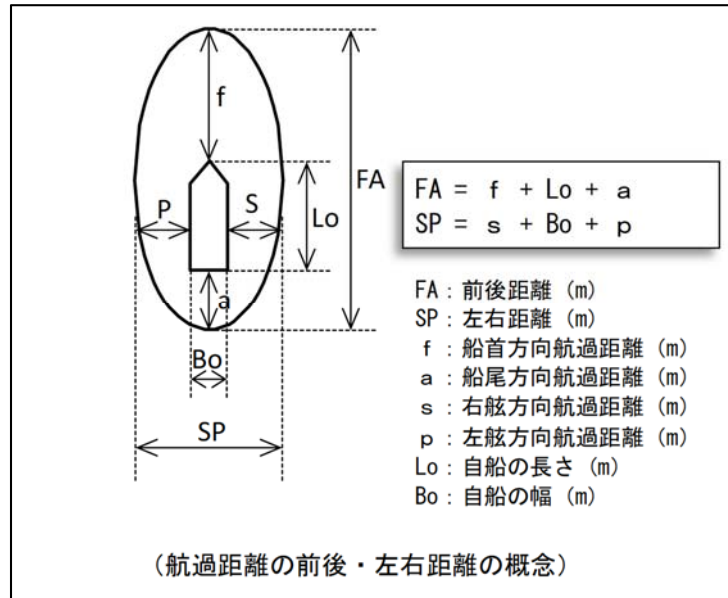


図 1.1.6 他船の航過距離と自船バンパーにより危険度判定したモデル

出典：制限水域における航過距離と隔離距離に関する操船者意識のモデル化 [12]

(2)自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つ場合

自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つモデルを紹介する。

後方閉塞領域を針路方向（長半径： r ）と横方向（短半径： s ）の半楕円で近似した藤井らによるモデル [10]がある。これは、閉塞領域を先行船の運動状態の変化を後続船が認識し、衝突を避ける動作を行なうことができる余裕水面の大きさと考えたモデルであり、避航する船の操縦性能を考慮して避航する船にウェイトをおいて提案されたモデルである。

同モデルでは、図 1.1.7 に示すとおり、2 船の大きさがほぼ等しい場合、後方閉塞領域が長半径 $r=8L$ 、短半径 $s=3.2L$ の半楕円バンパーで近似することは、2 船それぞれに長半径 $4L$ 、短半径 $1.6L$ の楕円バンパーと考えることと等価であるとされている。つまり、避航する自船周りのみに閉塞領域を設定する場合の後方閉塞領域の半径に対して、2 船それぞれに閉塞領域を設定する場合の後方閉塞領域の半径は半分の大きさとなる。

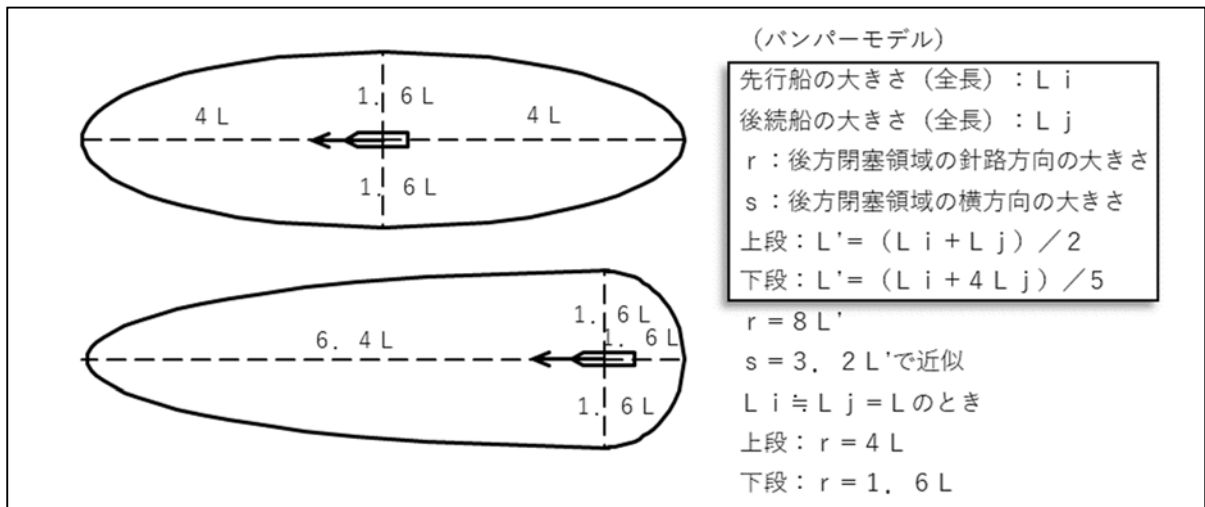


図 1.1.7 自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つモデル

資料：海上交通工学 [10]

これらの2つのモデルを比較してみると、下図に示すとおり、他船を点として自船の周りにバンパーを持つと考える場合の方が、自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つと考える場合よりも、バンパーの大きさは大きいことが分かる。これは、他船を点として自船の周りにバンパーを持つ場合における2船が接触せずに通過できるケースが赤い実線と青い点の状態であるのに対し、同様に自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つと考える場合における2船が接触せずに通過できるケースが赤い破線と青い破線の状態と同じであることから、明らかに実線のバンパーのほうが大きくなることから明らかである。

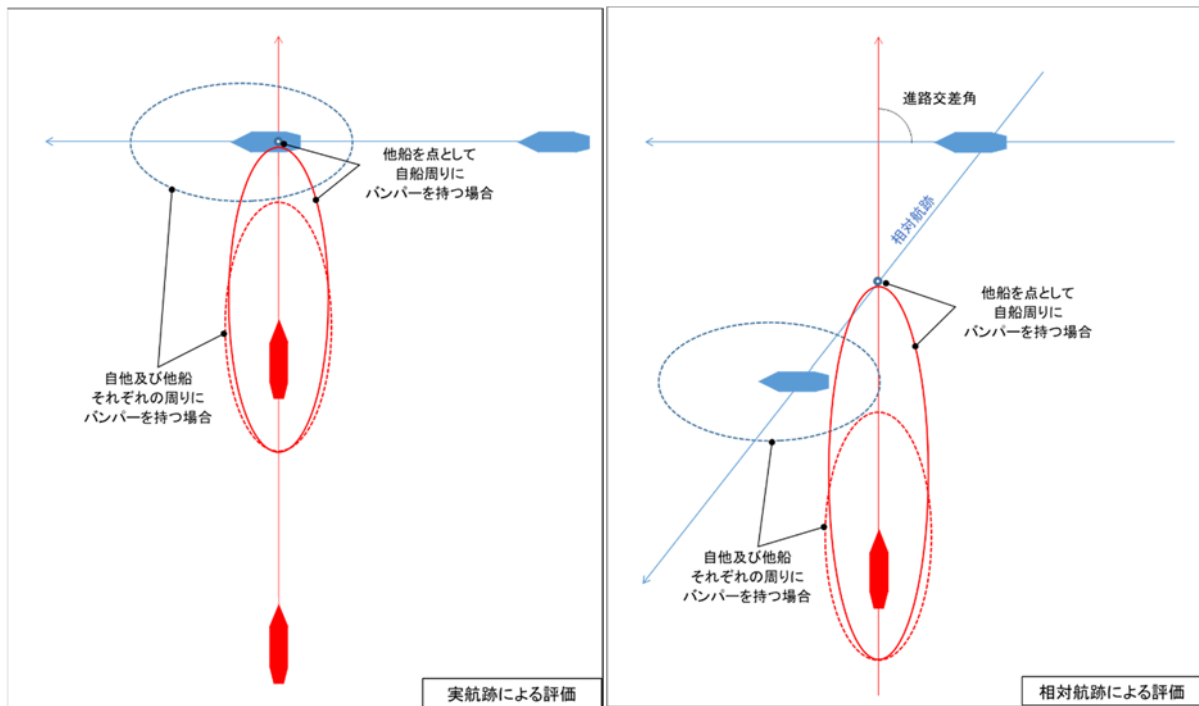


図 1.1.8 バンパー設定の違い

2000年代の研究では他船を点として自船の周りにバンパーを持つ考え方をいられるケースが多いが、実際には他船も同様のバンパー（避航領域）を有しており、2船間だけでなく3船以上がからむ複雑な見合い関係となることも多い。このため、自船のみではなく船舶交通環境全体の危険度を評価する場合には、お互いにバンパーが接触することのないように操船するという自船及び他船それぞれの周りにバンパーを持つ考え方のほうが、全ての船舶を同等に評価できるとなり、より実態に即した考え方といえることができる。

このため、**互いにバンパーを有するモデルとして評価することは、交通容量や海域全体の評価等には有利**と考えられる。

このことは、藤井らによる文献 [10]における、「他船の中心を点とみなして自船周りにある領域を設定しても、または自船を点とみなして他船周りに領域を設定しても、あるいは自船の周りとは他船の周りにそれぞれバンパーがあるように考えてもどちらでも同じことになる。」の一文からも、間違った考え方ではないといえる。

1.2 既往の研究

1.2.1 海上交通環境に関する 1960～1990 年代の研究

海上交通環境における危険度評価あるいは困難度評価に関しては、本州と四国を結ぶ架橋構想実現に向けた調査を契機として、1960年代の海上交通実態のレーダを用いた観測調査データ分析などの海上交通現象の調査による問題点の分析や発掘から始まっている [13] [14]。初期の段階では、海上交通現象の記述として、交通量や時間・空間分布による指標など統計的な代表値による記述モデルが研究され、その後取得可能なデータに基づく推定モデル、さらには交通現象を構成する様々な要素間の因果関係を明確にし、現象が生起するメカズムを記述した構造モデルの研究が進められている。これらは、喜多秀行氏による海上交通の現象記述モデル [15]として体系的に整理されている。その中でも、藤井弥平氏らにより提案された閉塞領域 [16]としてのバンパーモデル [17]が構造モデルの一つとして、一般的に使用されている。

その後、1970～1980年代にかけて、海上交通現象の調査結果をもとにした一次元的な解析による航行安全の取り扱いが始まり、電子計算機器の飛躍的な処理能力の向上とともに、マクロ・ミクロシミュレーションや操船シミュレータ、海上交通シミュレーションの開発 [18] [19] [20] [21]へ移行するなど、海上交通現象の2次元の記述・再現・予測モデルとして、各種シミュレーションが提案された。

1990年代に入るとその評価指標や手法に、人間系の記述モデル [22] [23]や環境の視覚的な表現として、ビジュアル操船シミュレータが開発され、交通流予測や再現精度が向上し、海上交通環境アセスメントが体系的に確立された。

これらの評価指標の変遷について、表 1.2.1 に示すとおり長澤 [13]が取りまとめている。この年表には、海上交通実態調査が開始された 1960年代の統計値や幾何学的モデルから導き出される衝突確率、1970年代の操船者の避航行動に関わる CJ 値、1980年代のファジーと SJ 値など人間系の記述、1990年代の避航空間閉塞度 (BC 値) や環境ストレス値など変遷が整理されている。

表 1.2.1 評価指標の変遷 (概要)

西暦	評価指標の例
1963	通過隻数、密度 等 到着間隔、航跡分布 衝突確率
1970	航行所要時間 密度ポテンシャル CJ 値 待ち時間、利用率
1980	方位・距離変化率 避航量、避航発生頻度 エントロピの導入と危険度 効用関数の導入と IK 値 密度関数と衝突危険確率 ファジイと SJ 値
1990	航行困難度と操船能力指数 要注視船、見落とし発生頻度 避航操船空間閉塞度 (BC 値) ブラインドエリア比と主観評価 2'ndly task と限界 環境ストレス値

出典：日本航海学会誌 (平成 10 年 12 月) 創立 50 周年記念特集号 [13]

1.2.2 海上交通環境に関する 2000 年代以降の研究

2000 年代に入ると、SOLAS 条約改正や ICT の飛躍的な普及により、AIS (船舶自動識別装置) や ECDIS (電子海図) など操船支援装置の技術革新を背景として、これらの操船環境・情報環境を前提とした各種解析評価手法に関する研究が主流となってきた。ここでは、1960 年代～1990 年代の海上交通環境に関する先行研究に加えて、2000 年代の情報通信技術の目覚ましい発展を背景とした最新知見を踏まえた研究をレビューするとともに、先行研究の不足点を把握し、本研究の着眼点を整理した。

(1) AIS を活用した研究事例

AIS を活用した海上交通に関する研究論文について、科学技術情報発信・流通総合システム (J-STAGE) [24]により抽出すると、2000 年代前半から現在まで毎年 3 件前後発表されており、AIS 単独の船舶情報をもとにした研究が主流である。また、AIS 情報とレーダの ARPA 機能と併用した観測手法に関する研究が一部あるものの、**AIS 情報とレーダ情報の両方の船舶航跡データを用いた研究事例は AIS 情報のみを用いた研究事例と比較して少ない。**

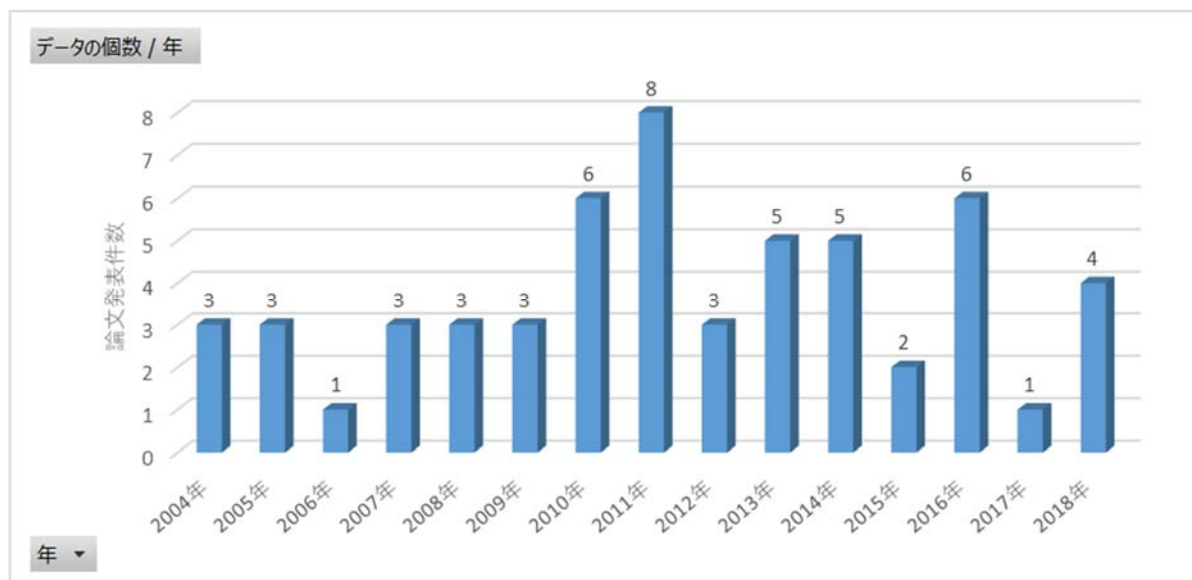


図 1.2.1 AIS を活用した海上交通に関する研究論文の発表件数

参考資料：科学技術情報発信・流通総合システム (J-STAGE) [24]

(2)衝突危険度評価に関する研究事例

衝突危険度評価に関しては、2010年代に入ってから、「越中島 OZT 研究会」が中心として進めている航行妨害ゾーン（OZT：Obstacle Zone by Target）を用いた手法が主流となっている。

これは、従来からのレーダ航法として使用されている最接近距離（DCPA：Distance to Closest Point of Approach）や最接近時間（TCPA：Time to Closest Point of Approach）などの相手船との関係性を考えた相対運動ではなく、真運動をベースとしたリアルタイムでの表現や危険度評価が可能な手法であるのが特徴である。

この OZT を活用した研究事例について、科学技術情報発信・流通総合システム (J-STAGE) [24]により抽出すると、図 1.2.2 のとおりであり、これらをもとに次のとおりレビューする。

2000 年以降の OZT に関する研究事例は、年間 1~2 件、多い年には 5 件程度発表されている。2000 年代前半は、レーダへの OZT の表示方法や表示装置に関する研究が多く、2010 年代に入ると AIS の普及（2008 年：AIS 搭載猶予期間終了）とともに AIS データが充実してきたことを背景として、AIS データを活用した予測や避航操船のモデル評価、それをもとにした支援システムに関する研究へ移行している。

近年は、操船海域における危険度評価に関する研究が多くなっている。

これらの OZT に関する論文において、AIS 情報とレーダ情報の両方の船舶航跡データを用いた海域の危険度評価が行われた研究事例も AIS 情報のみを用いた研究事例と比較して少ないのが現状である。

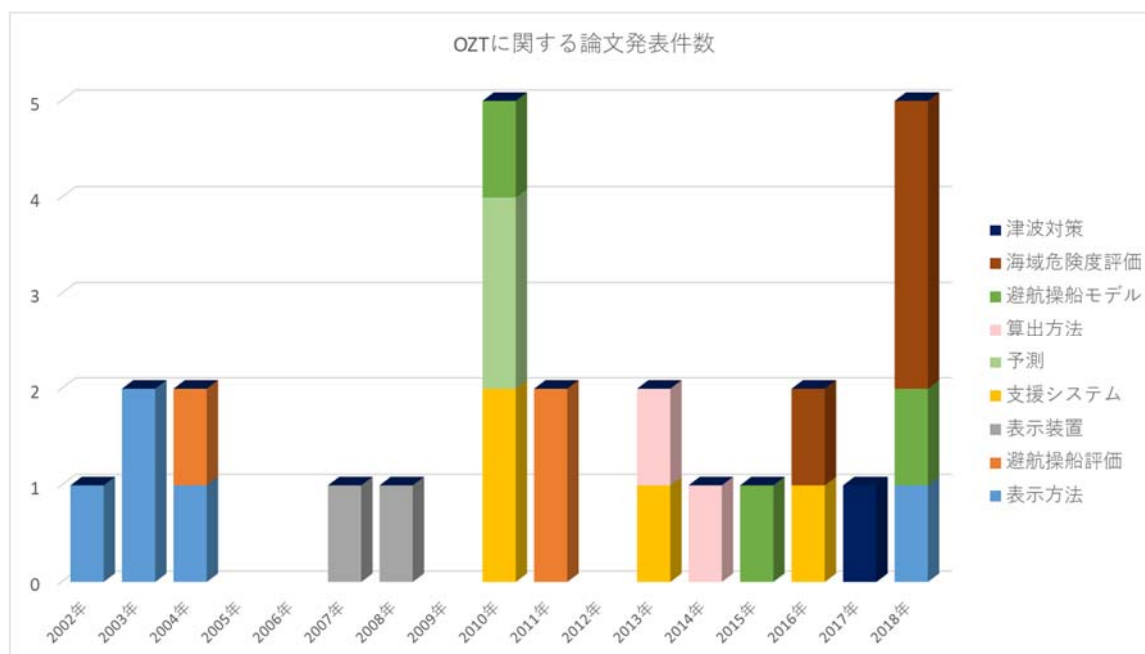


図 1.2.2 OZTに関する論文発表件数

参考資料：科学技術情報発信・流通総合システム (J-STAGE) [24]

1.3 本研究の目的

船舶交通環境における航海計器の状況は、AIS の普及と共に、AIS 情報のレーダ等への表示環境が向上している。このことは船舶交通の安全性の向上に繋がっているが、従来型航海計器による運航船舶が相当数あるため、AIS 搭載船と AIS 非搭載船の混在する状況、すなわち、AIS の搭載有無によって情報量に差異がある状況による潜在的な危険の存在が危惧される。

このような船舶交通環境において、AIS によるデータ取得・処理が容易であるが故に、AIS データのみを使用した船舶交通環境の評価・解析が行われることが多い。この場合、内航船では総トン数 500 トン未満の AIS 非搭載船は評価対象にならない。また、AIS 搭載船と AIS 非搭載船では操船者が把握可能な情報量に差異があることや AIS はレーダや目視よりも比較的遠方から他船の探知が可能のため、操船者の避航操船方法やタイミング等の行動特性が異なると推察される。

このため、本研究では、前項までの取りまとめを踏まえ、次の 3 点に着目して、危険度評価の評価値や評価指標などその評価手法を検討することとした。

(1) AIS 搭載船と AIS 非搭載船の情報環境の差異

実海域における船舶交通環境を適切に評価するためには、レーダによる観測データを使った評価・解析と共に、図 1.3.1 に示すイメージのとおり、AIS 搭載船と AIS 非搭載船の情報環境の差を考慮することが必要と考えた。



図 1.3.1 AIS 搭載有無による潜在的危険度のイメージ

(2)バンパーモデルの応用

既往の研究では、バンパーモデルは自船の周囲のみの避航領域を楕円でモデル化されるケースが多いが、研究の背景でも述べたとおり、実際には他船も同様のバンパー（避航領域）を有しており、2 船間だけでなく 3 船以上がからむ複雑な見合い関係となることも多いため、お互いにバンパーが接触することのないように操船するという考え方のほうが、交通容量や海域全体の評価を行う場合には適切であると考えられる。

(3)既往研究動向を踏まえた危険度評価手法の検討

既往の研究をレビューした結果、近年 OZT を活用した危険度評価の研究頻度が高いものの、OZT に関する論文において、AIS 情報とレーダ情報の両方の船舶航跡データを用いた海域の危険度評価が行われた研究事例も少ない状況にあるため、この点に注目した危険度評価手法の検討が必要と考えられる。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.4.1 に示す。

序論では、瀬戸内海の海上交通環境を概観するとともに、海難事故の発生状況や海難事故が海域環境に及ぼす影響を考察し、海難事故削減に向けた法整備や操船支援装置として有効な AIS 装備の義務化などについて整理し、既存の操船困難度や危険度の評価手法についてバンパーモデルやその考え方を レビューし、研究の目的を示した。

2 章では、我が国でも有数な操船の難所といわれる 来島海峡航路について、潮流の流向によって通航ルートが変わる独特な通航ルールや同ルールの影響により 航路入口における複雑な行き会い関係が発生する状況等を概説するとともに、同海域における船舶の通航実態について レーダ観測装置を活用した現地調査を実施・解析し、AIS を搭載していない船舶も含めた通航実態をもとに、AIS 搭載船と AIS 非搭載船の混在する (情報量に差異がある) 状況による潜在的な危険の存在が危惧されることを考察した。

3 章では、前章で整理した研究対象の来島海峡における海上交通実態をもとに 行き会い関係にある航跡パターンを 140 ケース抽出のうえ、進路交差角と航過距離との関係性について船首航過距離と正横航過距離で 体系化し、船首航過距離と正横航過距離それぞれの値の 有意性について t 検定を用いて確認するとともに、バンパーモデルと航過距離の関係式から AIS 搭載船と AIS 非搭載船によって、航過距離特性が異なる傾向を示す等の一定の知見を得た。

4 章では、航行妨害ゾーン (OZT : Obstacle Zone by Target) の基本的な理論に基づき 衝突予測線 (LOPC : Line of Predicted Collision) や 衝突予測位置 (PPC : Predicted Position of Collision) の 計算方法について概説するとともに、PPC を基準とした危険度評価指標 (DREP : Degree of Risk Evaluation index on the basis of PPC) による 評価手法を提案した。

5 章では、バンパーモデルによる 危険度評価例について概説し、LOPC を基に、2 船のバンパーの大きさから衝突の危険度を判定する新たな評価方法を提案した。本評価方法は、相対運動 (DCPA や TCPA) によらない 真運動による評価方法である点も大きな特徴である。また、単なる閾値による判定だけでなく 距離余裕等を考慮した評価や、AIS の利用環境の違いについて、AIS 搭載の有無によりバンパーの大きさを変えることで、情報環境の異なる船舶が混在する要素を考慮した評価など、今後の新たな評価方法開発の可能性についても触れた。

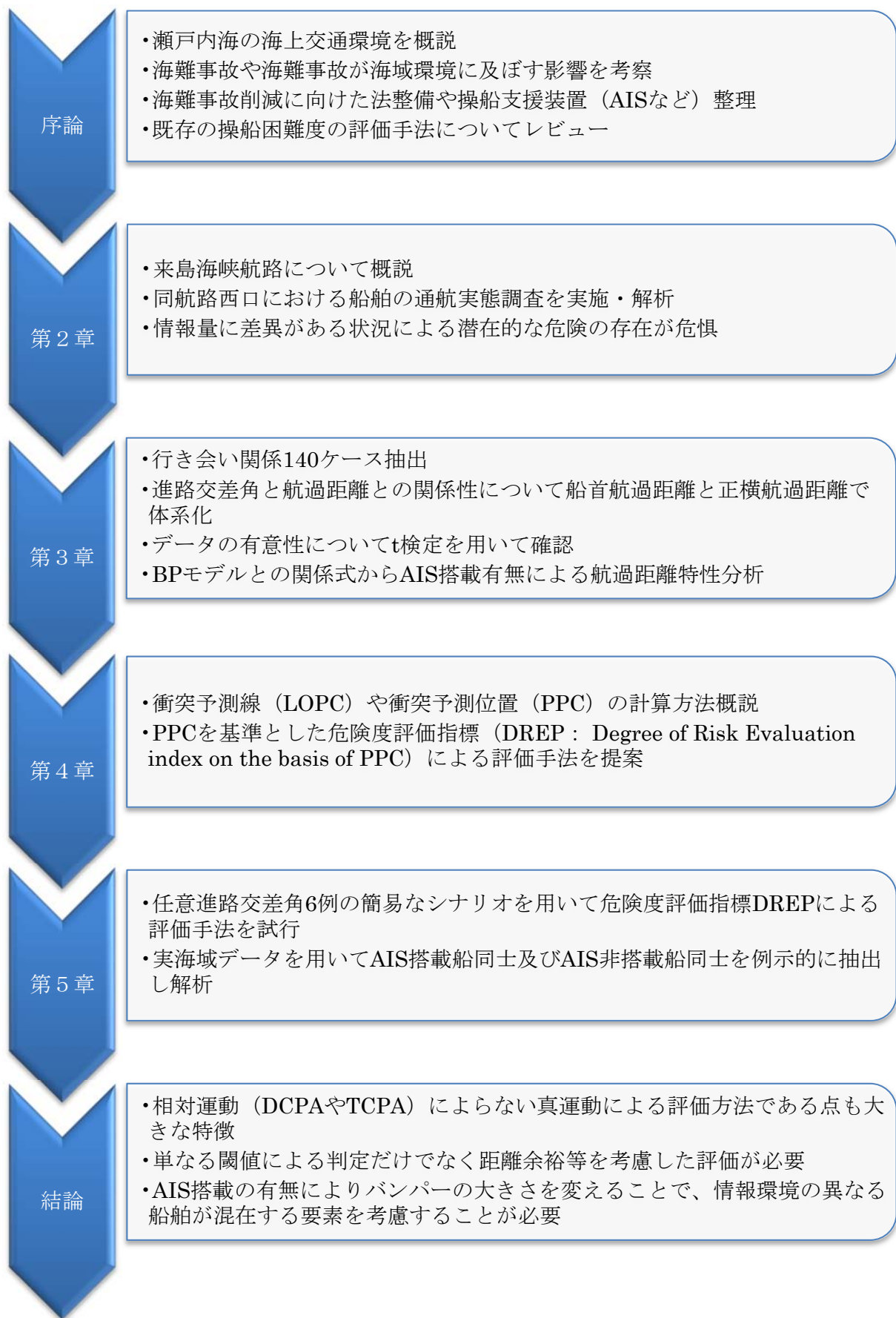


図 1.4.1 本論文の構成

第2章 研究対象の整理

2.1 観測対象海域

2.1.1 来島海峡航路

(1)航行ルール

来島海峡における航路の設定及び航行ルールについては、地域ルールとしての海上交通安全法及びこれに基づく政省令・告示が適用され、これらにより定められていない部分については基本航行ルールである海上衝突予防法が適用となる。

1)順中逆西航法

来島海峡航路は、図 2.1.1 に示すとおり、順潮の場合は中水道を、逆潮の場合は西水道を航行するという特殊ルールがある。

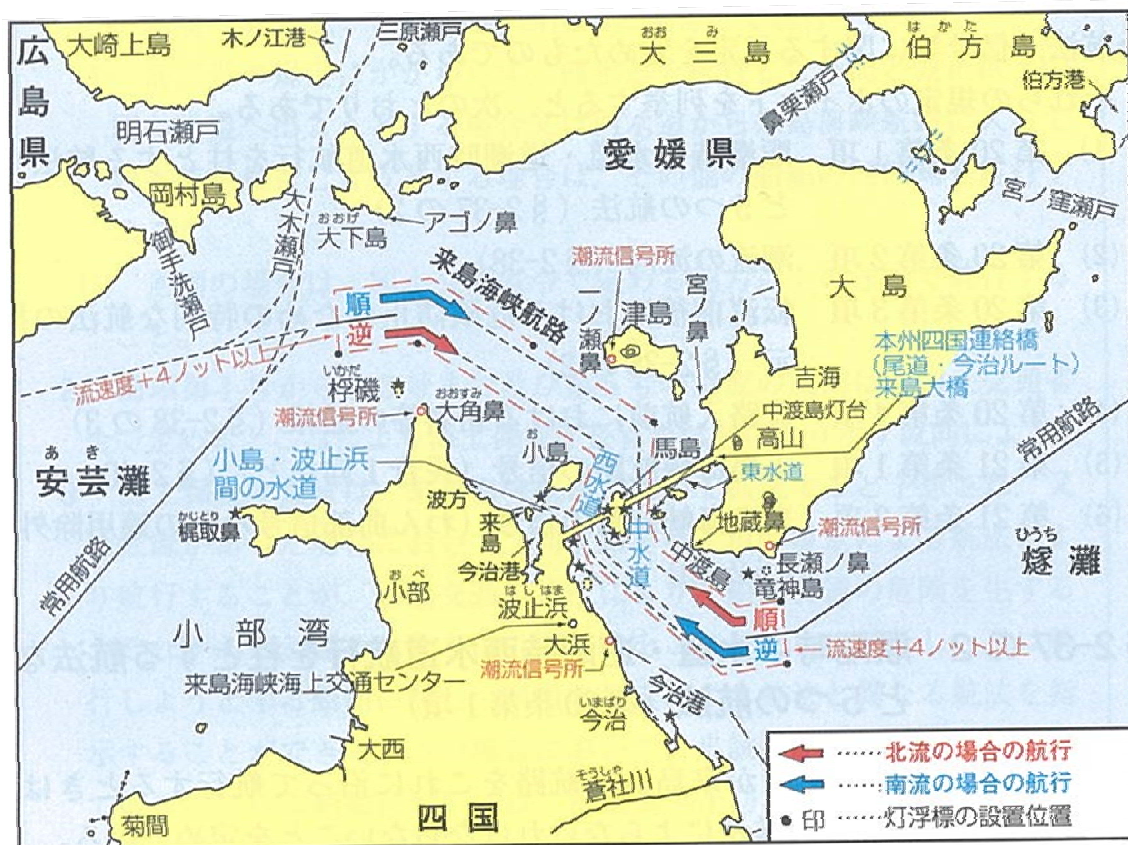


図 2.1.1 来島海峡航路における順中逆西航法

出典：図解 海上交通安全法（新訂 15 版）福井淡原著・浅木健司／海文堂（図 2・70 来島海峡航路） [25]

2)追越し禁止区域

来島海峡航路のうち定められた区間(図 2.1.2)においては、他の船舶(漁ろうに従事している船舶、許可を受けて工事作業に従事する船舶、対地速度4ノットを確保できない船舶等を除く。)を追い越してはならない。

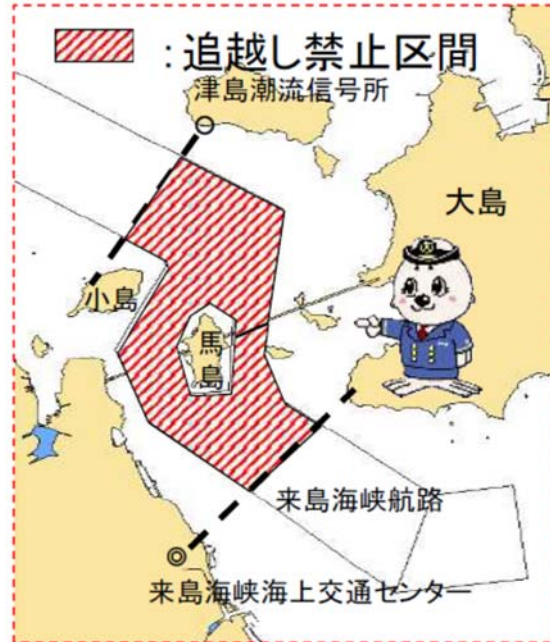


図 2.1.2 来島海峡航路における追越し禁止区域

出典： 来島海峡マリンガイド(2016年) 来島海峡海上交通センター・今治海上保安部 [26]

3)AISによる目的地情報の送信

船舶(AISを搭載しているもの)は、来島海峡航路を航行している間、進路を他の船舶に知らせるため、仕向港を示す記号をAISの目的地に関する情報として送信してなければならない。

(2)来島海峡航路入り口の状況

来島海峡航路は、前項に示した特殊航法のため、南流時には航路入口における進路交差が発生し易い海域となっている。

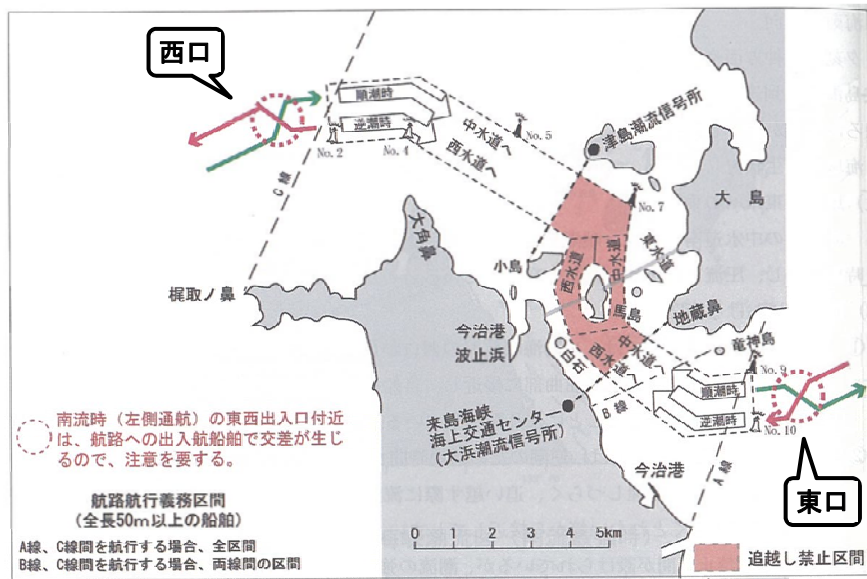


図 2.1.3 南流時における来島海峡航路東西入口部付近の船舶進路交差

出典：書誌第 103 号瀬戸内海水路誌（2013 年 3 月刊行）海上保安庁（第 32 図 来島海峡航路航法及び先行信号図） [27]

1)来島海峡航路東口

来島海峡航路東口付近海域は、図 2.1.4 に示すとおり、北西側に備後灘と南西側に燧灘が広がっており、西口と比較して広い海域となっている。

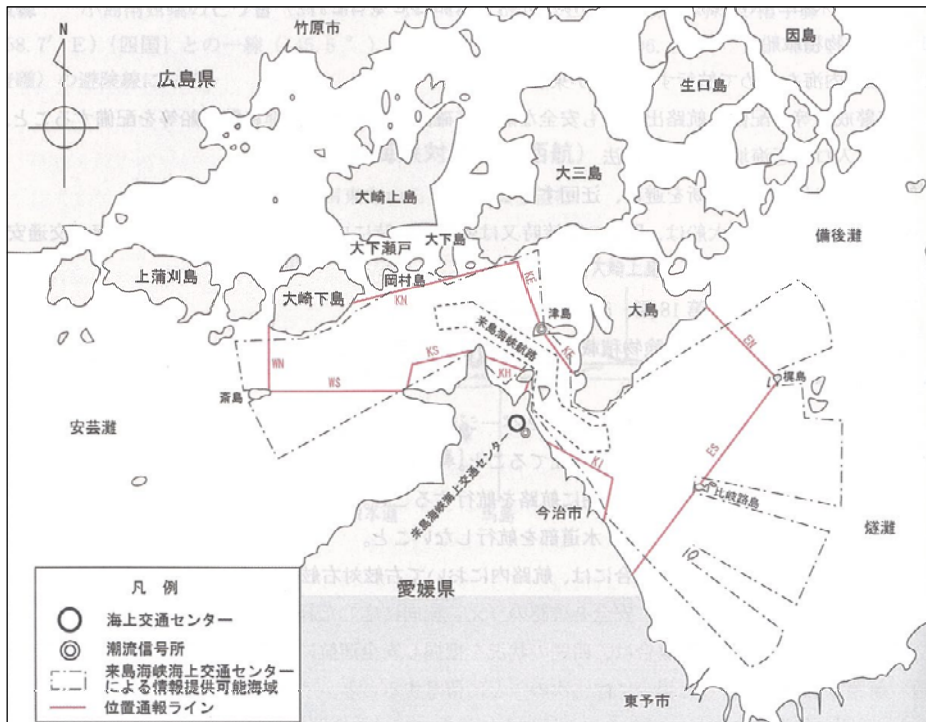


図 2.1.4 来島海峡航路出入口付近の海域

出典：書誌第 103 号瀬戸内海水路誌（2013 年 3 月刊行）海上保安庁（第 34 図 来島海峡海上交通センターによる情報提供可能海域及び位置通航ライン図） [27]

2)来島海峡航路西口

来島海峡航路西口付近海域は、図 2.1.5 に示すとおり、大崎下島と梶取ノ鼻に挟まれているため、東口と比べ狭い海域となっており、針路 258° 方向に安芸灘北航路、針路 221° 方向に安芸灘南航路が位置している。また、西口の北側には大下瀬戸があり三原・尾道方面への通航路となっているため、複雑な行き会い関係が予想される海域となっている。

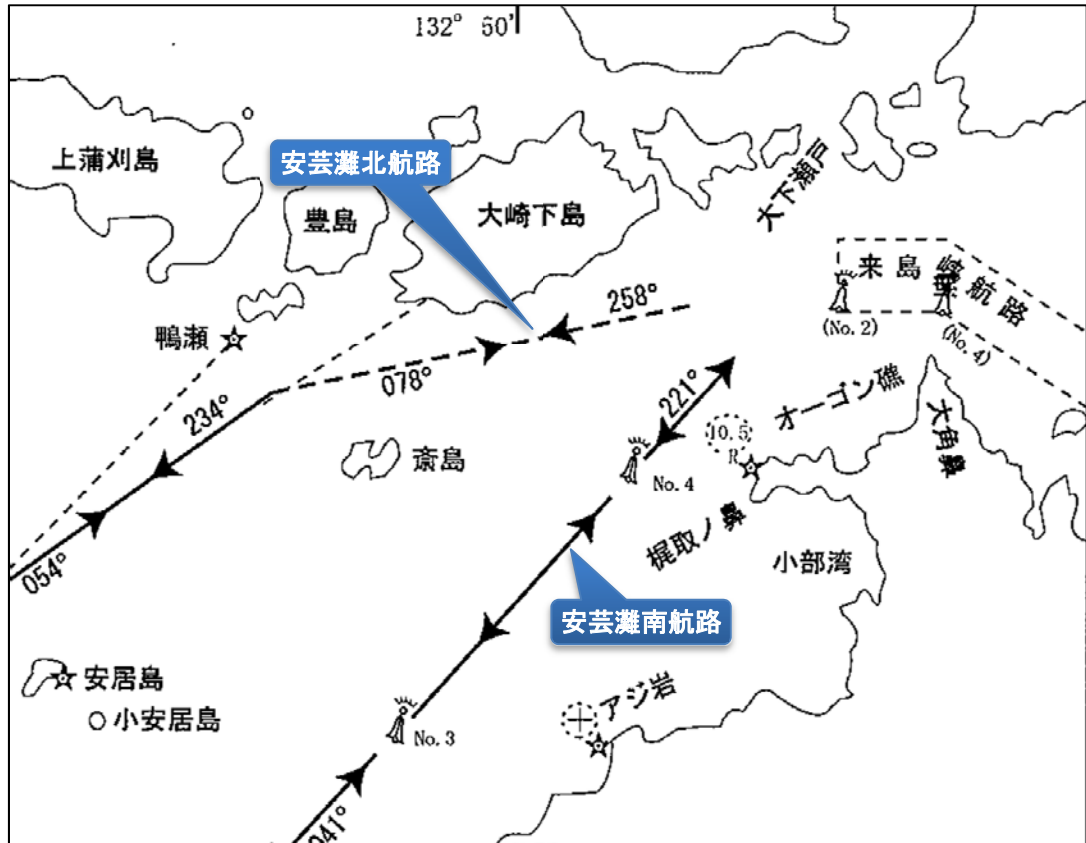


図 2.1.5 来島海峡航路西口付近の海域

出典：書誌第 103 号瀬戸内海水路誌（2013 年 3 月刊行）海上保安庁（第 35 図 安芸灘針路法図） [27]

2.1.2 解析対象海域の設定

解析対象海域は、前項で述べた来島海峡航路における船舶交通環境特性を踏まえ、次の理由から図 2.1.6 に示す来島海峡航路西口海域を選定した。

- (1) 単純な直線航路や針路方向に対して見通しの利く（一般に避航動作を開始すると言われる 10NM 以上）海域では、進路交差が発生し難いため、供試データとして十分なデータ数が得られ難い。
- (2) 単純な直線航路や針路方向に対して見通しの利く海域では、AIS 搭載の有無による情報量の差として、避航操船方法の違いが現れ難いと予想される。
- (3) 基礎的研究段階のため、特徴が現れ易く、評価モデルの妥当性が確認し易い海域を選定する。



- (4) 来島海峡航路西口は、南流時は東航する船舶が中水道へ向かうため進路交差が生じ易い。
- (5) 安芸灘南航路及び安芸灘北航路と来島海峡航路間を入出航する船舶や両安芸灘航路と宮ノ窪瀬戸など他の狭水路間を入出航する船舶もあり、多種多様な船舶による進路交差を伴う交通流が形成され易いため、数多くの行き会いケースが得られる最適な研究フィールドである。

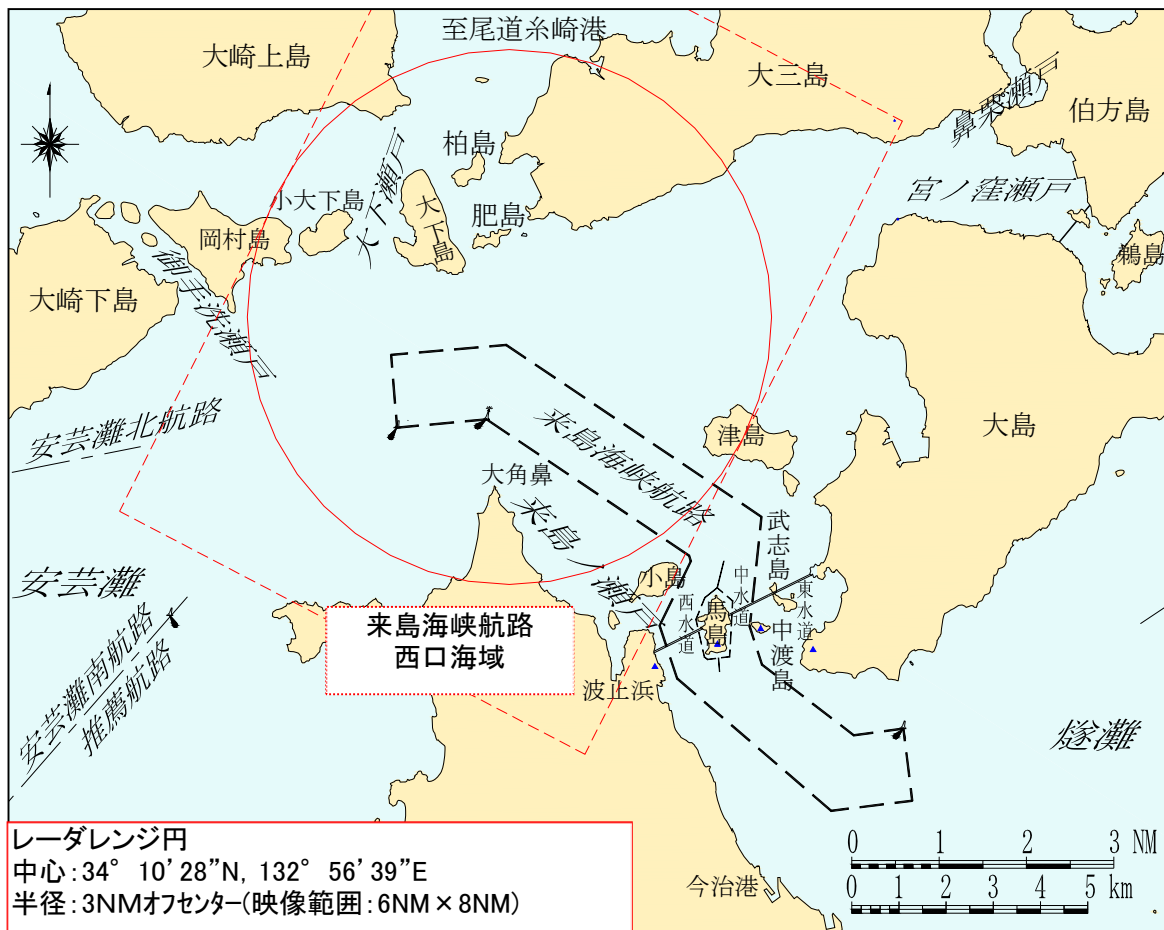


図 2.1.6 解析対象海域

2.2 観測システムの概要

本研究を実施するため、水井らにより開発された既存の観測システムをレーダ反射信号の高分解能取得が可能なレーダ画像収録システムに改良することにより、Xバンドレーダによる船舶交通の観測システムを新たに開発した [28]。使用した Xバンドレーダの主要スペック及びシステム概要をそれぞれ表 2.2.1 及び図 2.2.1 に示す。本システムは、レーダ映像を JPG 画像として出力・記録するモードと共に、信号強度に対応するビデオ信号を出力・記録できる 2 つの異なるモードを持つことに特徴があり、画像だけでは判別しにくく強反射物標の存在を反射強度により把握できるため、偽像発生の有無などの判別基礎データが得られる有益なシステムである。

表 2.2.1 使用したレーダの概要

空中線部	輻射器	195cm (回転数 24rpm)
	水平ビーム幅	1.2°
	垂直ビーム幅	22°
	パルス幅	0.3 μ s (STC・FTC 断)
	送信出力	12kW
指示機	表示器	15"カラーLCD
	表示解像度	1024×768 ドット
	距離精度	8m またはレンジの 1%
	レンジ	3NM

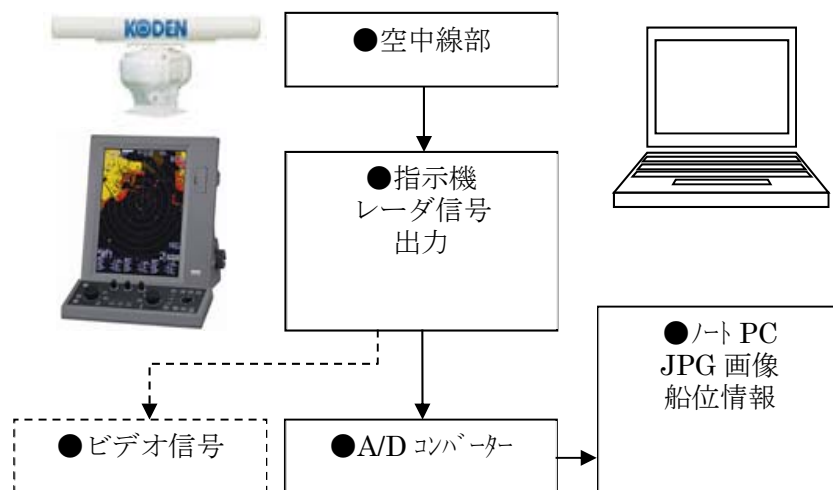


図 2.2.1 観測システムの構成概要

参考資料：日本航海学会第 123 回講演会ほか [28] [29] [30]

2.3 観測対象海域における交通実態

前節 2.1 に示した解析対象海域において、平成 26 年 5 月 28 日 18:00～同年同月 29 日 18:00 のレーダ及び目視による 24 時間観測を実施した。図 2.3.1 に示す◎の地点（大角鼻）にレーダ及び目視観測基地を設置し、対岸の大下島を見通す目視線（349°）を通過する船舶を対象に観測を行った。レーダ観測は、前節 2.2 に示すレーダ観測システムを設置し、60 秒毎のレーダ映像を取得した。目視観測は、観測基地に配置した目視観測員が双眼鏡や船舶明細書、リアルタイムの AIS 情報などを使用して、船種や総トン数等の船舶諸元や通過日時、速力などを目視観測原帳に記録した。なお、当日、天候は晴れ月齢 28.9 であり、その他の条件から当日は夜間の観測も可能であった。また、同観測期間における AIS 観測データは別に入手（株式会社東洋信号通信社から購入）し、航行位置や船種、船型が判明した AIS 搭載船については、AIS 情報を用いて解析した。これらの結果をもとに、解析対象海域における交通実態について整理した。



図 2.3.1 レーダ・目視観測基地

2.3.1 船種別・総トン数別通航隻数

船種別・総トン数別通航隻数（全船舶及びAIS搭載船）の集計結果を表 2.3.1 に示す。全通航隻数は、474 隻で、大きさ別で最も多いのは 100～500 総トンの 205 隻（43.2%）であった。また、船種別で最も多いのは貨物船で 217 隻（45.8%）であった。AIS 搭載船は、223 隻で全船舶の 47.0%を占めており、500 総トン未満を中心とする 5 割以上の小型船舶が AIS を搭載していないことが分かる。

来島海峡航路西口海域は、関西と九州・東アジアを結ぶ基幹航路として、また、瀬戸内海島嶼部間の内航小型船の主要航路としても重要な海域となっており、本調査結果からも大小さまざまな船舶が航行する輻輳海域となっていることが分かる。

表 2.3.1 船種別・総トン数別通航隻数

船種	総トン数									単位:隻	
	5ト 未満	5 ～ 20ト	20 ～ 100ト	100 ～ 500ト	500 ～ 1千ト	1千 ～ 5千ト	5千 ～ 1万ト	1万ト 以上	合計	割合	
貨物船	0	0	6	137	21	37	13	3	217	45.8%	
	0	0	0	36	15	32	12	3	98	43.9%	
コンテナ船	0	0	0	4	3	4	9	0	20	4.2%	
	0	0	0	3	3	4	9	0	19	8.5%	
自動車運搬船	0	0	0	0	0	4	0	5	9	1.9%	
	0	0	0	0	0	4	0	5	9	4.0%	
土砂(砂利)運搬船	0	0	0	13	0	2	2	0	17	3.6%	
	0	0	0	0	0	2	2	0	4	1.8%	
タンカー	0	0	0	9	10	11	0	1	31	6.5%	
	0	0	0	1	10	11	0	1	23	10.3%	
液化ガス、 ケミカルタンカー	0	0	1	24	24	12	0	0	61	12.9%	
	0	0	0	9	24	12	0	0	45	20.2%	
旅客船	0	1	3	0	0	0	0	1	5	1.1%	
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0.4%	
フェリー	0	0	1	9	1	1	6	7	25	5.3%	
	0	0	0	0	1	0	6	7	14	6.3%	
曳航船	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0.2%	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	
漁船	37	12	7	0	0	0	0	0	56	11.8%	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	
タグボート	0	0	0	6	0	0	0	0	6	1.3%	
	0	0	0	3	0	0	0	0	3	1.3%	
プレジャーボート	1	4	0	0	0	0	0	0	5	1.1%	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%	
作業船	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.2%	
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0.4%	
その他	6	2	7	2	0	2	1	0	20	4.2%	
	0	0	2	2	0	1	1	0	6	2.7%	
合計	44	20	25	205	59	73	31	17	474	100.0%	
	0	0	2	55	53	66	30	17	223	100.0%	
割合	9.3%	4.2%	5.3%	43.2%	12.4%	15.4%	6.5%	3.6%	100.0%		
	0.0%	0.0%	0.9%	24.7%	23.8%	29.6%	13.5%	7.6%	100.0%		

※上段は全船舶。下段は、AIS搭載船で上段の内数である。

※割合の和は、端数処理の関係で必ずしも合計欄と一致しない。

2.3.2 航跡図

AIS 搭載船を含む全船舶の航跡図を図 2.3.2 に、AIS 搭載船のみの航跡図を図 2.3.3 に示す。

これによると、解析対象海域には、安芸灘北航路及び安芸灘南航路と来島海峡航路間を出入航する船舶の交通流が確認できる。また、宮ノ窪瀬戸を通航する内航小型船舶の交通流も確認でき、針路交差が発生し易い交通環境であることが分かる。

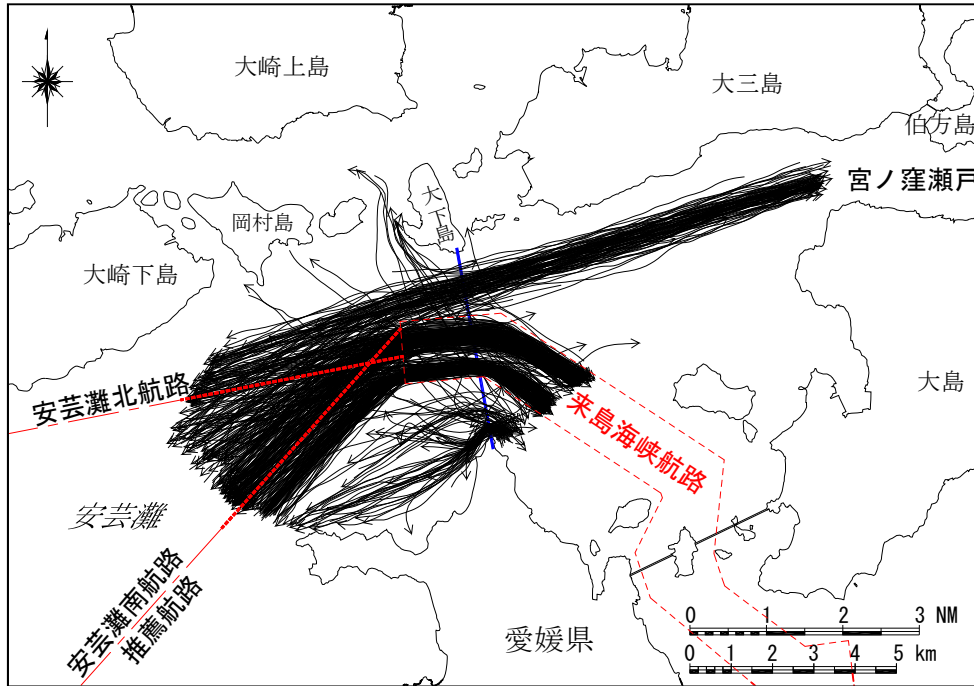


図 2.3.2 航跡図 (全船舶 : 474 隻)

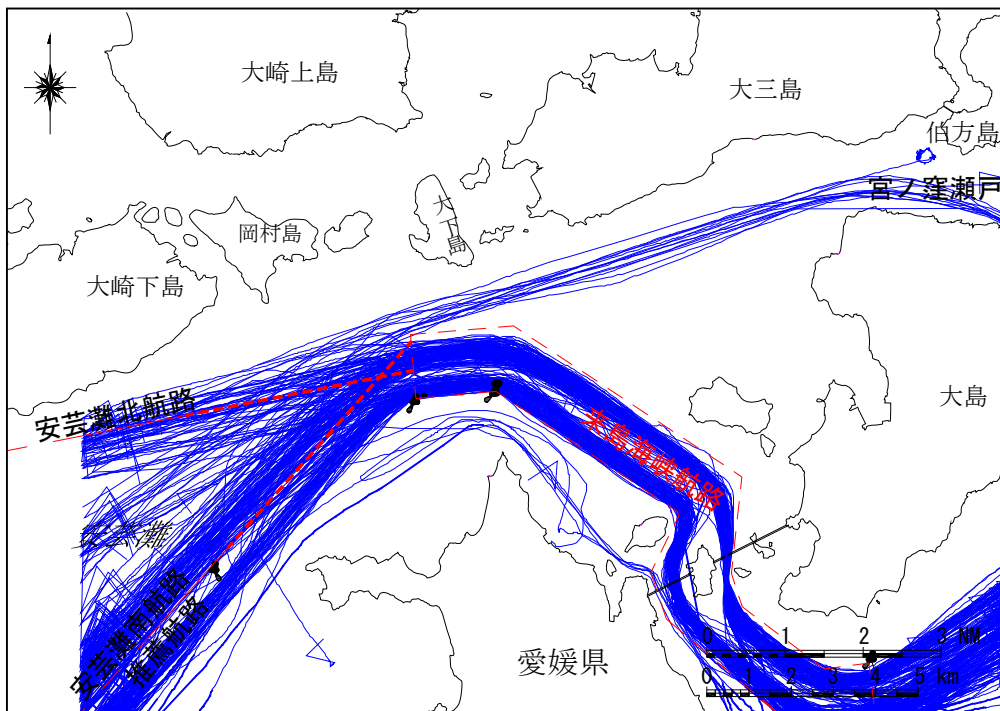


図 2.3.3 航跡図 (AIS 搭載船 : 223 隻)

2.3.3 航跡密度分布図

L^2 換算航跡密度分布図を図 2.3.4 に示す。

最大密度は、来島海峡航路西口の航路内屈曲部南側の 2.03 隻/ km^2 (100~500 総トンを標準船型 (平均全長 : 63m) としたときの全長(L)比の 2 乗換算値) で、海域全体の平均 0.21 隻/ km^2 に対して 10 倍となっており、航路内の密度が相対的に高い結果となっている。また、航路外においては、安芸灘南航路 (推薦航路) 筋が平均 0.53 隻/ km^2 と比較的密度が高くなっており、特に推薦航路基準針路の南側が平均 0.61 隻/ km^2 と海域全体の約 3 倍高い傾向にある。

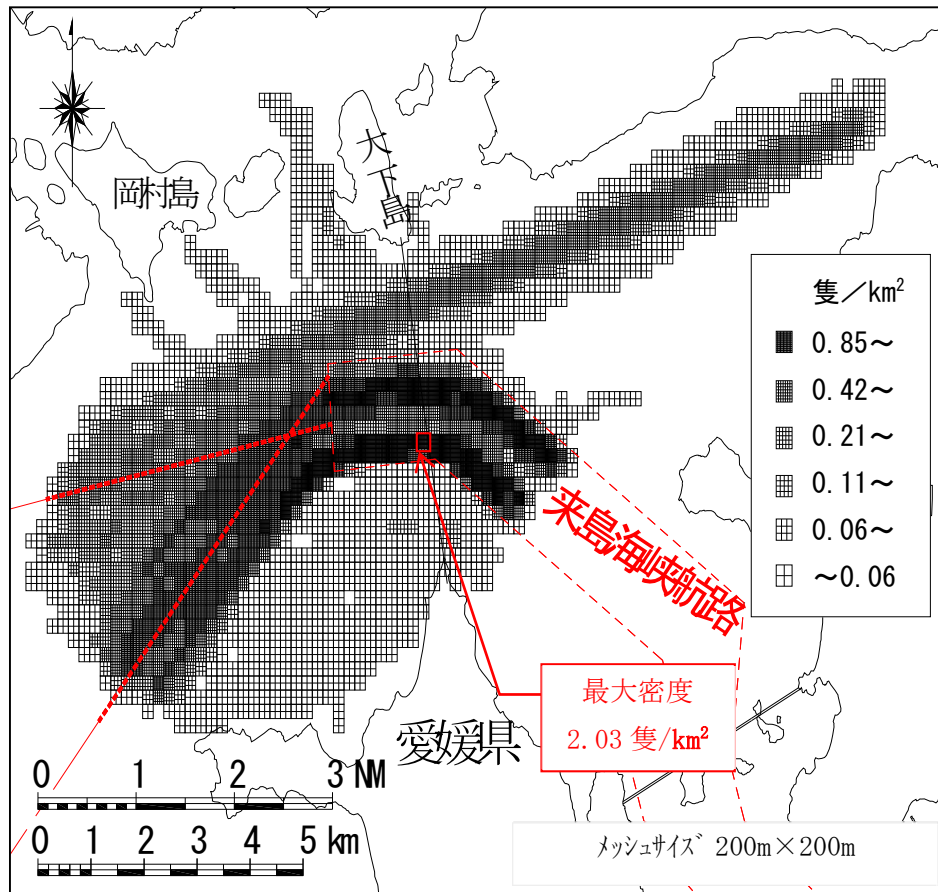


図 2.3.4 航跡密度分布図 (L^2 換算)

2.4 AIS 搭載船の動向

総務省情報通信統計 [31]によれば、日本船籍の AIS 搭載隻数は、図 2.4.1 に示すとおり平成 25 年 2 月約 2,800 隻から平成 29 年 12 月約 6,600 隻の約 5 年間で 2 倍以上増加している。

一方、平成 29 年の日本船籍の船舶は、一般商船 [2]、プレジャーボート [32]、漁船 [33]だけで、約 24 万隻以上登録されており、AIS 搭載船舶はこれら船舶の 3%程度で、我が国の海域を利用する日本船籍船舶の AIS 搭載率は少ない状況にあることが分かる [34]。

前節 2.3 で整理した交通実態からも AIS 搭載率は 5 割を下回っており、航海計器におけるレーダの重要性は変わらないといえる。

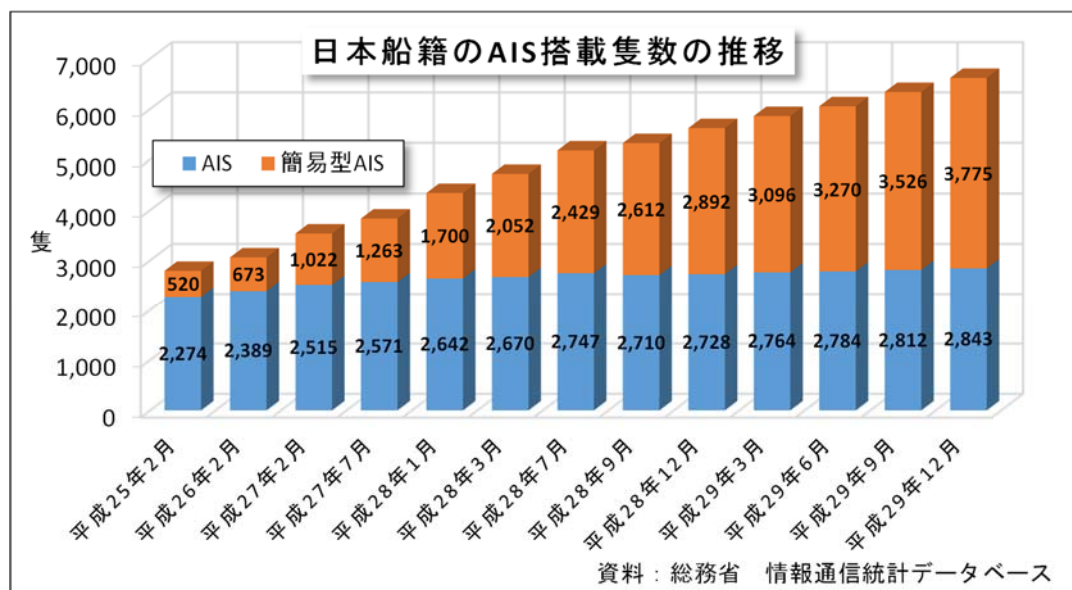


図 2.4.1 日本船籍のAIS普及状況の推移

表 2.4.1 日本船籍の隻数

		平成25年	平成26年	平成27年	平成28年	平成29年
一般商船	内航船	5,249隻	5,235隻	5,183隻	5,196隻	5,223隻
	外航船	159隻	184隻	197隻	219隻	237隻
プレジャーボート	水上オートバイ	約63,000隻	約62,000隻	約62,000隻	約62,000隻	約63,000隻
	モーターボート	約184,000隻	約178,000隻	約173,000隻	約168,000隻	約163,000隻
	ヨット	約11,000隻	約10,000隻	約10,000隻	約10,000隻	約10,000隻
漁船	漁船	約150,000隻	不明	不明	不明	不明
合計		約413,000隻	約255,000隻	約250,000隻	約245,000隻	約241,000隻

2.5 まとめ

「第2章 研究対象の整理」について、次のとおり取りまとめる。

瀬戸内海の中でも操船の難所としてまた、特殊航法ルールが適用される水域として知られる来島海峡航路の西口は、南流時は東航する船舶が中水道へ向かうため進路交差が生じ易く、安芸灘南航路及び安芸灘北航路と来島海峡航路間を入出航する船舶や両安芸灘航路と宮ノ窪瀬戸など他の狭水路間を入出航する船舶もあり、多種多様な船舶による進路交差を伴う交通流が形成され易いため、数多くの行き会いケースが得られ易い最適な研究フィールドである。

同水域において、従来の観測システムを改良し新たに開発した X バンドレーダによる船舶交通の観測システムを使用して海上交通実態調査を実施した結果、AIS 搭載船は、474 隻中 223 隻 (全体の 47% を占める割合) であり、500 総トン未満を中心とする 5 割以上の小型船舶が AIS を搭載していないことが分かった。また、AIS データ及びレーダで得られた全船舶の航跡から来島海峡航路西口における複雑な進路交差や相対的な航跡密度の高さが確認された。

また、日本船籍の AIS 搭載船の動向について既往の統計資料をもとに調査した結果、平成 25 年 2 月から平成 29 年 12 月までの約 5 年間で 2 倍以上増加しているものの、プレジャーボート、漁船も含めると搭載率は約 3% と少ない状況にあることが分っている。このような AIS 搭載船の動向や交通実態からも、航海計器におけるレーダの重要性は変わらないといえる。

このため、**AIS 搭載船と AIS 非搭載船の混在する (情報量に差異がある) 状況による潜在的な危険の存在が危惧**される。

次章では、本章で取りまとめた研究対象と AIS 搭載船と AIS 非搭載船の混在する状況による潜在的な危険について定量的に分析するため、行き会いケースの解析手法とその結果について考察する。

第3章 解析手法及び解析結果

3.1 行会いケースの抽出

3.1.1 抽出条件

解析対象海域における船舶群の内、小さい角度で進路交差する 2 船は、「行会い」、「横切り」及び「追越し」により航法が異なる。また、より小さい角度の進路交差になれば相対速度がより大きく操船余裕時間がより小さくなる。解析対象海域は来島海峡航路西出入り口周辺であり、船舶の通航航路変更が発生し易いと考えた。このような船舶を解析対象とするため、「行会い」操船状況の抽出条件を、次に示す「港湾投資の評価に関する解説書 2011」 [35]における「行き会船」の定義の角度や「出会い」の進路交差時間を参考として、抽出データの数が多くなるように表 3.1.1 のとおり設定した。

- 行会い船を左右それぞれ 15 度以内と定義（図 3.1.1 参照）している。
- 5 分以内での進路交差を「出会い」としている。

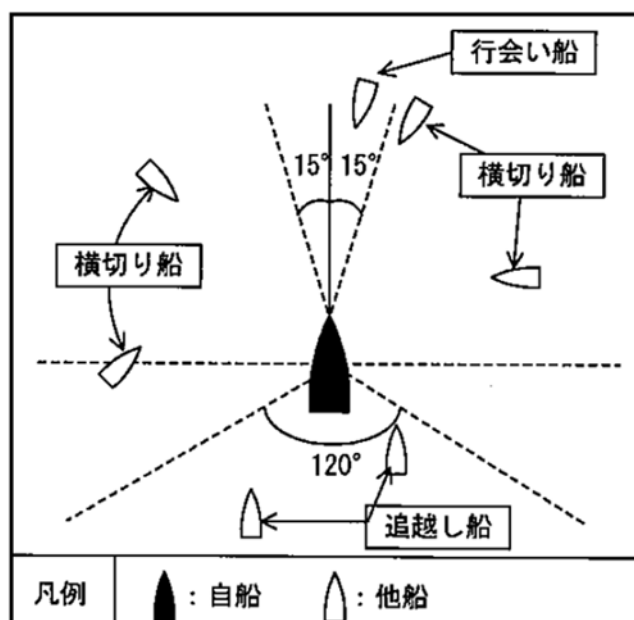


図 3.1.1 見合い関係の区分

出典：港湾投資の評価に関する解説書 2011 [35]

表 3.1.1 「行会い」操船状況の抽出条件

- 2 船の相対速度との関係により 4,000m 以内 (ほぼ、5 分以内)
- かつ、概ね 30 度以内 (小さい角度) で進路交差する
 - ※進路交差角を概ね 30 度以内とした理由は、レーダ観測の精度を考慮したこと及び、解析隻数を一定以上確保するためである。
 - ※レーダ観測データを使用しており各船舶の船首方位を把握することは困難なため、針路又は船首方位と進路がほぼ等しいと仮定した。
 - ※船種や船型については、昼間は目視により船名を把握し船舶明細書を用いて判断するとともに、船名が見えない場合は船影から判断し分類を行った。夜間においては、航海灯や AIS 情報等をもとに判断し分類した

3.1.2 抽出結果

前項の抽出条件のもと抽出した結果は、表 3.1.2 及び表 3.1.3 に示すとおりである。140 パターン、延べ 280 隻の行会いケースが抽出された。船種で最も多い行会いケースは、貨物船同士、次に貨物船とケミカルタンカーである。総トン数別で最も多い行会いケースは、100～500 総トン同士、次に 500～1,000 総トンと 100～500 総トンである。なお、進路交差点を後から通過する船舶を基準船、進路交差点を先に通過する船舶を相手船と定義した。

140 パターンの行会いケースの航跡図を図 3.1.2～図 3.1.25 に示す。

表 3.1.2 解析対象船舶（船種別）

相手船 基準船	貨物船	コンテナ船	自動車 運搬船	土砂 運搬船	タンカー	ケミカル タンカー	フェリー	漁船	その他	合計
貨物船	42	4	2	3	4	18	6	2	—	81
コンテナ船	2	2	—	—	—	1	1	—	1	7
土砂 運搬船	2	1	—	4	—	—	—	—	—	7
タンカー	10	—	1	2	—	1	1	—	—	15
ケミカルタンカー	13	—	—	—	1	3	1	—	—	18
旅客船	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
フェリー	4	—	—	1	1	—	—	—	—	6
漁船	2	—	—	—	—	—	—	—	—	2
タグ ボート	—	—	—	1	—	—	—	—	—	1
その他	—	—	—	—	—	1	—	1	—	2
合計	75	7	3	11	7	24	9	3	1	140

表 3.1.3 解析対象船舶（船型別）

相手船 基準船	5トン 未満	20～ 100トン	100～ 500トン	500～ 1千トン	1千～ 5千トン	5千～ 1万トン	1万トン 以上	合計
5トン未満	—	—	2	—	—	—	—	2
20～100トン	1	—	5	—	—	—	—	6
100～500トン	2	3	37	11	11	7	2	73
500～1千トン	—	—	13	1	8	4	1	27
1千～5千トン	—	—	12	1	3	3	1	20
5千～1万トン	—	—	5	1	2	1	1	10
1万トン以上	—	—	1	—	—	—	1	2
合計	3	3	75	14	24	15	6	140

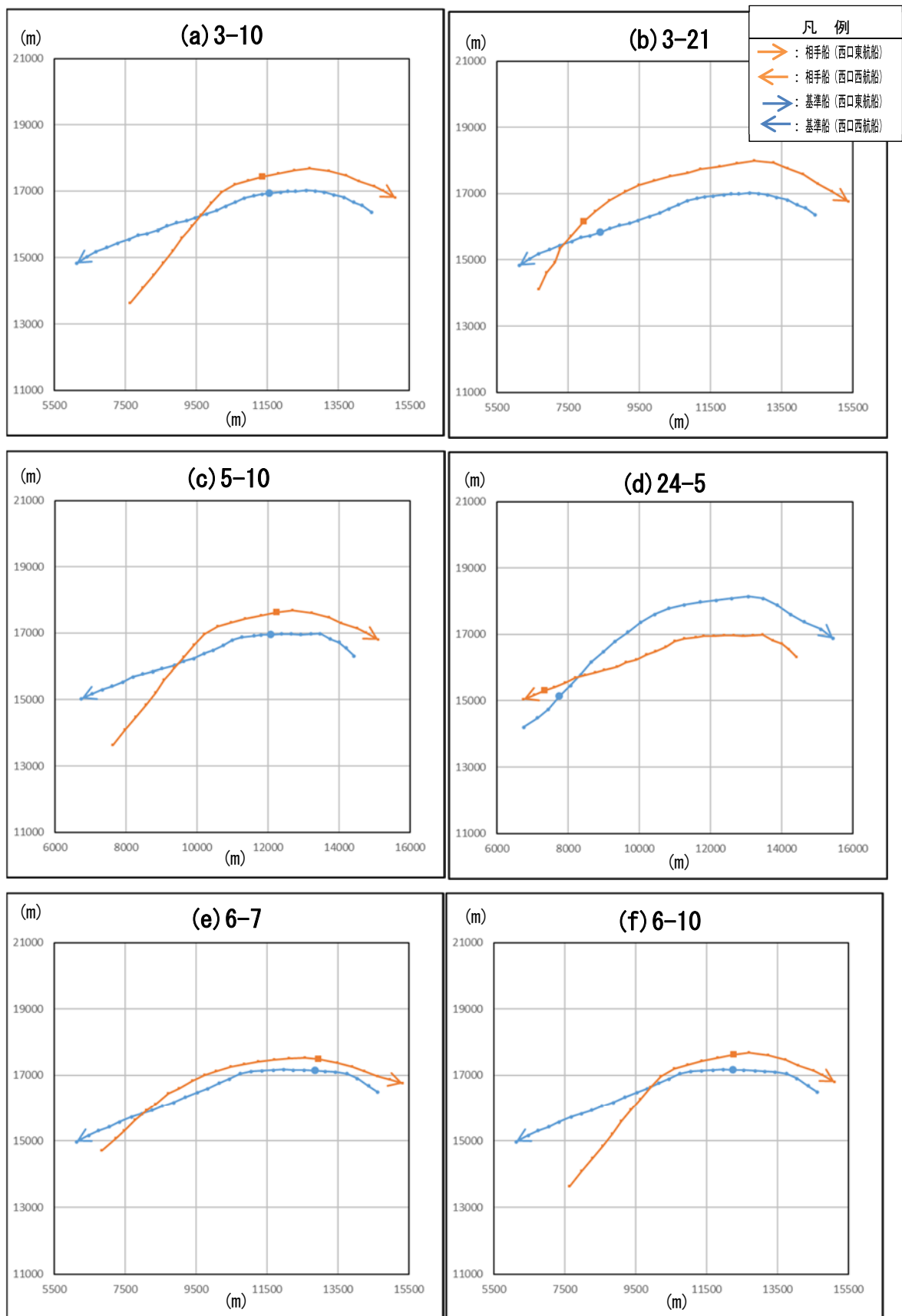


図 3.1.2 行会いケースの航跡図 (1/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。(以下同様)

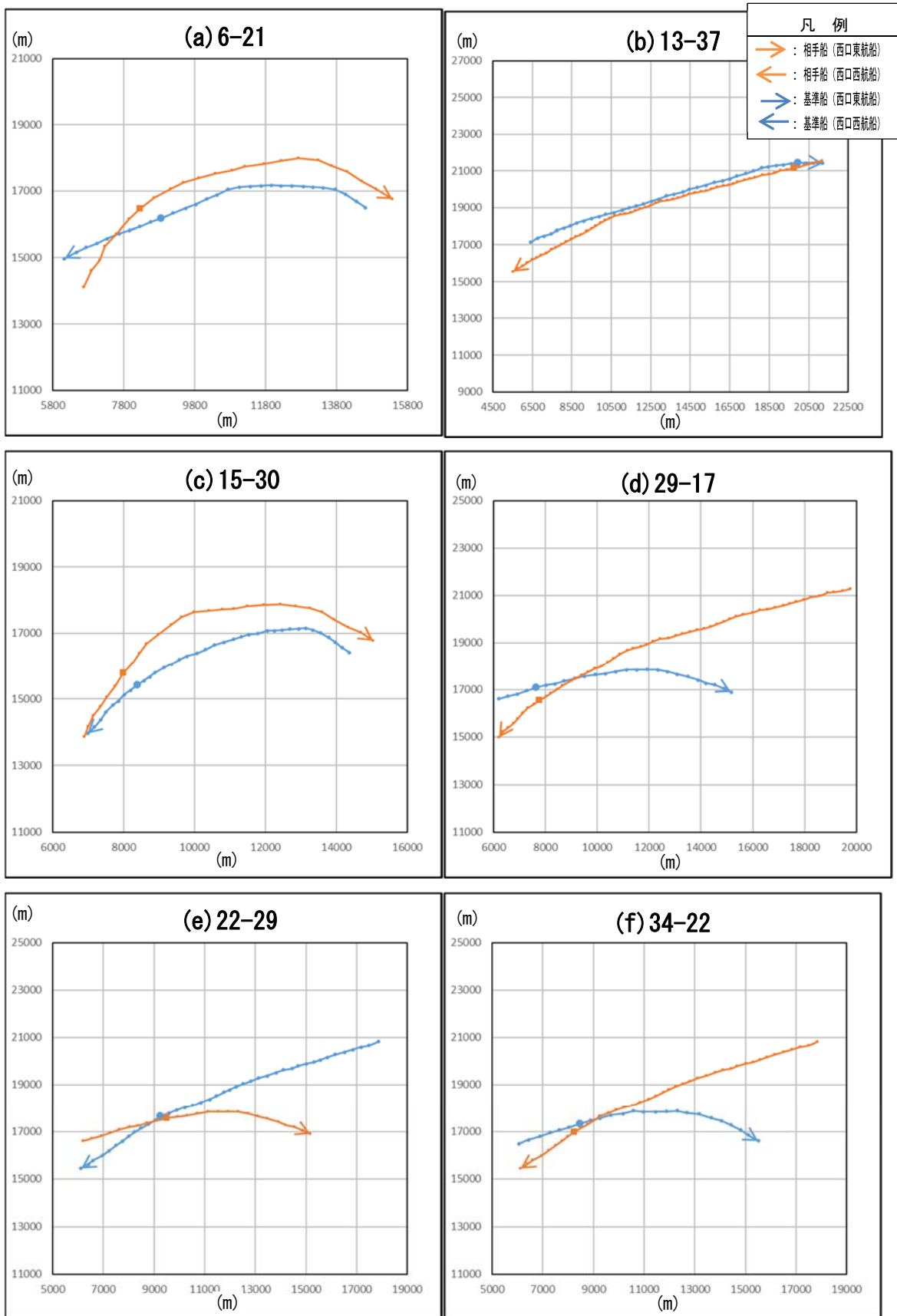


図 3.1.3 行会いケースの航跡図 (2/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

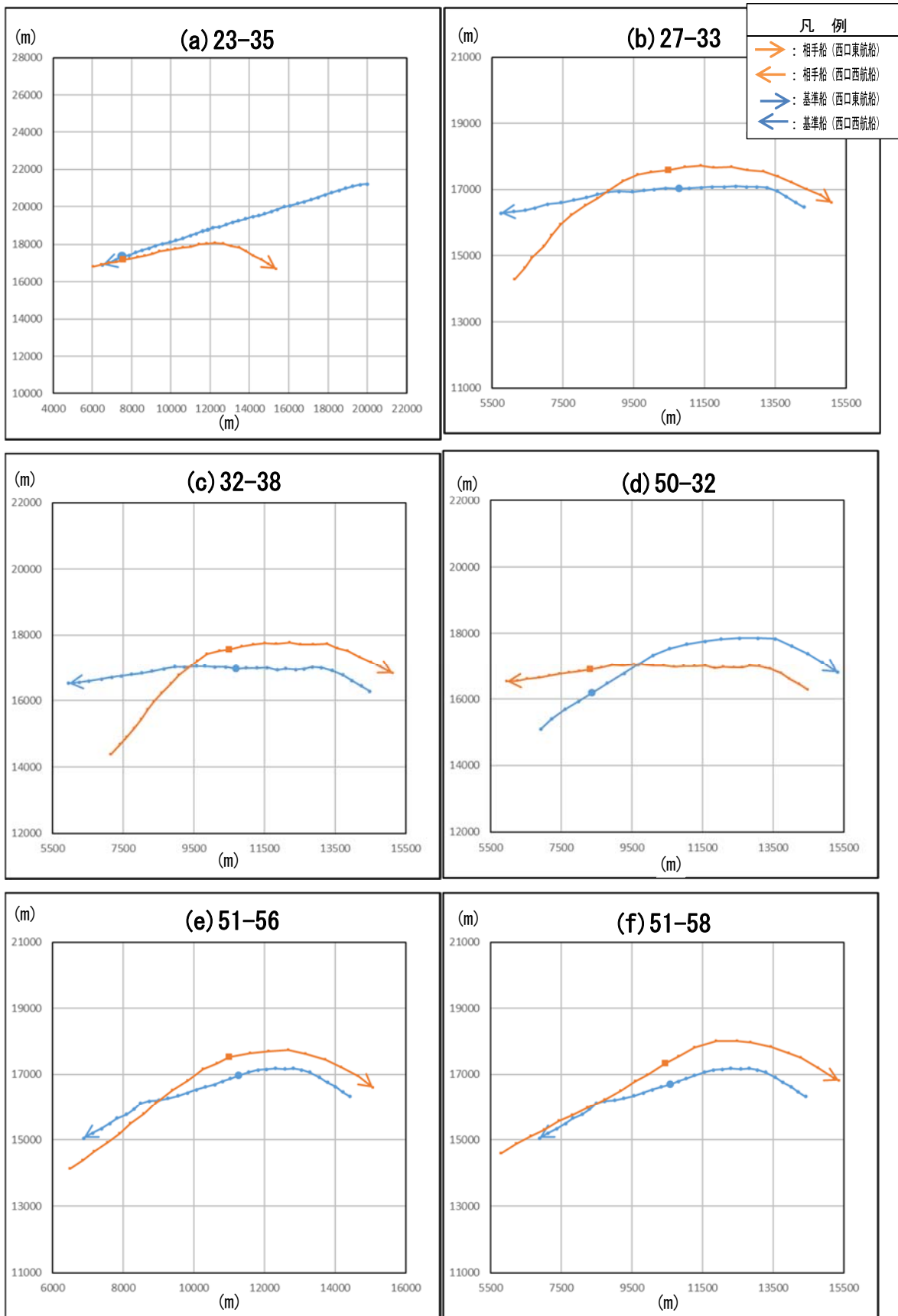


図 3.1.4 行会いケースの航跡図 (3/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

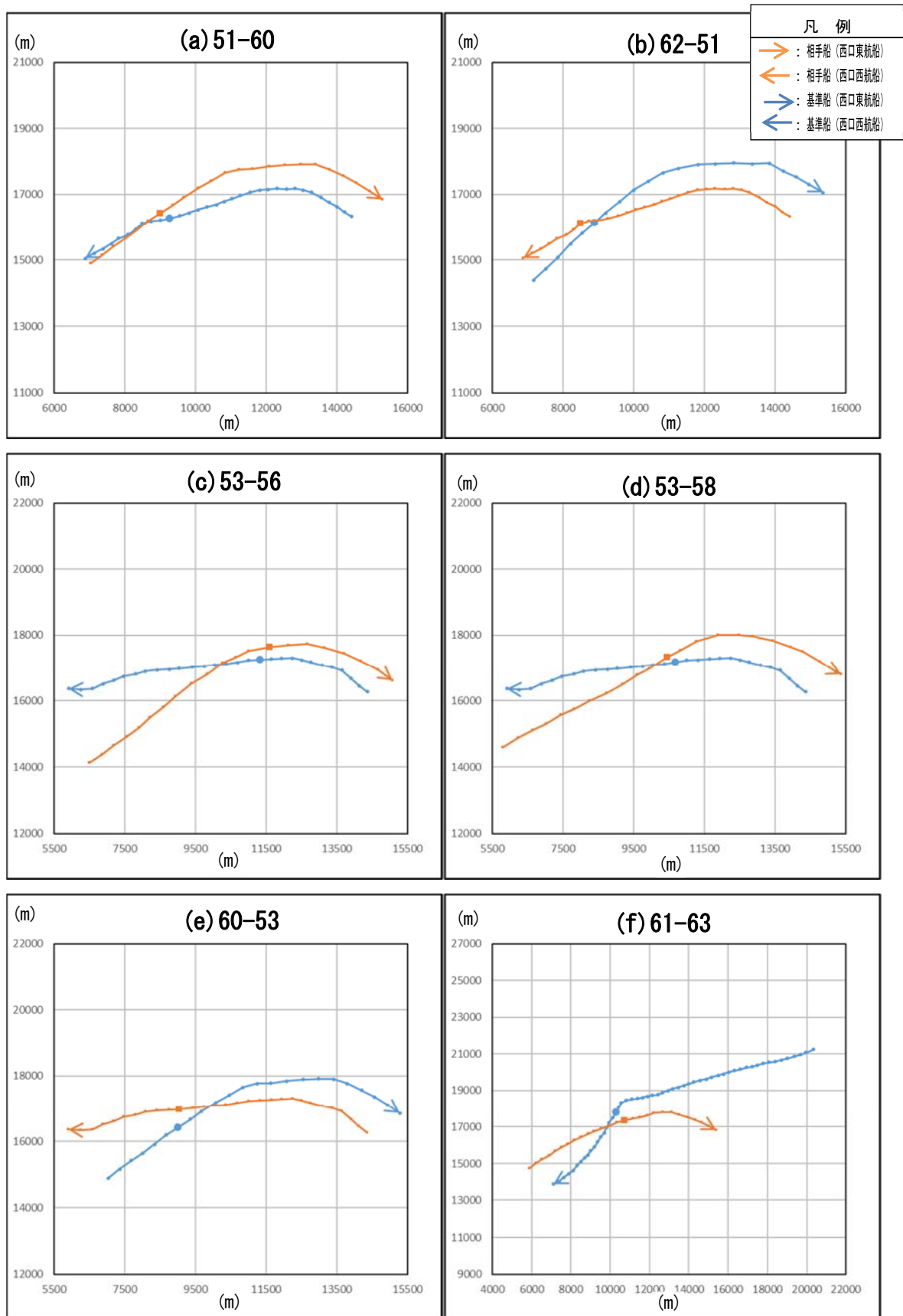


図 3.1.5 行会いケースの航跡図 (4/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

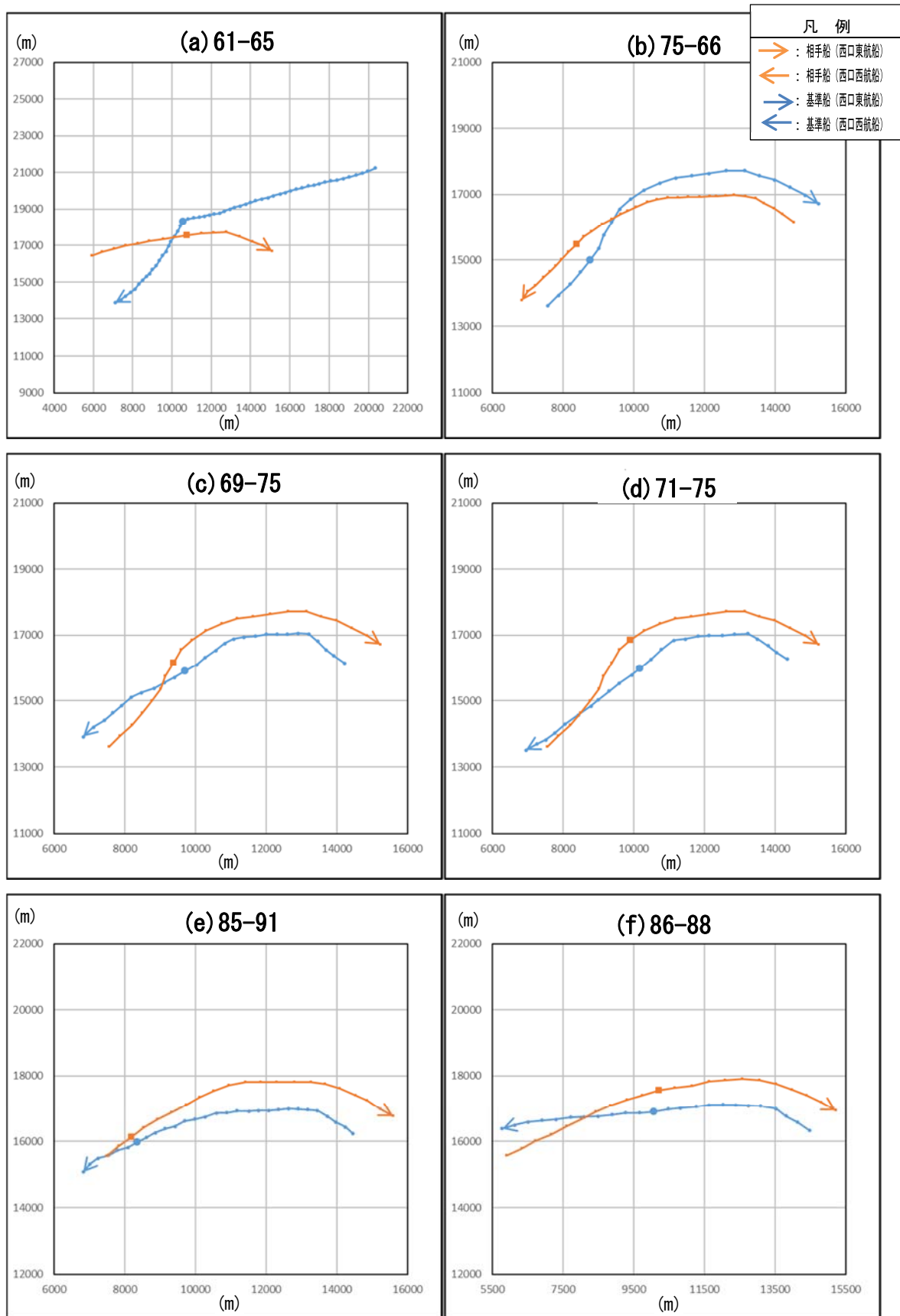


図 3.1.6 行会いケースの航跡図 (5/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

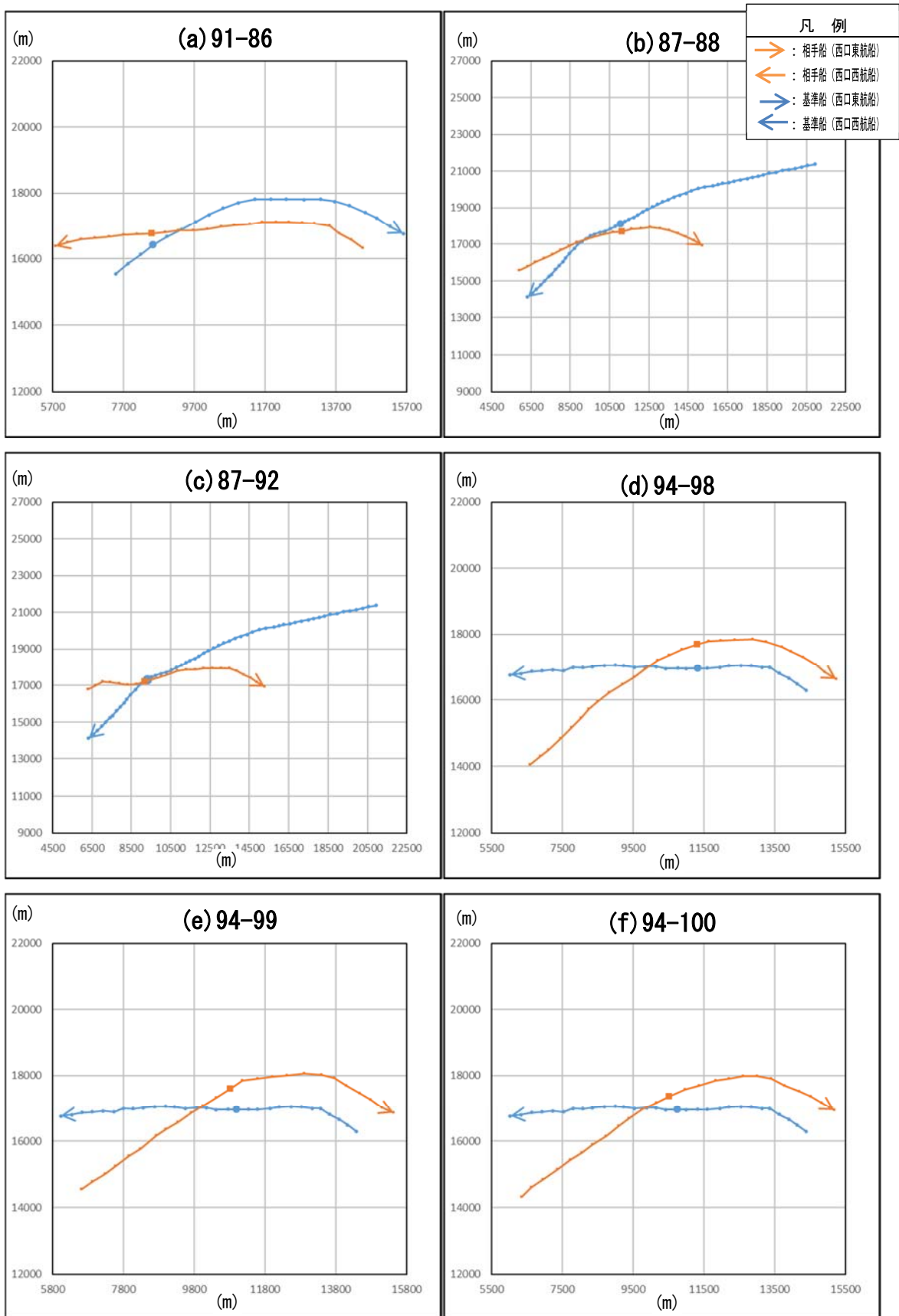


図 3.1.7 行会いケースの航跡図 (6/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

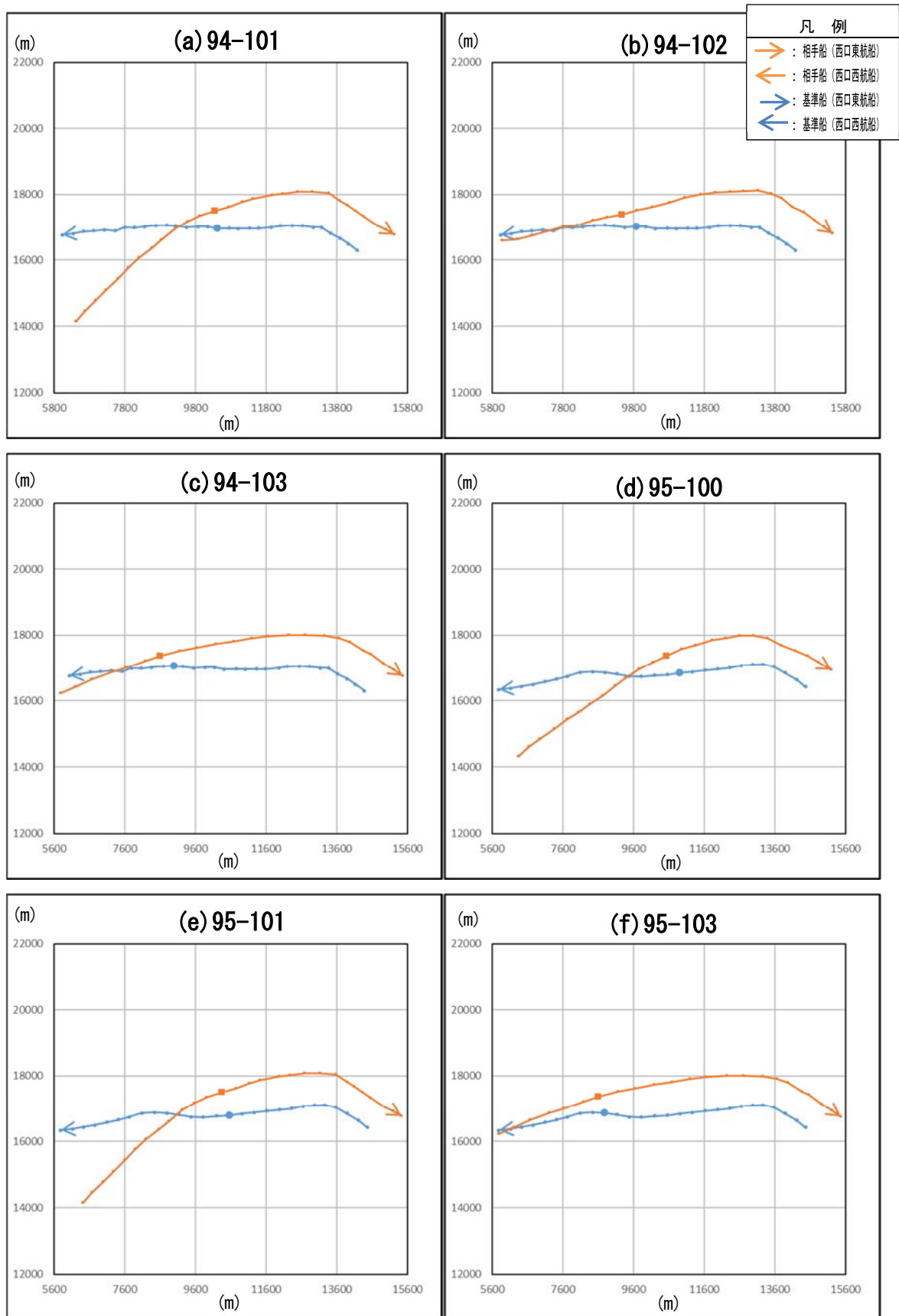


図 3.1.8 行会いケースの航跡図 (7/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

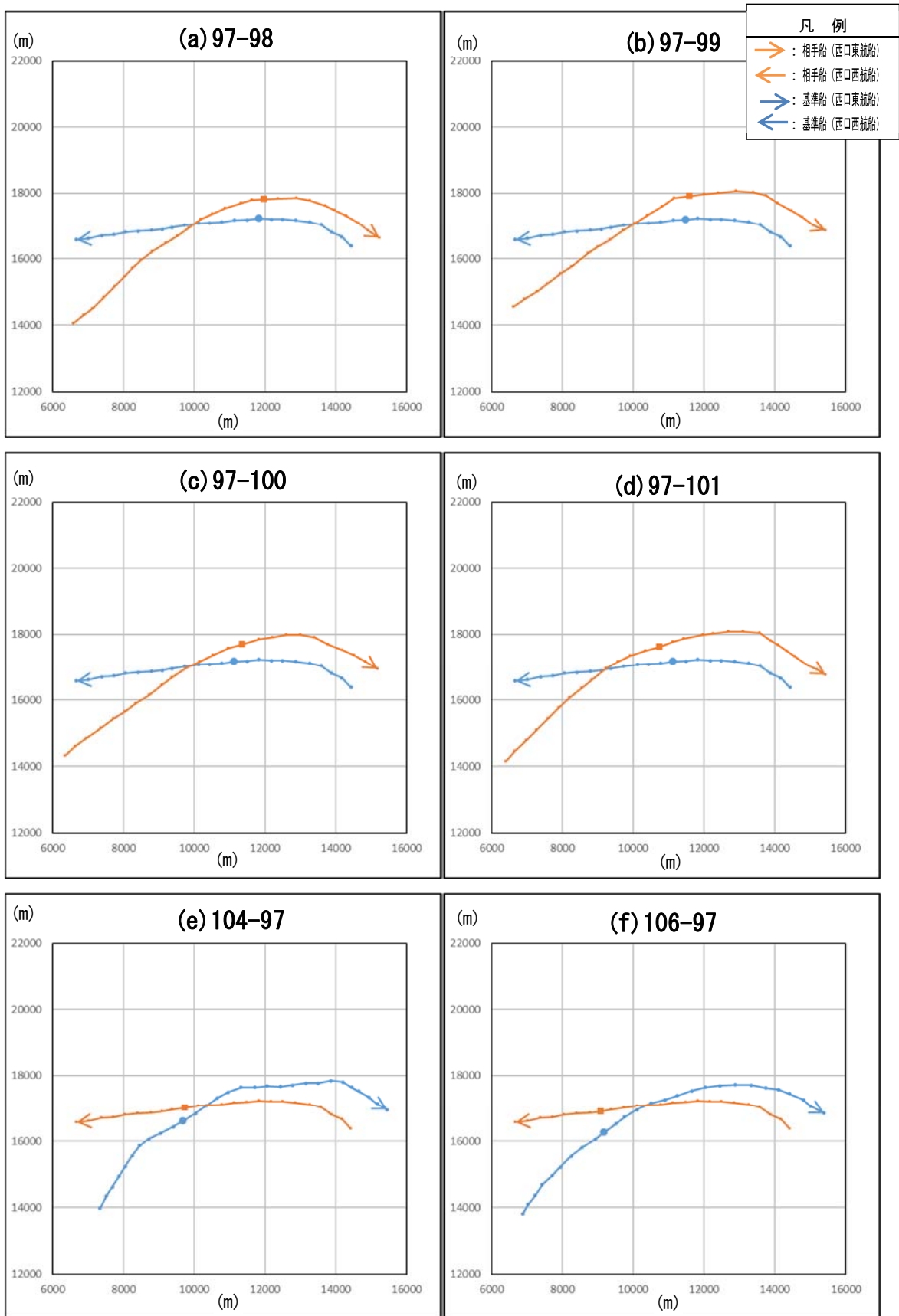


図 3.1.9 行会いケースの航跡図 (8/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

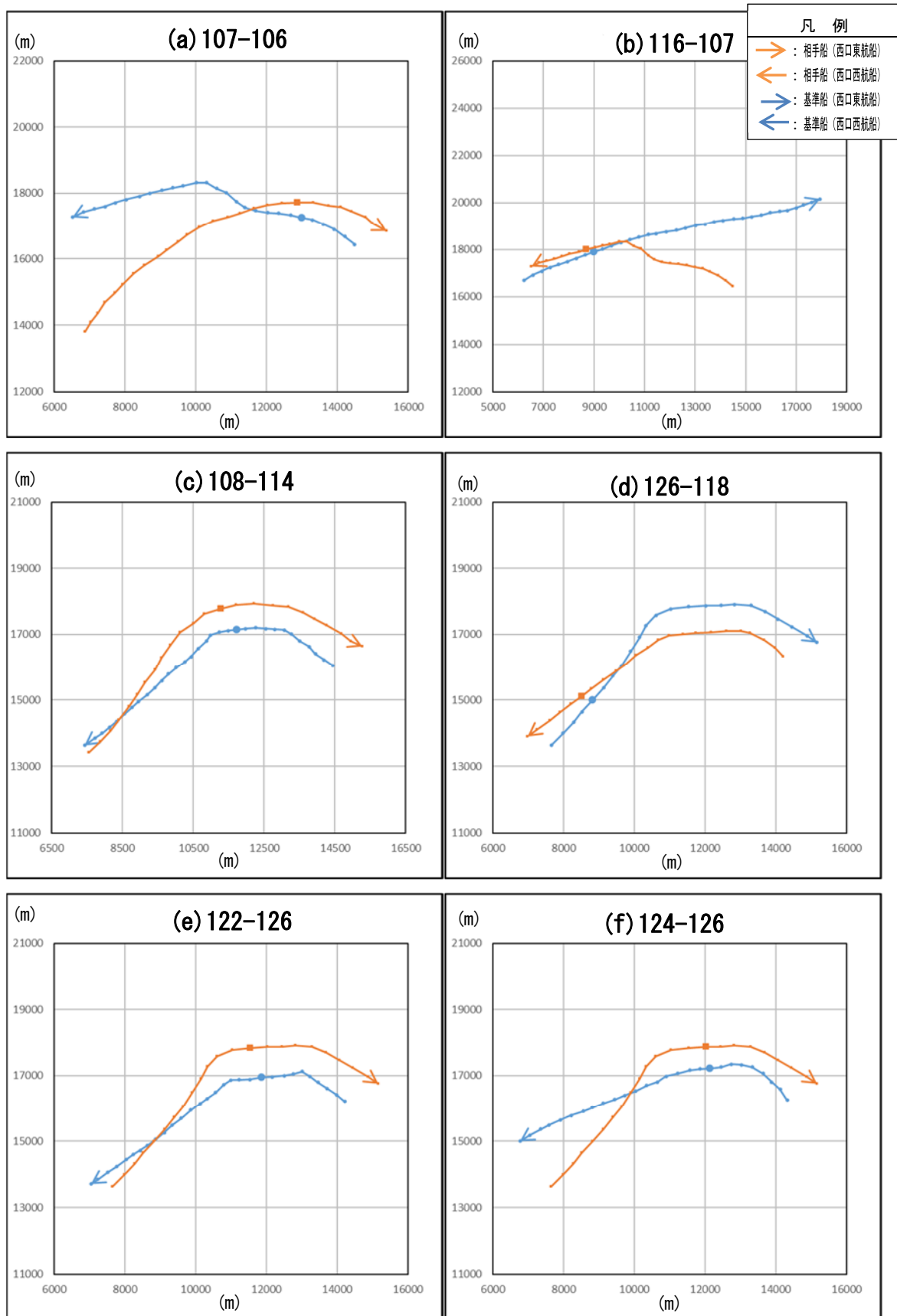


図 3.1.10 行会いケースの航跡図 (9/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

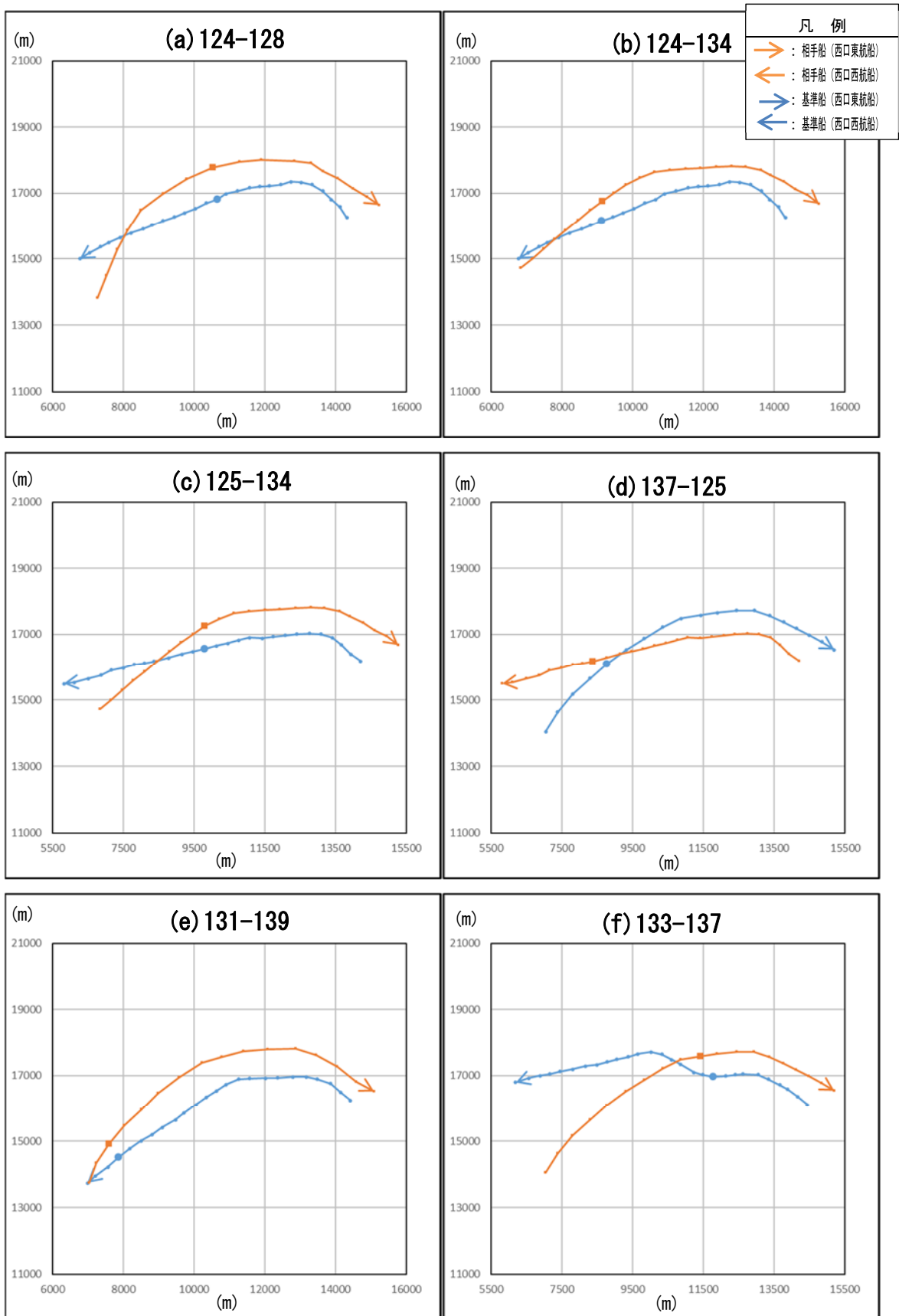


図 3.1.11 行会いケースの航跡図 (10/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

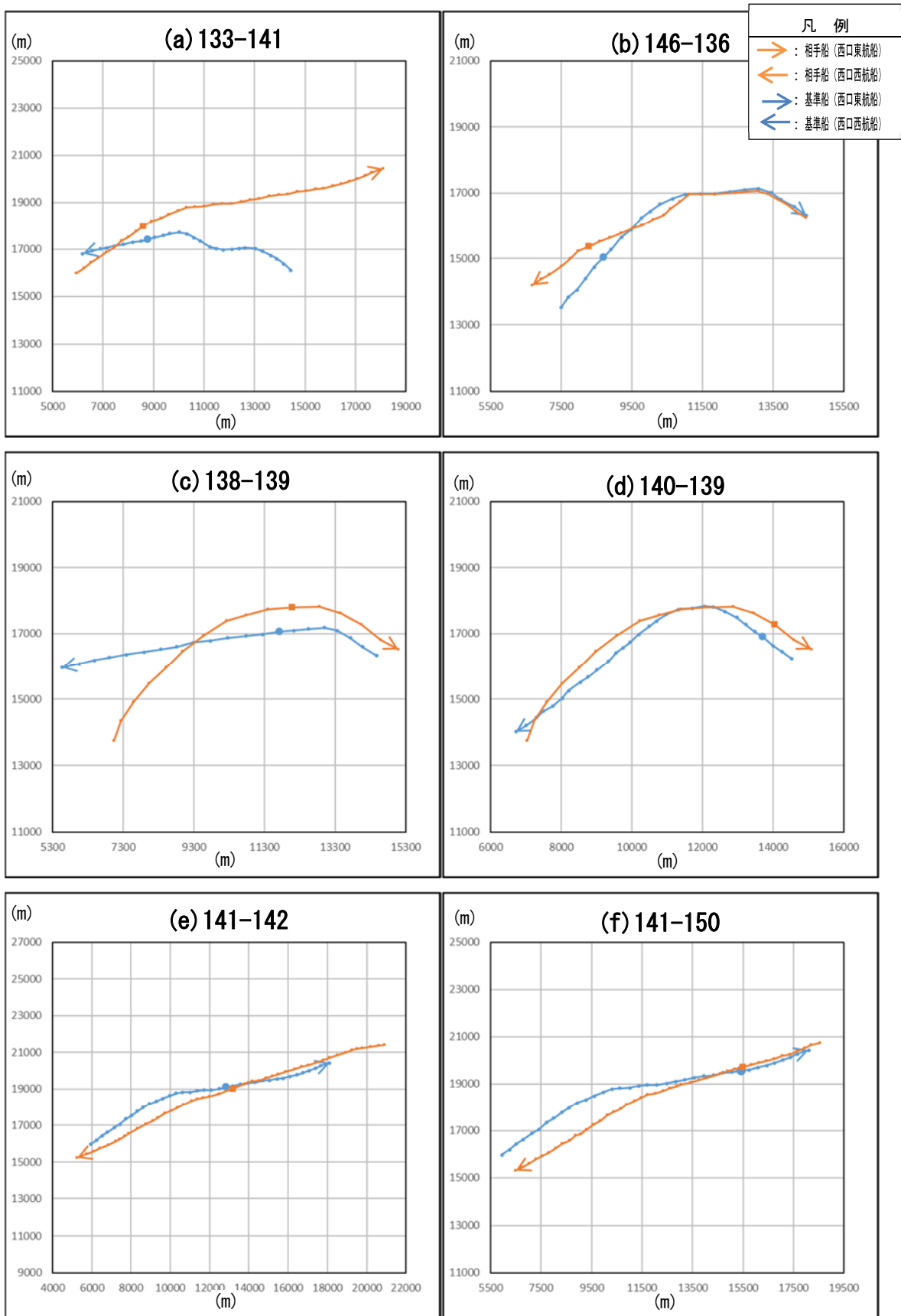


図 3.1.12 行会いケースの航跡図 (11/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

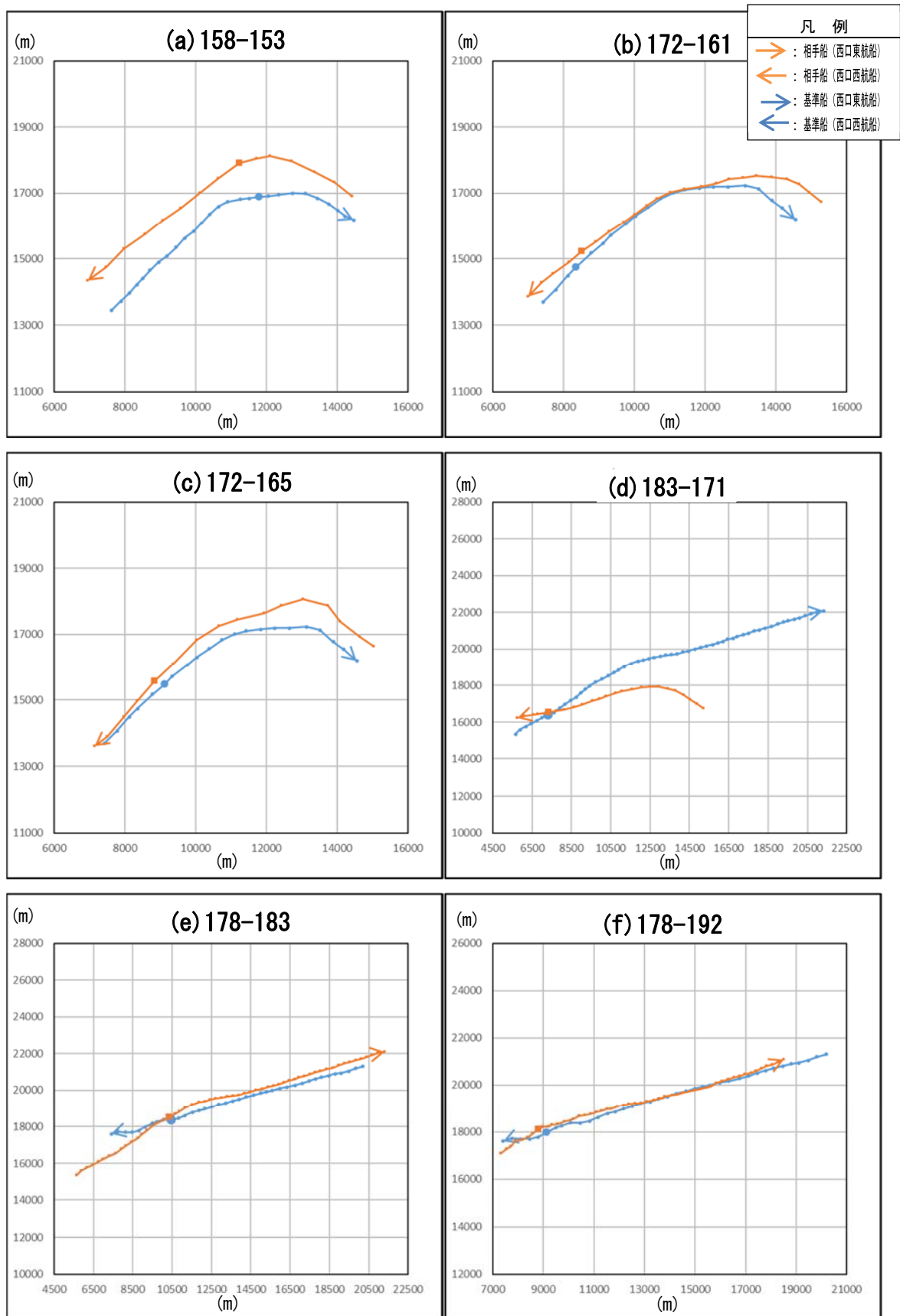


図 3.1.13 行会いケースの航跡図 (12/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

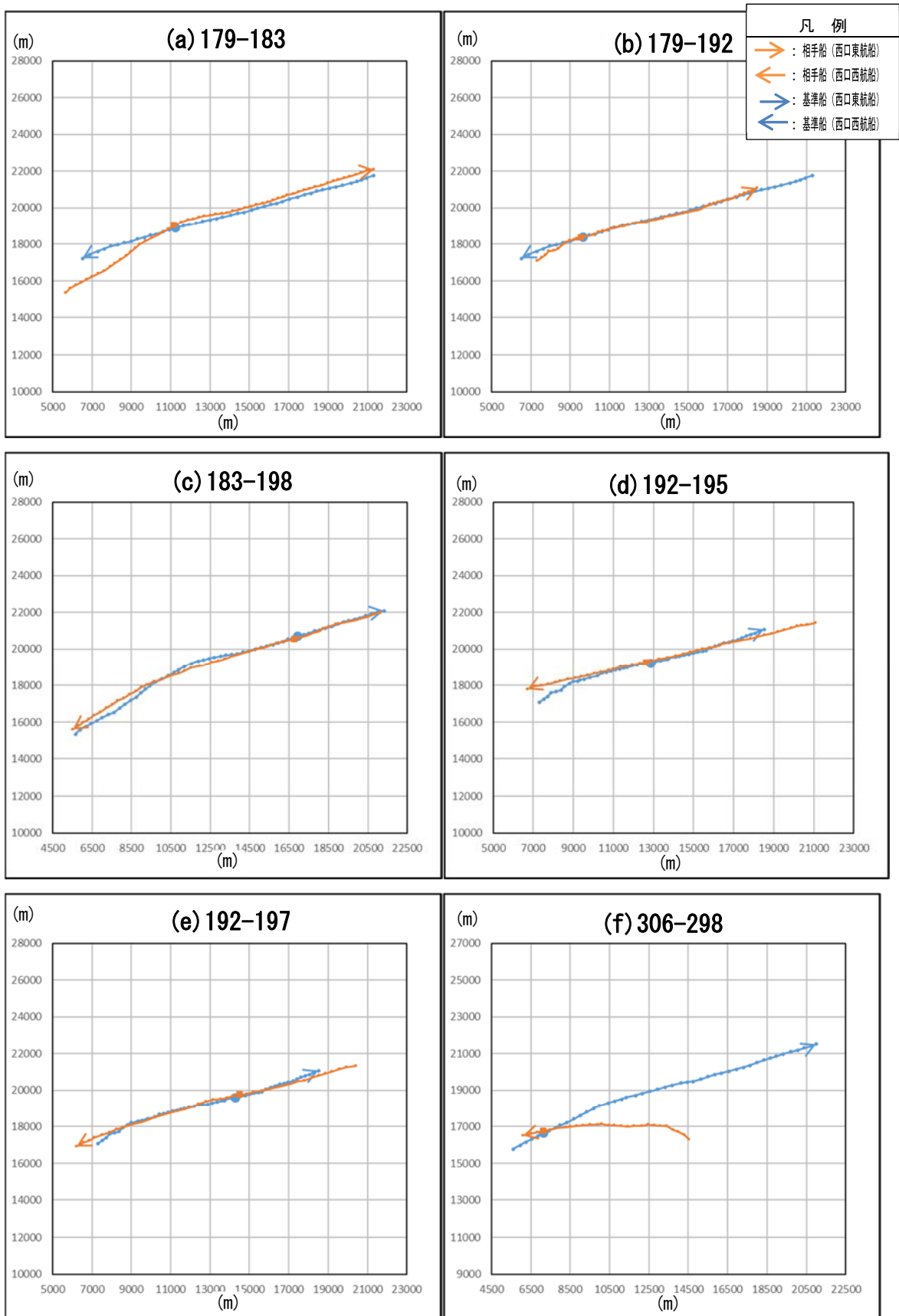


図 3.1.14 行会いケースの航跡図 (13/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

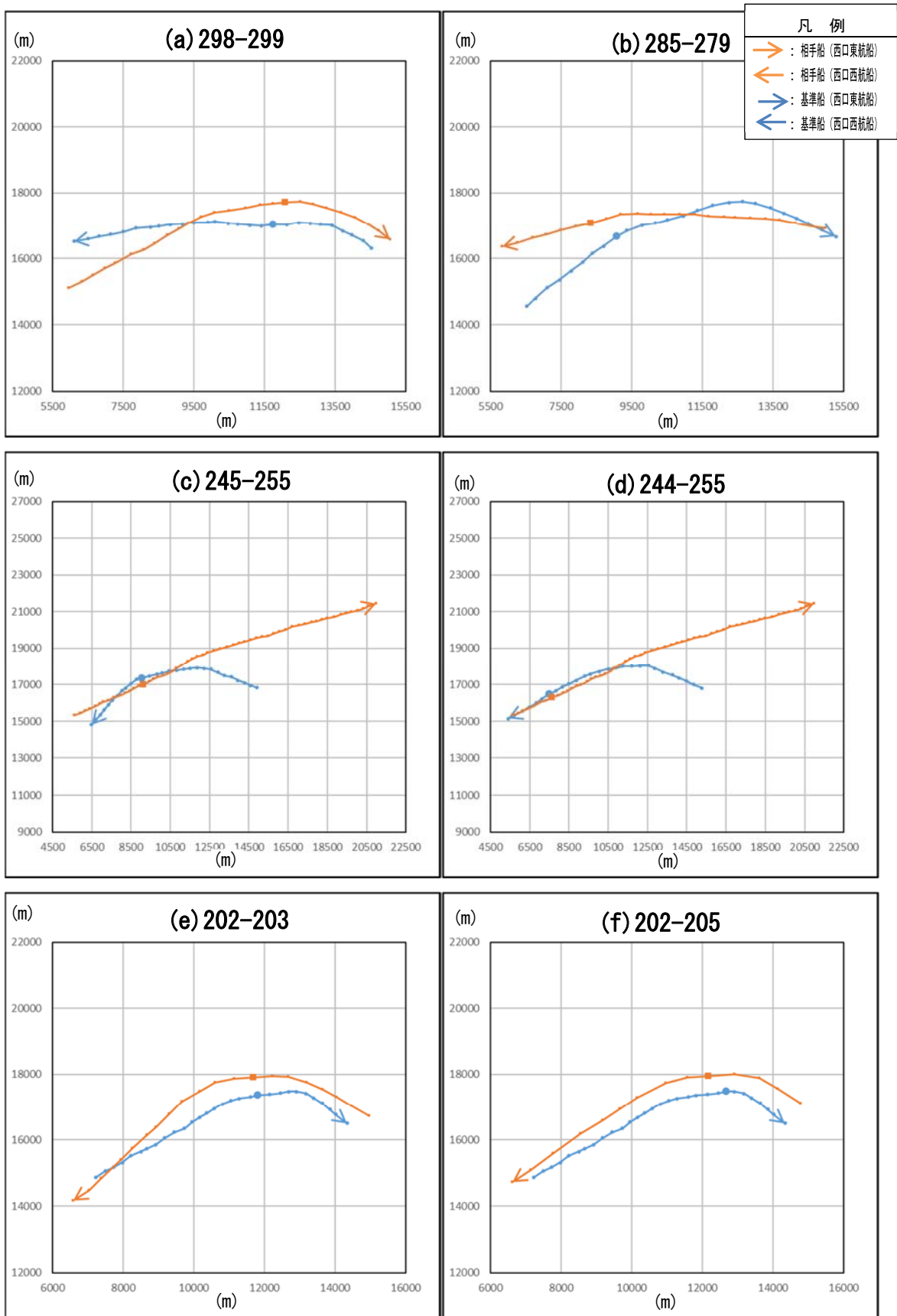


図 3.1.15 行会いケースの航跡図 (14/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

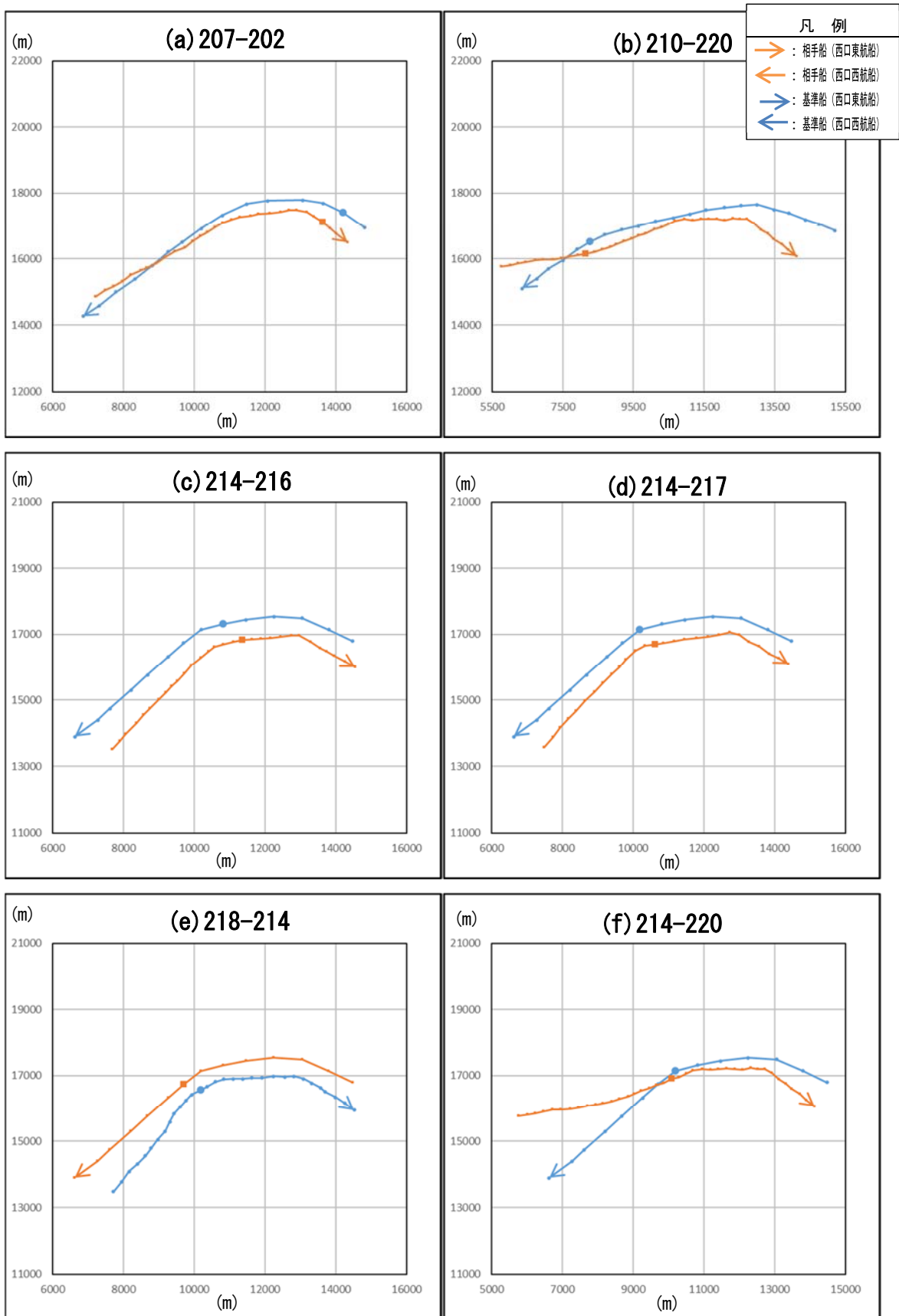


図 3.1.16 行会いケースの航跡図 (15/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

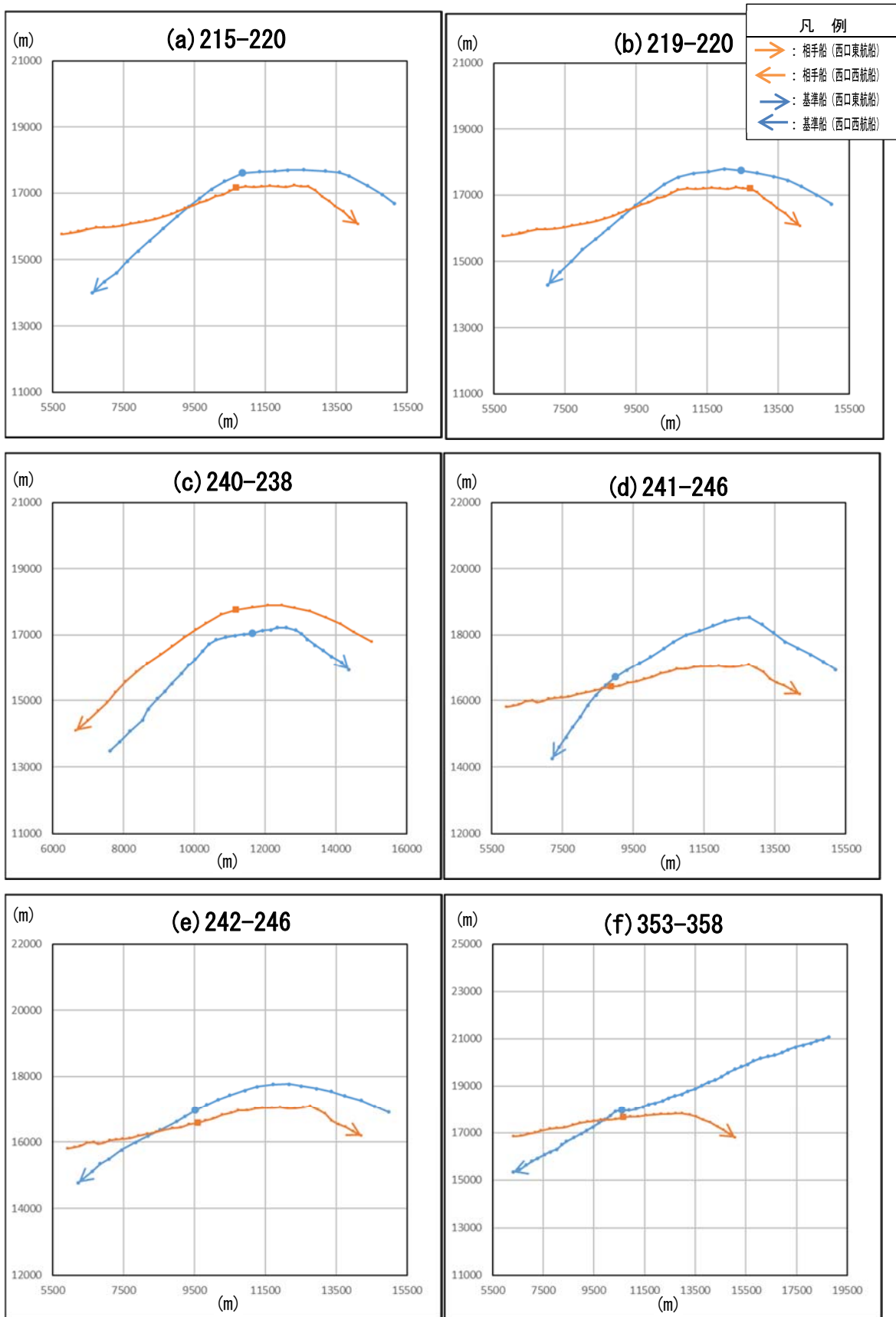


図 3.1.17 行会いケースの航跡図 (16/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

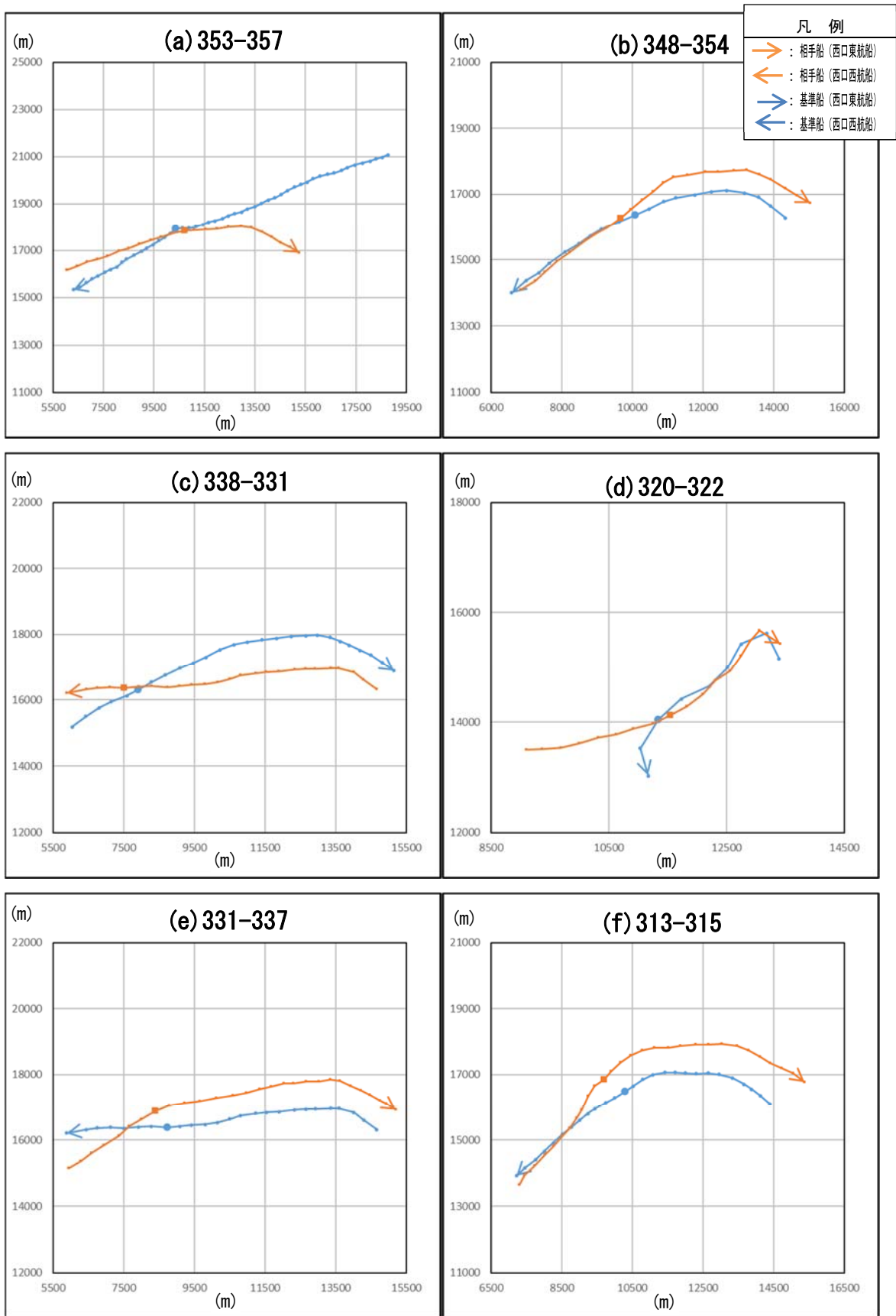


図 3.1.18 行会いケースの航跡図 (17/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

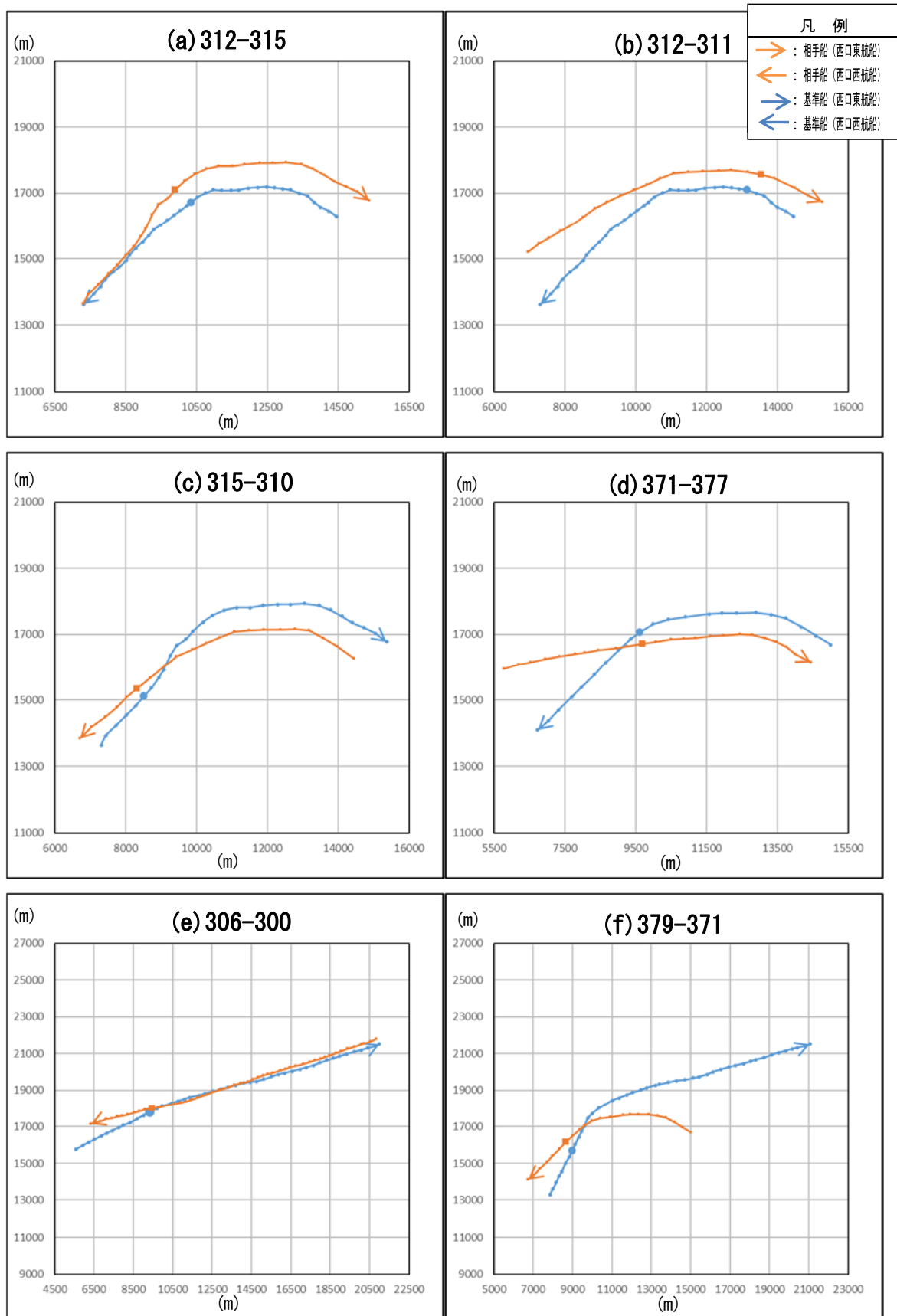


図 3.1.19 行会いケースの航跡図 (18/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

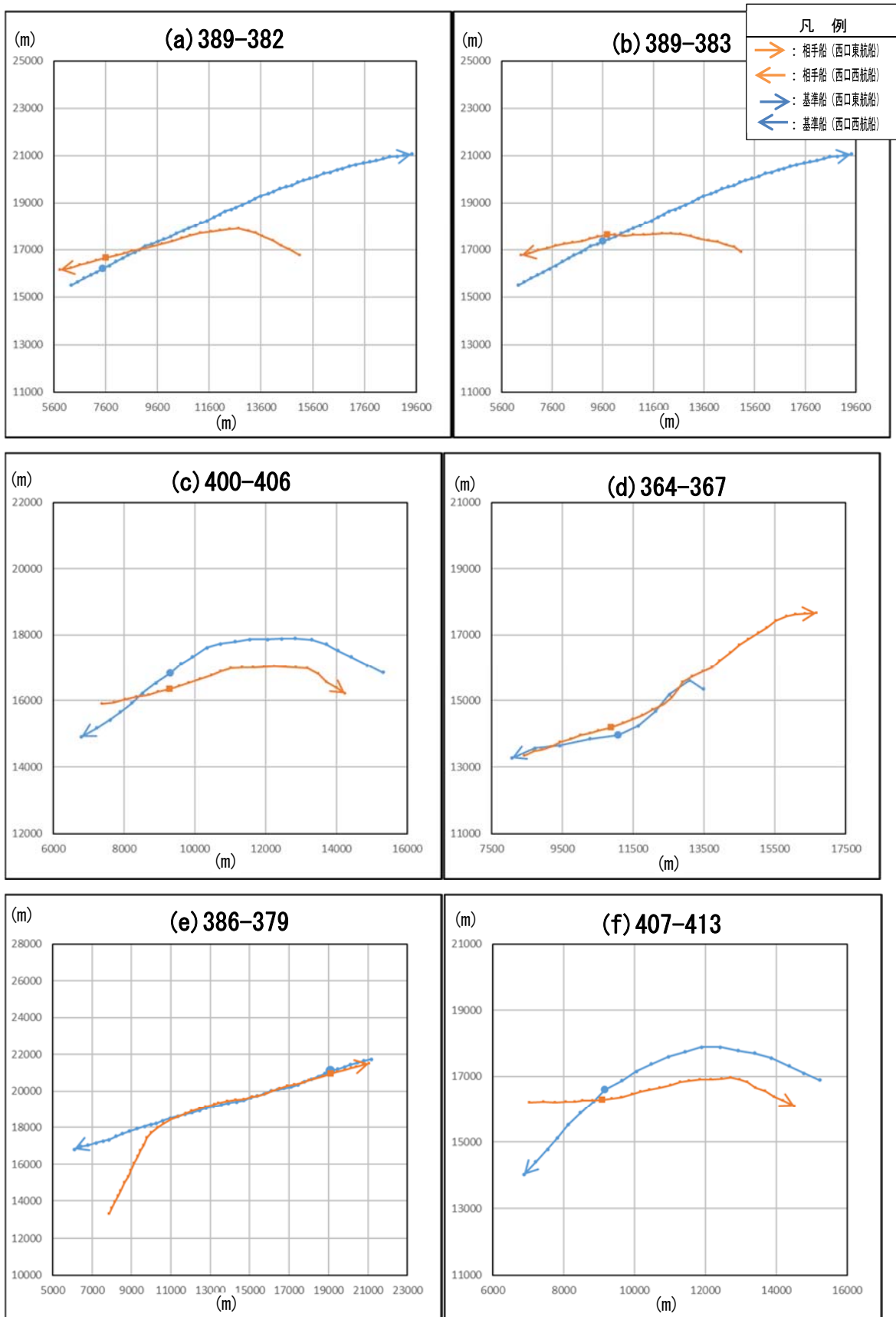


図 3.1.20 行会いケースの航跡図 (19/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

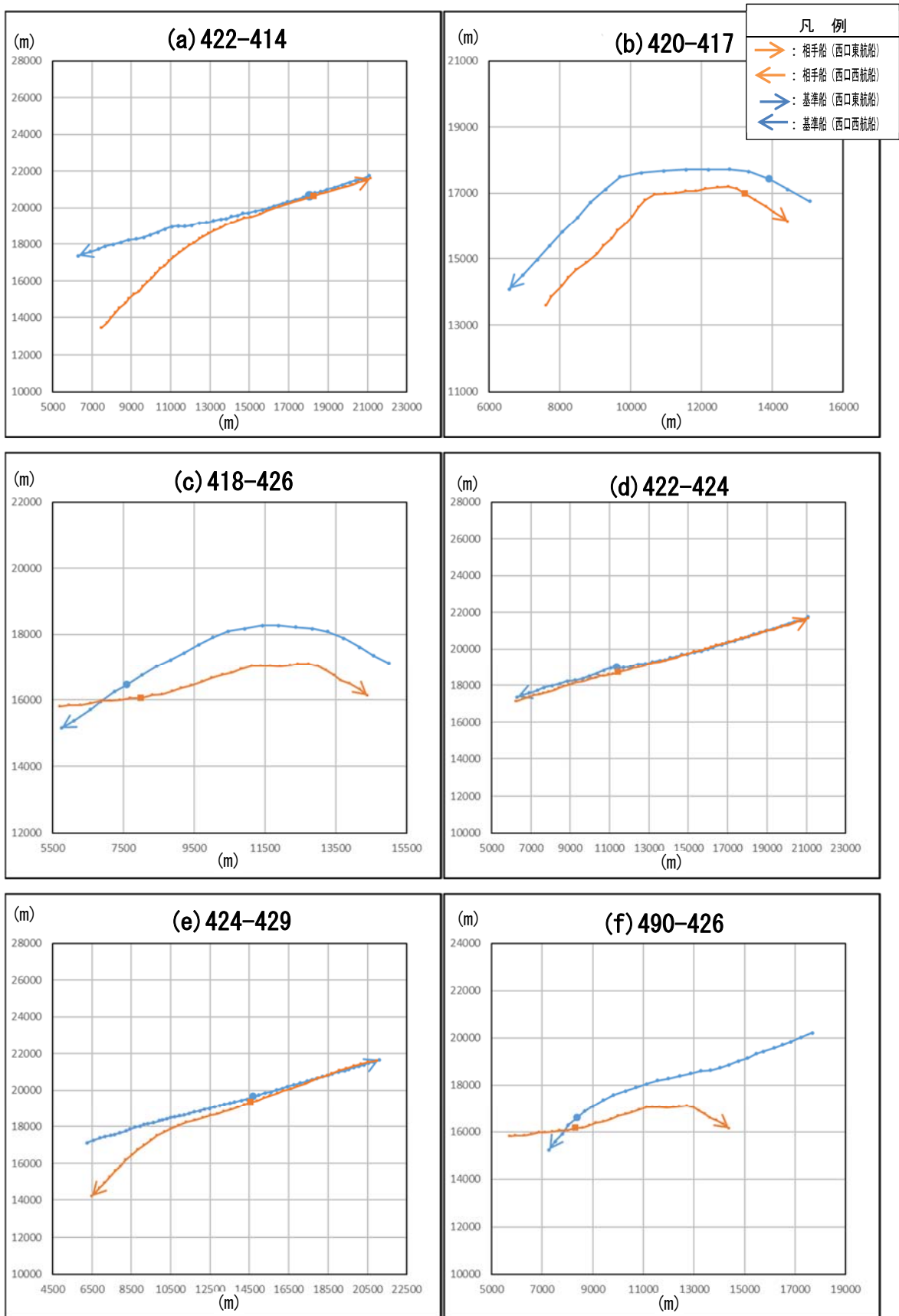


図 3.1.21 行会いケースの航跡図 (20/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

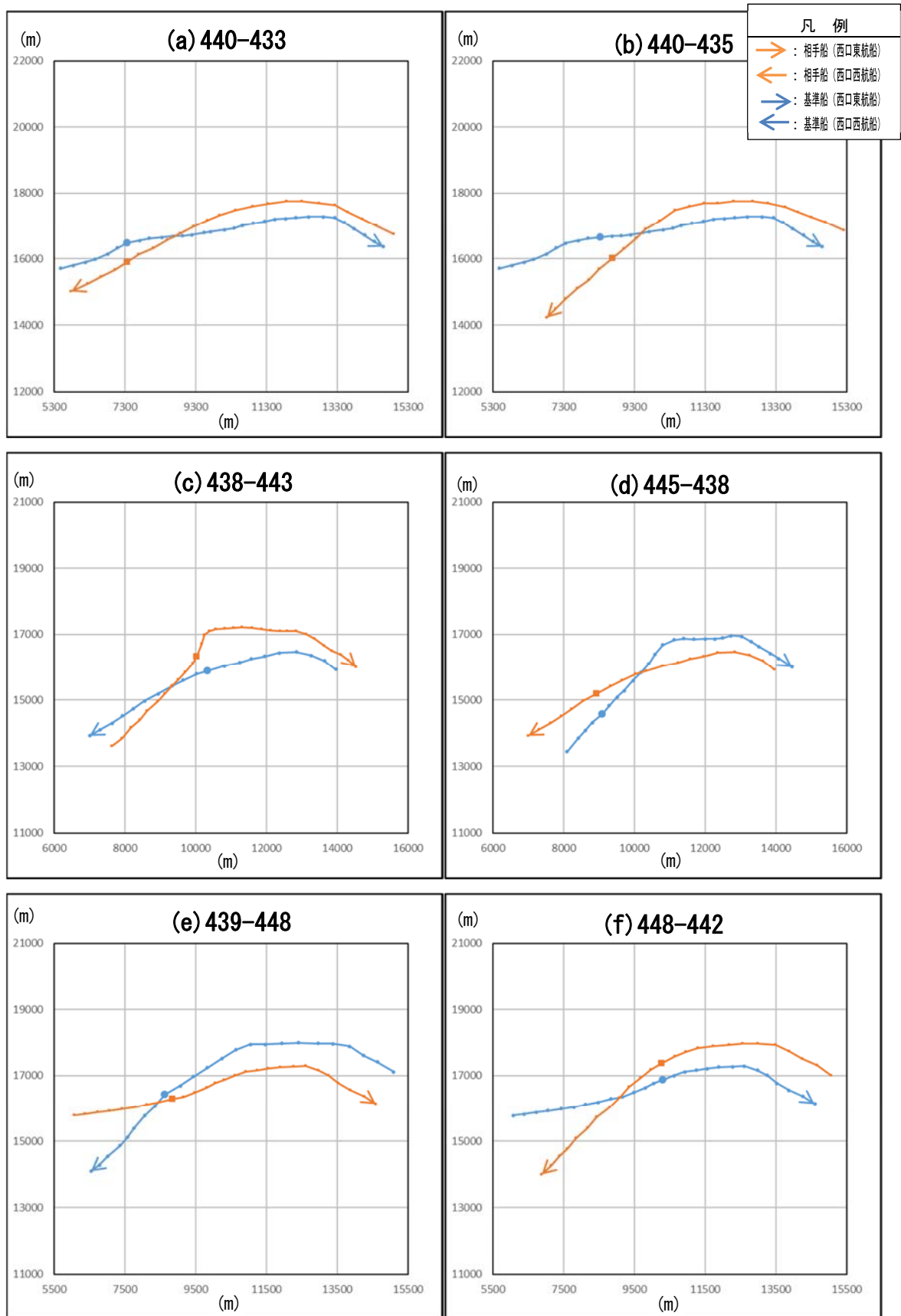


図 3.1.22 行会いケースの航跡図 (21/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

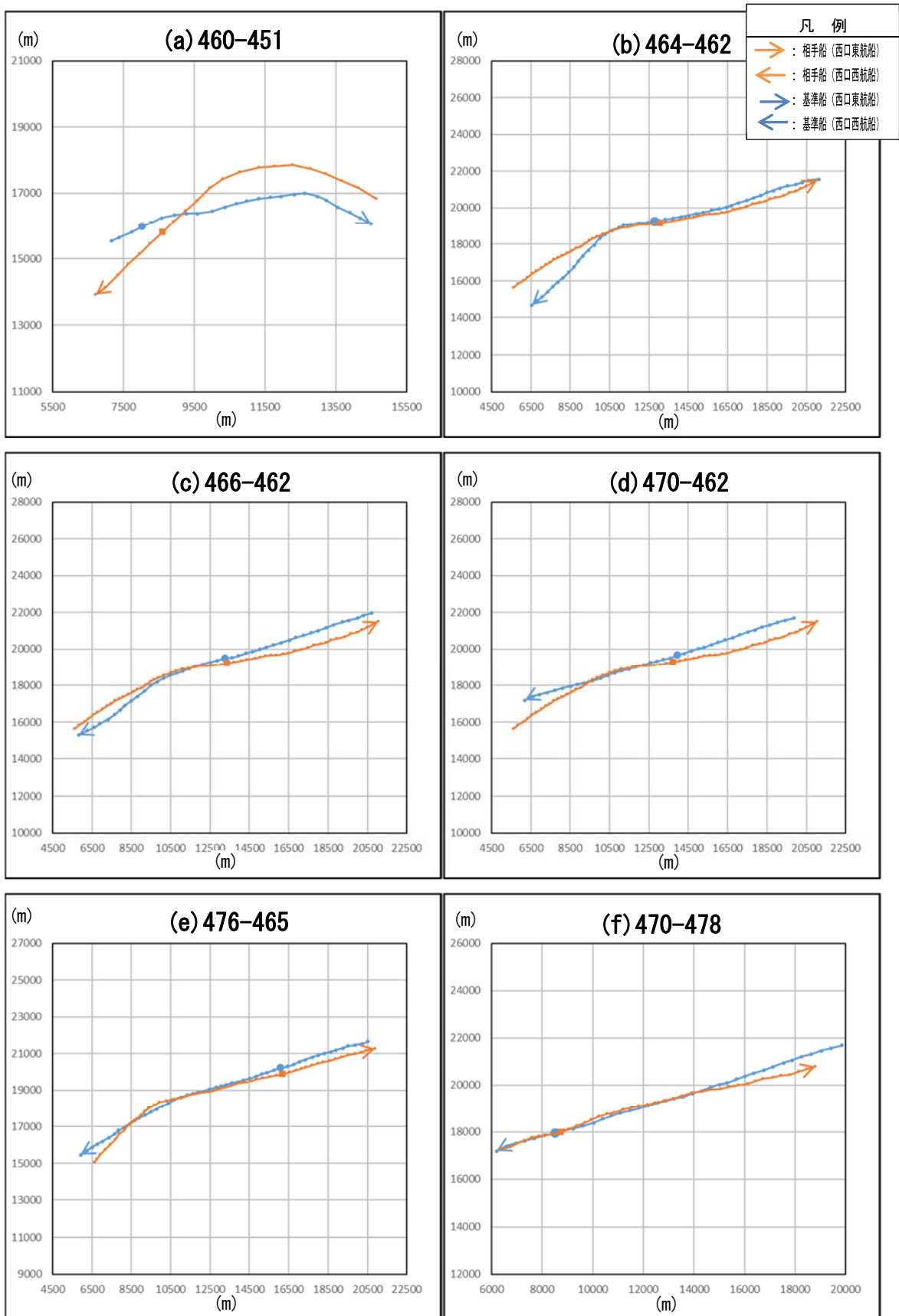


図 3.1.23 行会いケースの航跡図 (22/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

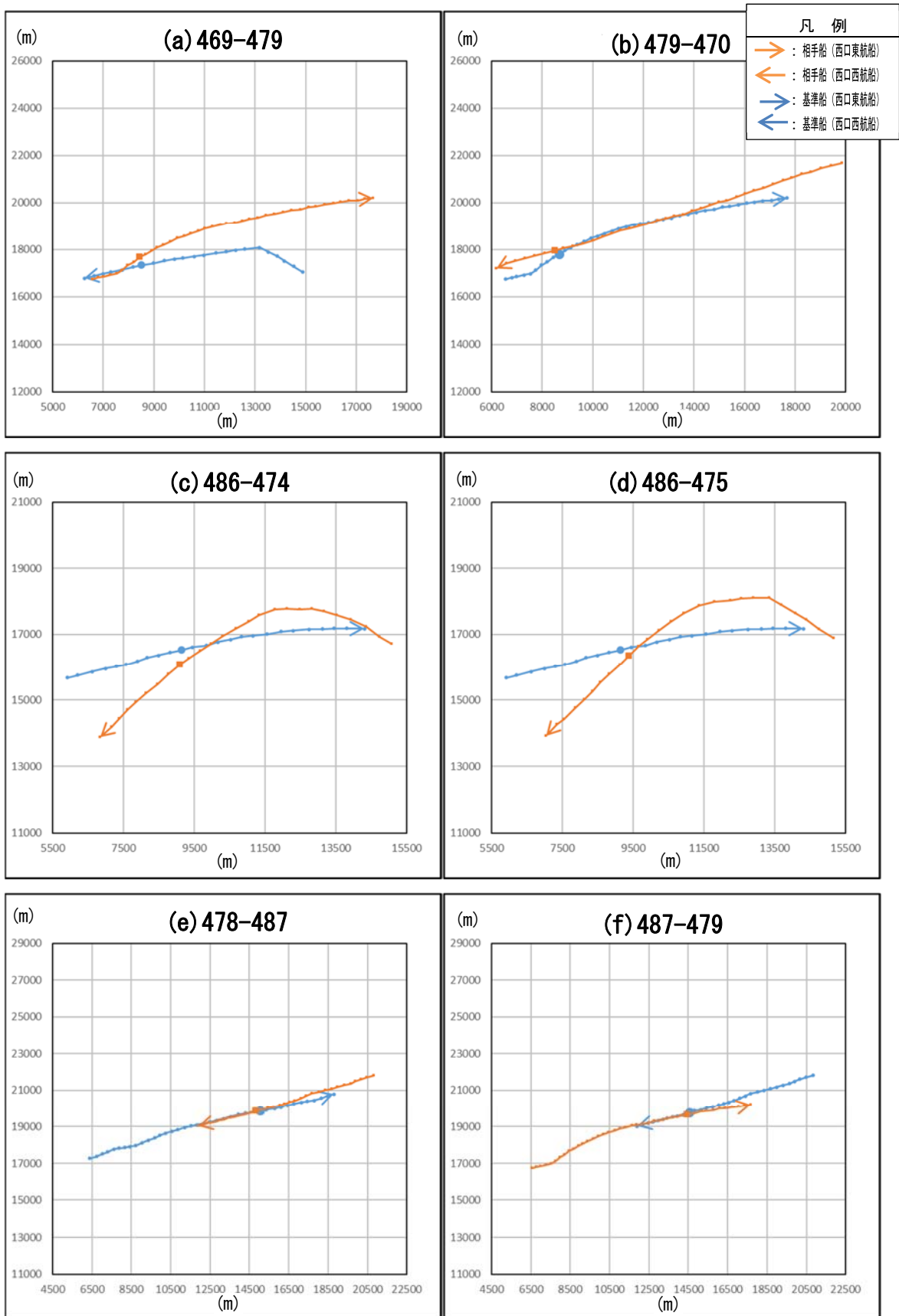


図 3.1.24 行会いケースの航跡図 (23/24)

※グラフ中の(a)~(f)に続くタイトル番号は、2.3 節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

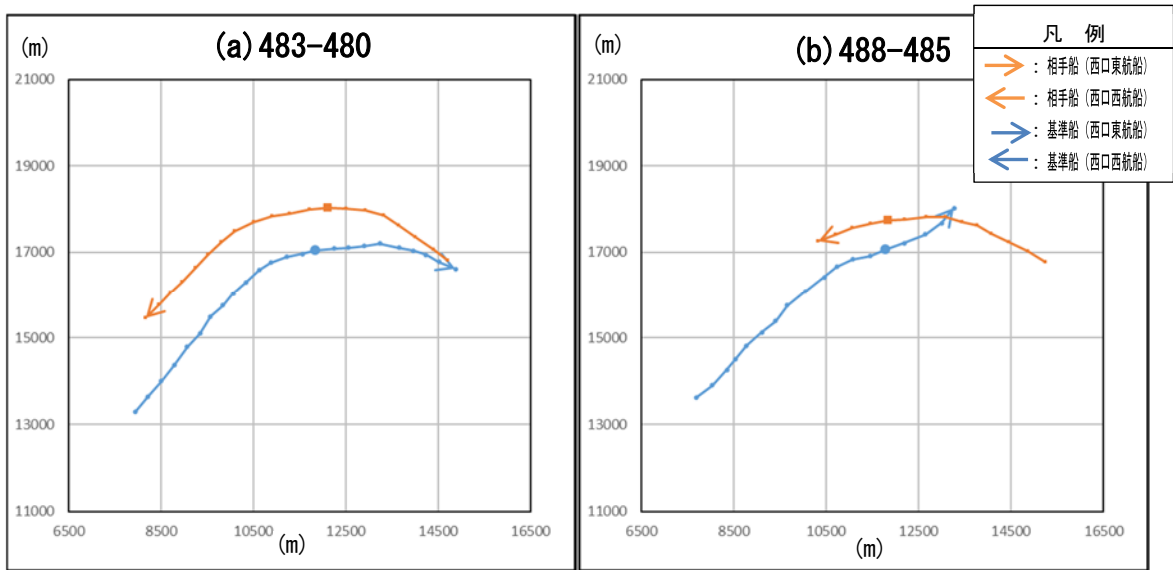


図 3.1.25 行会いケースの航跡図 (24/24)

※グラフ中の(a)~(b)に続くタイトル番号は、2.3節に示した全通航隻数 474 隻の調査時における一連番号を示す。また、記号 (■、●) は、同時刻の最接近点を示す。

3.2 相対航跡

前節で抽出した 140 パターンの行会いケースの相対航跡を図 3.2.1～図 3.2.6 に示す。

この相対航跡は、基準船（進路交差点を後から通過する船と定義）から見た相手船の航跡を示したもので、図中の (0,0) が基準船の位置であり、CourseUp での相対航跡となるため、正確には平均進路での相対航跡である。航跡が第 1 象限から第 3 象限へ向かう航跡は左舷対左舷で交差したケースを示し、第 2 象限から第 4 象限へ向かう航跡は右舷対右舷で交差したケースをそれぞれ示している。図 3.2.2～図 3.2.6 航跡中のマーカーは 1 分毎の位置を示している。

図 3.2.1 は、140 パターンの全ての相対航跡をを重畳させたものであり、AIS 搭載船同士の相対航跡を緑線で、AIS 搭載船と AIS 非搭載船の相対航跡をオレンジ線で、AIS 非搭載船同士の相対航跡を青線で区分し図示したものであり、見易くするためグラフのアスペクト比 2:1 にしている。図 3.2.2～図 3.2.4 は基準船と相手船の AIS 搭載の有無により 3 分類した相対航跡を、図 3.2.5 及び図 3.2.6 は来島海峡中水道における潮流の向き（北流・南流）により 2 分類した相対航跡をそれぞれ図示したものである。なお、AIS 搭載の有無は、同海域の同時刻帯の AIS データとレーダ観測データの航跡及び目視データと照合することで判断した。

図 3.2.2～図 3.2.4 に示す相対航跡の正横航過距離の平均値を求めると、AIS 搭載船同士が 508m、AIS 搭載船と AIS 非搭載船が 452m、AIS 非搭載船同士が 250m であった。実距離からは AIS 搭載船同士が最も大きい結果となっているものの、実距離での比較では、船の大きさ（長さ）による要素は考慮されていないため、船の大きさ（長さ）による正規化の処理が必要となる。Lg は、基準船と相手船のそれぞれの船の大きさをもとに正規化した長さを表しており、(式 3.2.1)に示すとおりである。

$$L_g = \left\{ \frac{(L_o^2 + L_t^2)}{2} \right\}^{1/2} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.2.1)}$$

ここで、L_o : 基準船の長さ (m)、L_t : 相手船の長さ (m) である。

船の大きさによる正規化処理した全長 (Lg) 比で表示した相対航跡を図 3.2.7 に示す。これによると AIS 搭載船同士が 5.5Lg、AIS 搭載船と AIS 非搭載船が 5.7Lg、AIS 非搭載船同士が 4.1Lg であり、AIS 搭載船と AIS 非搭載船が最も大きい結果となっている。また、序論で説明した図 1.1.7 に示すバンパーモデル (8L×3.2L) のうち下段に示す前方 6.4L、後方 1.6L としたバンパーを基準船周りに表示し、全長 (Lg) 比で表示した相対航跡に重ねた拡大図を図 3.2.8 に示す。これによると、相対航跡（相手船）が基準船のバンパー（閉塞領域）を概ね避けているのが確認できる。

また、順中逆西という特殊な航法が規定される来島海峡航路の特性上、潮流の流向が南流の場合に航路出入口における船舶の交差が発生し易いと考えられることを考慮して南流時間帯と北流時間帯に分けて比較することも必要と考えた。その結果は、図 3.2.5 及び図 3.2.6 に示すとおりであるが、北流時は相対航跡が集中しており、南流時は北流時と比較して広がる傾向にあるほか、大きな違いは確認でなかった。

なお、来島海峡西口におけるレーダ観測中の中水道の潮流は、図 3.2.9 に示すとおりであり、当日は月齢 28.9、中潮から大潮であった。

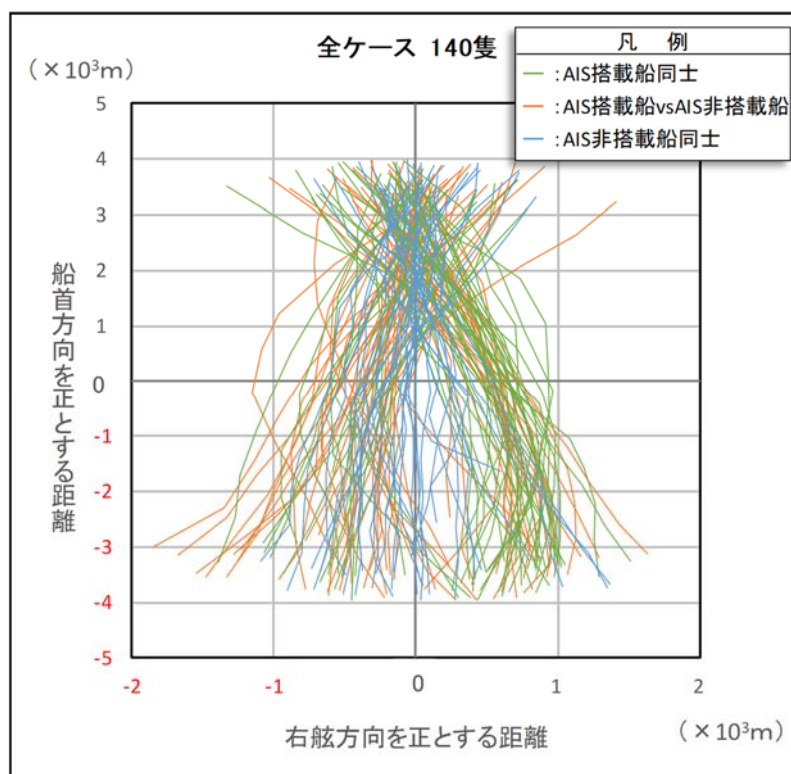


図 3.2.1 相対航跡 (全 140 パターン)

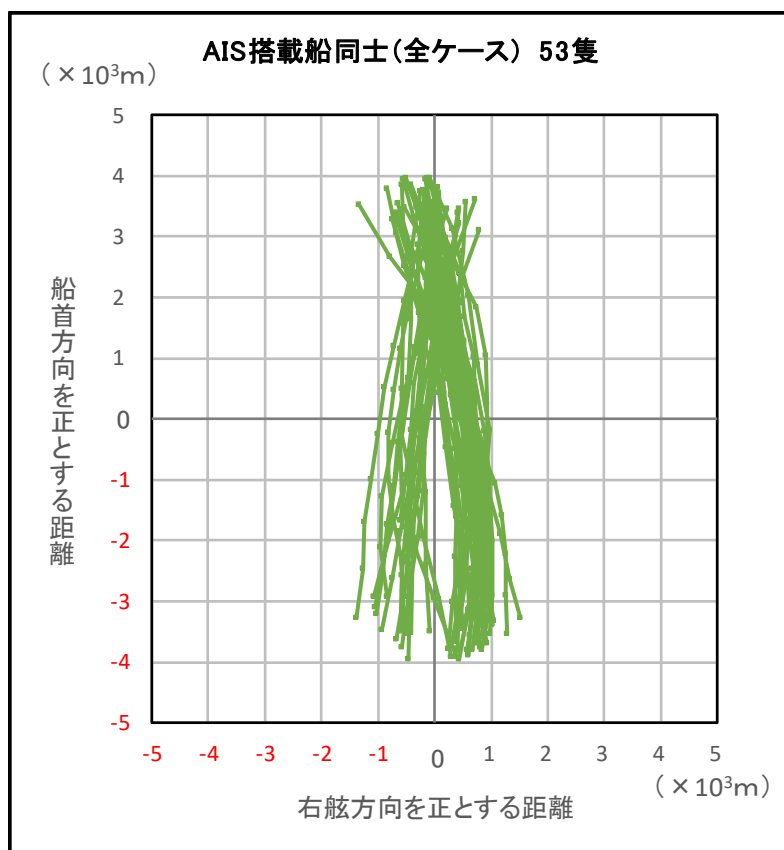


図 3.2.2 相対航跡 (AIS 搭載同士 53 パターン)

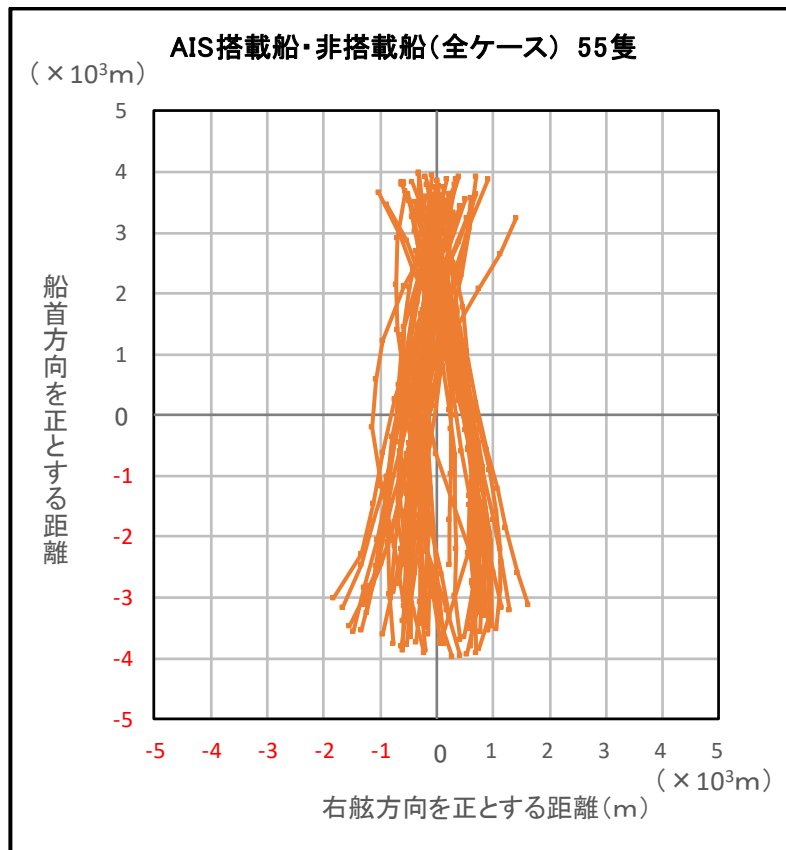


図 3.2.3 相対航跡 (AIS 搭載船・非搭載船 55 パターン)

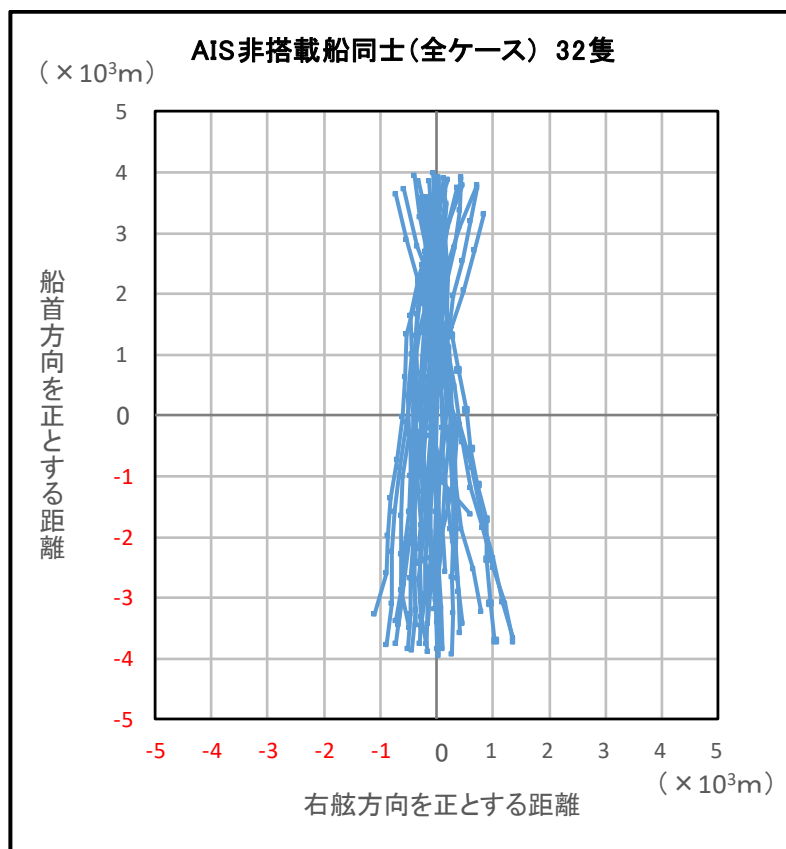


図 3.2.4 相対航跡図 (AIS 非搭載船同士 32 パターン)

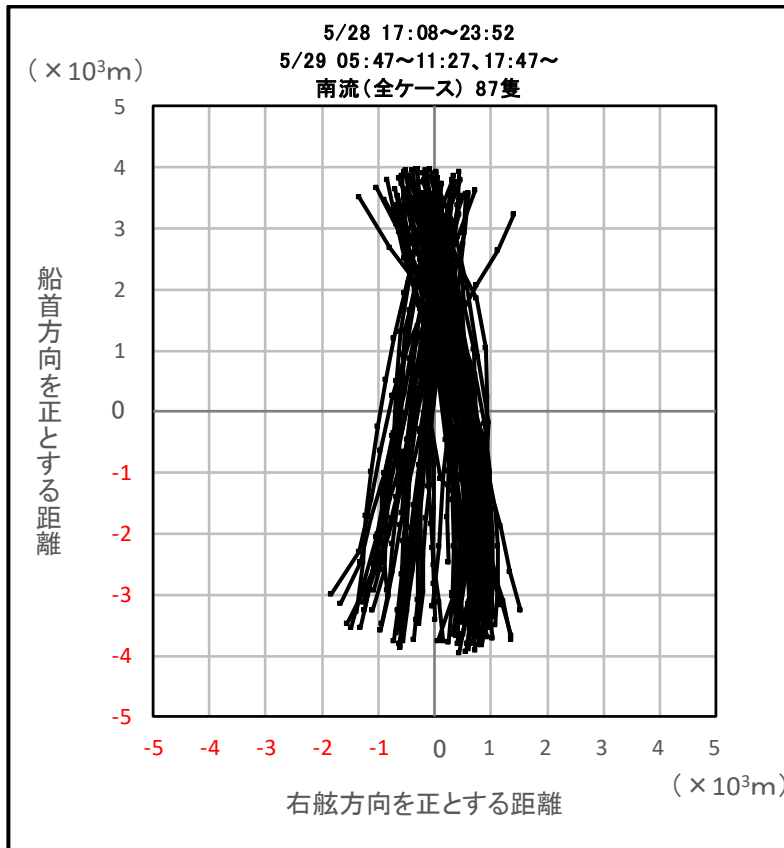


図 3.2.5 相对航跡 (来島海峡中水道南流時間帯)

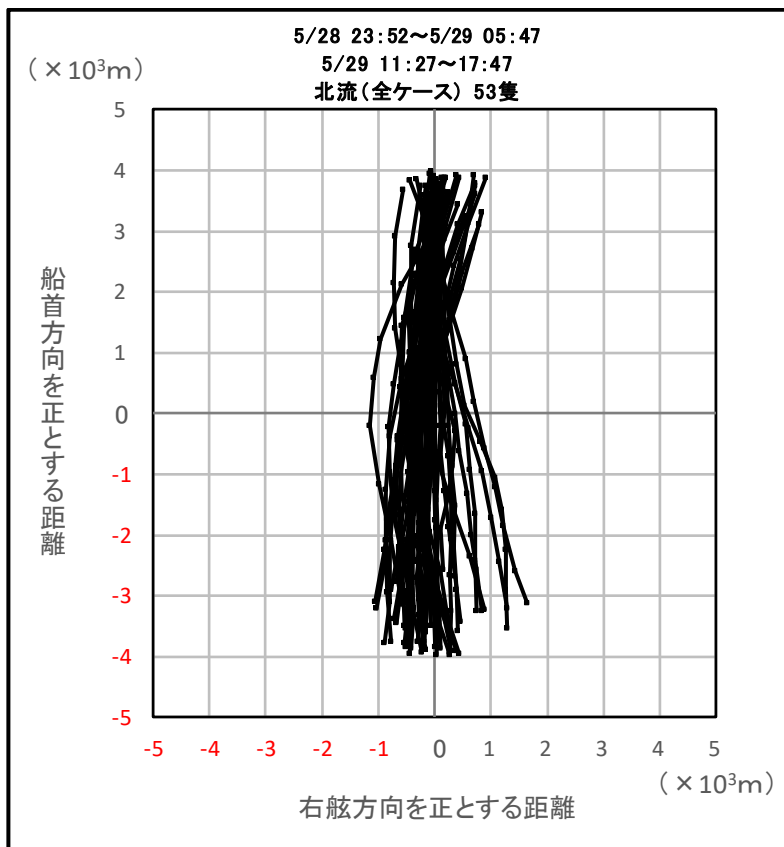


図 3.2.6 相对航跡 (来島海峡中水道北流時間帯)

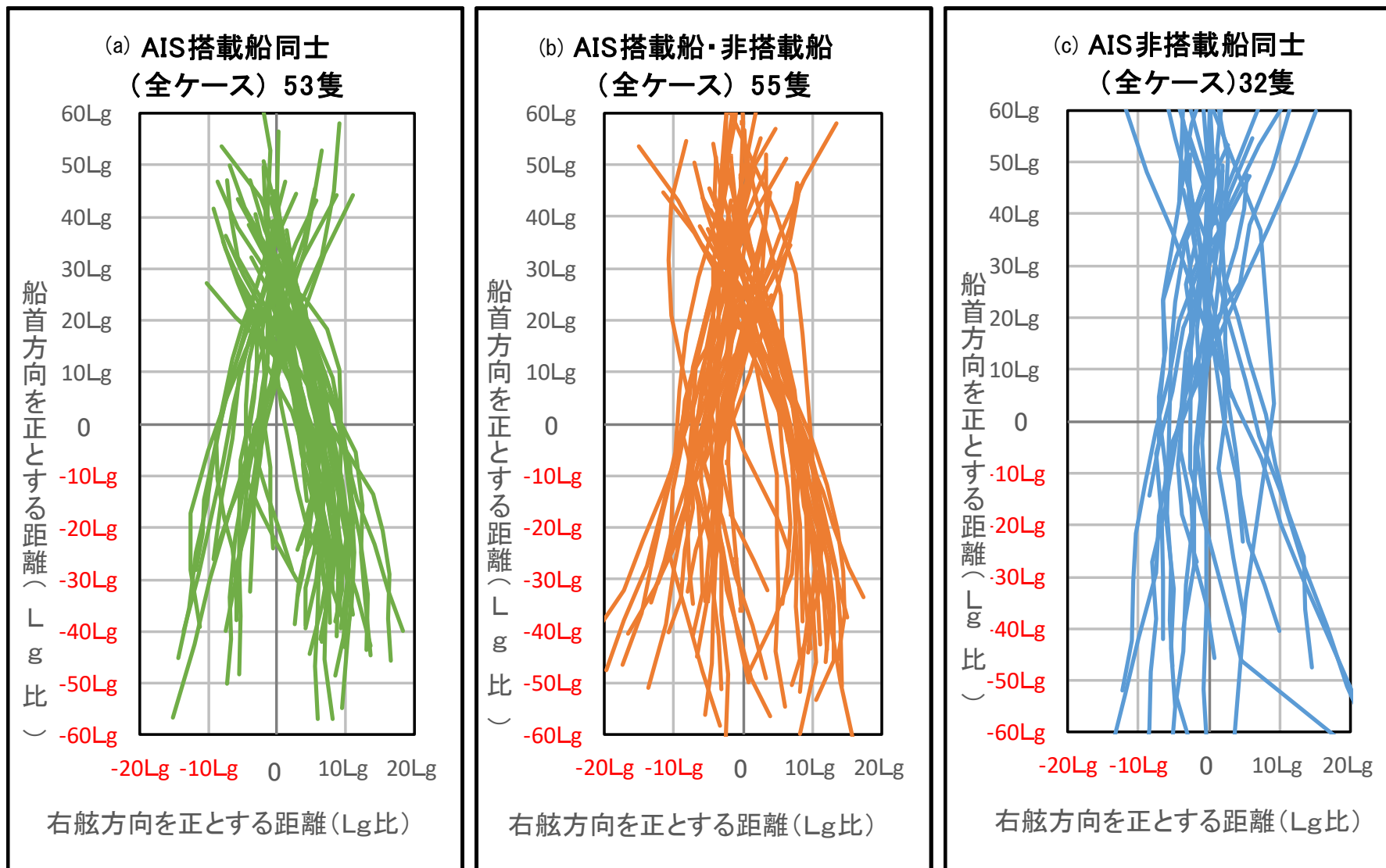


図 3.2.7 全長 (Lg) 比で表示した相対航跡

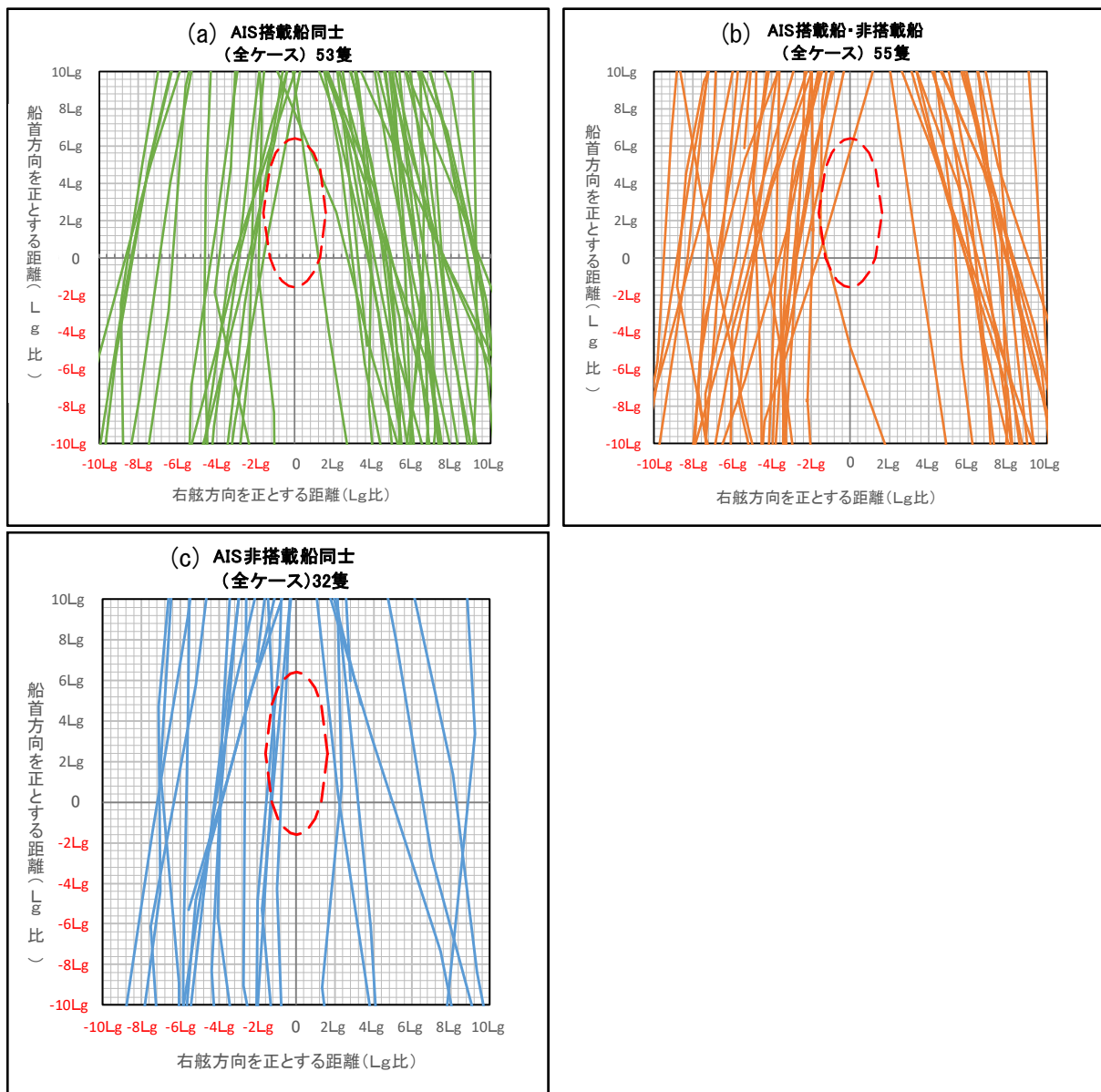


図 3.2.8 全長 (Lg) 比で表示した相対航跡の中心部拡大と閉塞領域バンパー

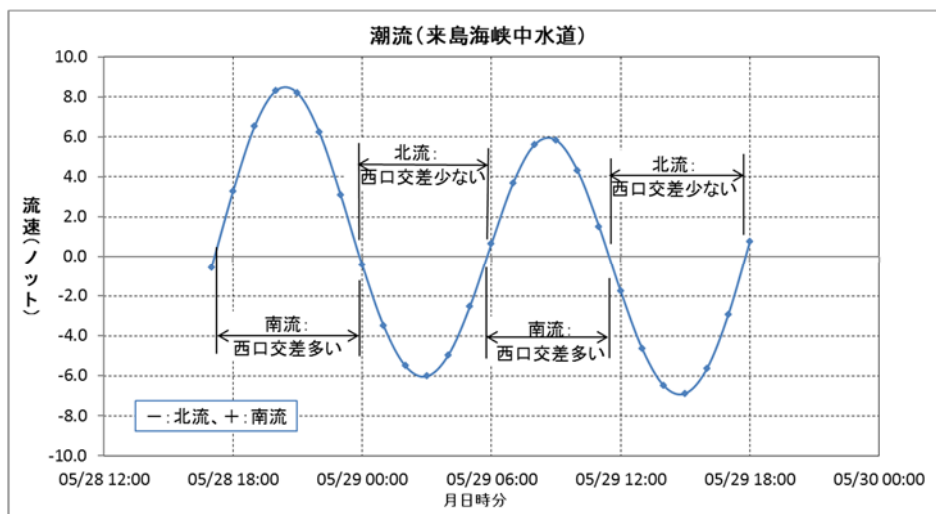


図 3.2.9 レーダ観測中の来島海峡中水道の潮流

3.3 進路交差角と航過距離の計算

前節 3.1 の表 3.1.1 に示した条件により抽出した 2 船の位置座標（概ね船体中央位置）から、それぞれ平均進路（deg）及び速力（m/s）を計算し、2 船の平均進路の差を「進路交差角」とした。

次に、交差点を後から通過する船を基準船として、基準船の平均進路における船首尾方向を y 軸（船首方向を正とする）、左右正横方向を x 軸（右舷方向を正とする）とする相対座標に他船の座標位置を変換し、相手船の相対航跡が x 軸を横切る箇所（ $y=0$ ）での x 座標を求め、「正横航過距離」とした。

また、相手船の相対航跡が y 軸を横切る箇所（ $x=0$ ）での y 座標を求め、「船首航過距離」とした。

基準船に対する他船の相対航跡のなす角を「相対進路交差角」とした。

以上の関係を図 3.3.1 に示す。

なお、正横航過距離及び船首航過距離は、(式 3.2.1)による「規格化に用いる船の長さ (L_g)」で割った値の絶対値により評価することとした。

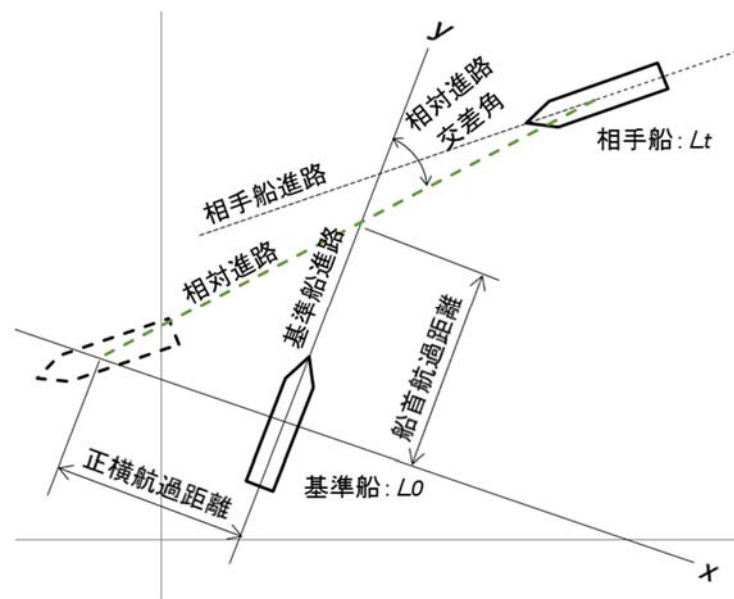


図 3.3.1 正横航過距離及び船首航過距離の概念

3.4 解析結果と既往研究結果との比較

ここでは、解析結果と既往研究結果との比較を行う。

比較対象とした既往研究は、井上らによる限界航過左右距離 [12]と十分航過左右距離 [12]モデル (井上モデル)、また、長澤らによる衝突危険度算定 [11]モデル (長澤モデル) の3つのモデルとした。井上モデルは港内操船環境を想定し、経験豊富な水先人や船長を対象としたアンケートにより操船者意識をモデル化したものであり、長澤モデルは井上モデルよりも広い海域を対象とした種々の調査結果の成果を踏まえたモデルである。

この3つのモデルにおける楕円の短半径を各ケースの状況に合わせて計算し、今回求めた正横航過距離の解析結果との比較を行った。

この比較結果は、図 3.4.1 に示すとおりであり、今回求めた正横航過距離 (×) は、概ね3つのモデル以上の航過距離を確保しているのが分かるが、何れのモデルとも特徴的な関係は見出せない。具体的に各航過距離の平均を求めると、今回求めた正横航過距離 (×) は 427m、井上モデル (限界) (◆) は 90m、井上モデル (十分) (■) は 147m、長澤モデル (▲) は 180m であった。

また、AIS の搭載有無で比較すると図 3.4.2～図 3.4.4 に示すとおりであり、AIS 搭載有無による大きな違いは確認できない。なお、AIS 搭載船同士は、交差角がマイナスとなるケース、すなわち、左舷対左舷での行き会いが多く発生していることが分かる。

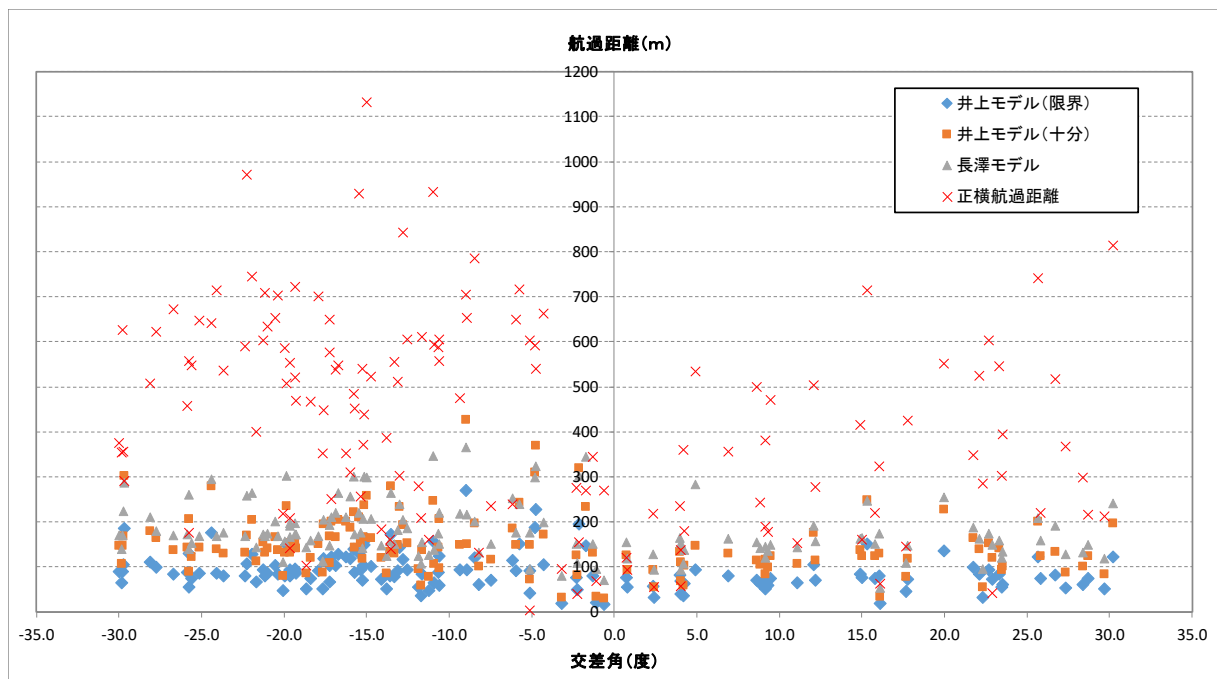


図 3.4.1 解析結果と既往研究結果との比較 (140 ケース)

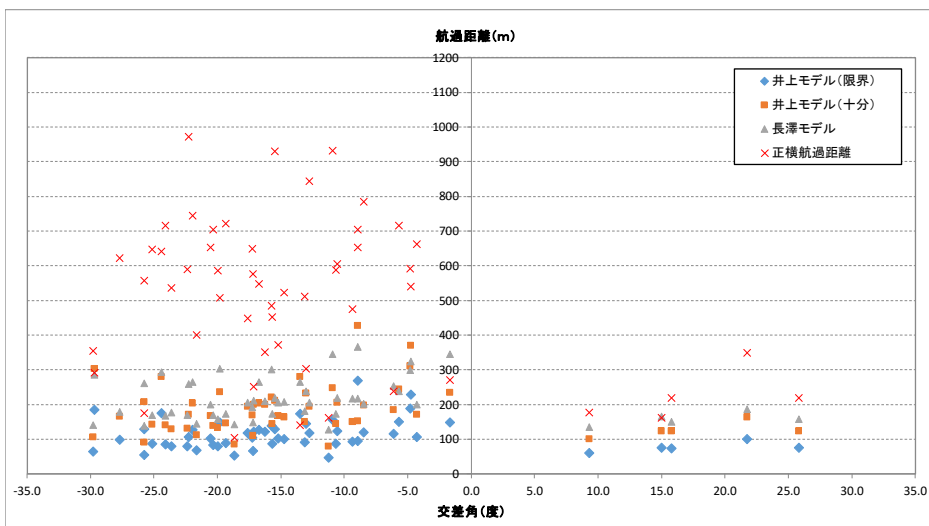


図 3.4.2 解析結果と既往研究結果との比較 (AIS 搭載船同士)

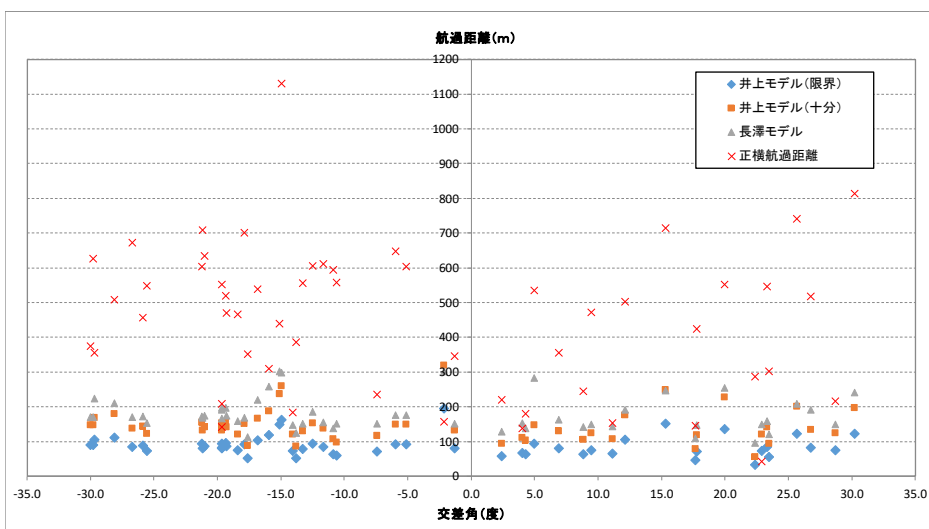


図 3.4.3 解析結果と既往研究結果との比較 (AIS 搭載船・AIS 非搭載船)

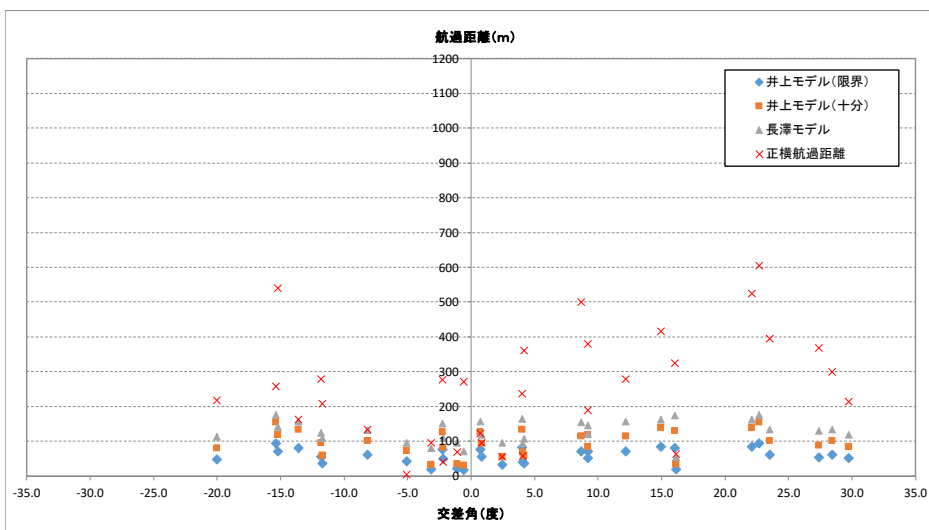


図 3.4.4 解析結果と既往研究結果との比較 (AIS 非搭載船同士)

3.5 バンパーモデルによる正横航過距離と船首航過距離

3.5.1 バンパーモデルと航過距離の関係式

進路交差する2船がお互いにバンパーを持ち、このバンパーが重ならないように操船者らが行動するというモデル [36] [37]を前提にバンパーモデルによる正横航過距離と船首航過距離を検討することとした。

進路交差する2船がお互いにバンパーを持ち、このバンパーが重ならないように操船者らが行動する時、バンパーの大きさなどを情報として与えれば、幾何学的な条件から船首航過距離を求めることができる。図 3.5.1 にこの関係を模式的に表現する。同図は基準船の平均進路における船首尾方向を y 軸（船首方向を正とする）、左右正横方向を x 軸（右舷方向を正とする）で表現している。また、ここではバンパーを船の全長を基準にした楕円で近似できるとし、更に、船の位置を楕円中心から楕円長半径の 0.2 倍後方に変位させることとした [10]。

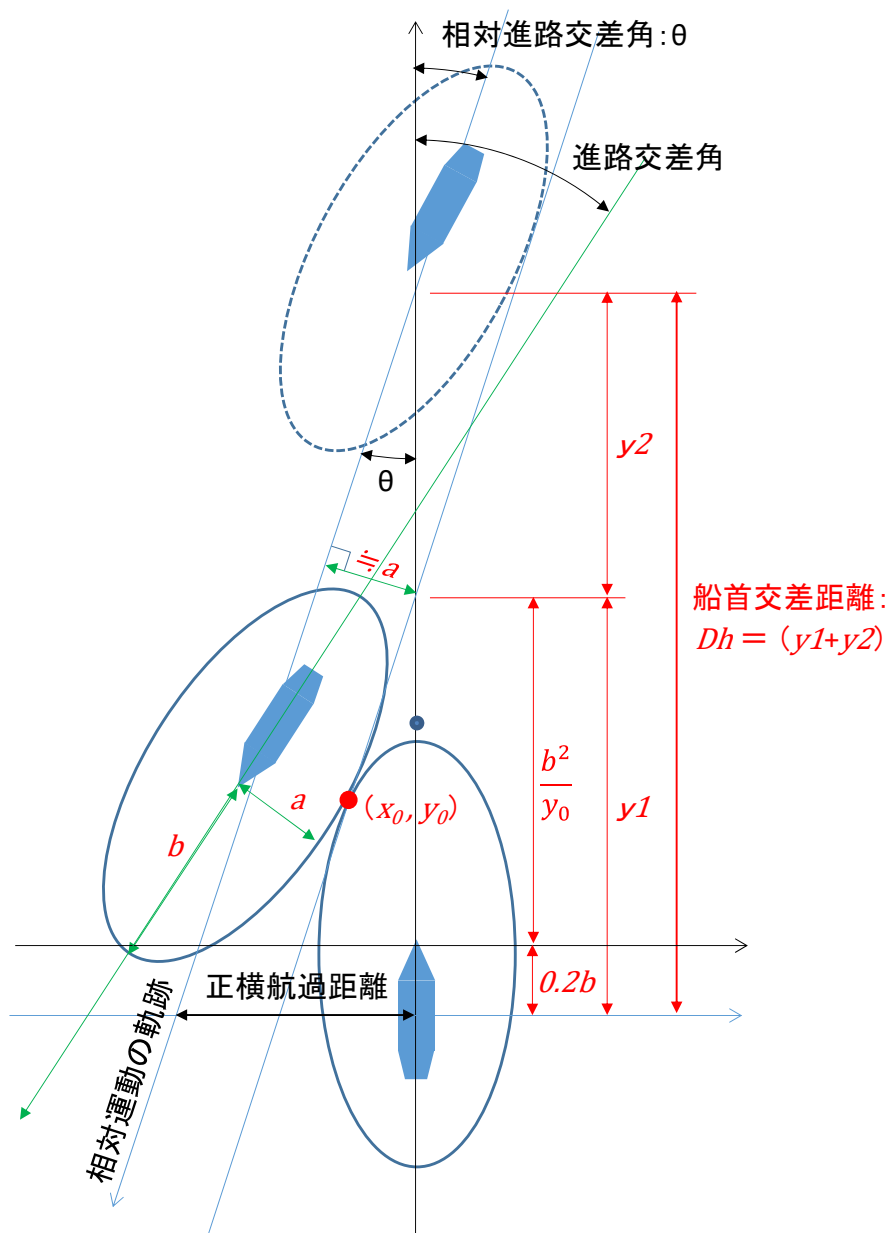


図 3.5.1 バンパーモデルと航過距離の関係

バンパーモデルで使用する楕円式を(式 3.5.1)に示す。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.1)}$$

基準船に対して相手船の運動は相対運動として表現されるので、基準船の楕円（バンパー）に接する接線の傾き（角度）を 90 度から引いた値と 3.3 節の相対進路交差角は同じである。楕円上の任意点 (x_0, y_0) に接する接線を表す式は、(式 3.5.2)で表される。

$$y = -\frac{b^2 x_0}{a^2 y_0} \cdot x + \frac{b^2}{y_0} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.2)}$$

また、図 3.5.1 に示す $y1$ は、接線(式 3.5.2)の切片に楕円中心から楕円半径の 0.2 倍後方へ変位させた変位を加えた距離として表される。すなわち、(式 3.5.3)のとおりである。

$$y1 = \frac{b^2}{y_0} + 0.2b \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.3)}$$

さらに、図 3.5.1 に示す $y2$ は、相対進路交差角 (θ) と相手船進路の差が小さい時は、楕円(式 3.5.2)に示す a の関係式として(式 3.5.4)の通り近似表現可能である。

$$y2 = \frac{a}{\sin \theta} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.4)}$$

したがって、船首航過距離： Dh の理論値は、(式 3.5.5)、正横航過距離： Ds は、(式 3.5.6)で表される。

$$Dh = \frac{b^2}{y_0} + 0.2b + \frac{a}{\sin \theta} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.5)}$$

$$Ds = Dh \times \tan \theta \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 3.5.6)}$$

本研究では、バンパーの大きさを $1L \times 4L$ 、 $3L \times 8L$ 及び $6L \times 12L$ とした場合の進路交差角と船首航過距離の関係を理論値として計算のうえグラフ化し、今回求めた船首航過距離の解析結果との比較を行った。その結果は、次項 3.5.2 に後述する。

なお、理論値を計算する際には、既往研究の結果 [35]を参考にするとともに、2 船の大きさ（全長を L ）及び速力を同じとした。

3.5.2 進路交差角と船首航過距離

前項で述べた進路交差角と船首航過距離について正横航過距離別・AIS 搭載有無別に解析した結果を図 3.5.2～図 3.5.4 及び表 3.5.1 に示す。

図 3.5.2 は、両船舶が著しく接近した正横航過距離 3L 未満の状況を示す。図 3.5.4 は、両船舶間の安全航過距離が確保された正横航過距離 6L 以上の状況を示す。図 3.5.3 は、図 3.5.2 と図 3.5.4 の中間状況と仮定 [37]し正横航過距離 3L 以上 6L 未満の状況を示す。このように正横航過距離を 3 分類して進路交差角と船首航過距離の関係を分析した。また、グラフ中の曲線は、バンパーの大きさを 1L×4L、3L×8L 及び 6L×12L とした場合の進路交差角と船首航過距離の関係の理論値を示している。理論値は、楕円の大きさによって傾向は異なるが、一般に、進路交差角が大きくなるに従って、船首航過距離は小さくなる。

各図とも、今回求めた船首航過距離の解析結果にばらつきはあるものの、理論値と同様の傾向を示している。このことから、2 船それぞれがバンパーを持つことを前提にした図 3.5.1 に示すモデルにより船首航過距離を表現可能である。

また、図 3.5.2 に示す正横航過距離 3L 未満の両船舶が著しく接近した状況には、船首航過距離はバンパーの大きさのより小さい楕円 ((1L×4L) 又は (3L×8L)) で計算される理論値近くに分布する傾向が見て取れる。一方、図 3.5.4 に示す正横航過距離 6L 以上の両船舶間の安全航過距離が確保された状況には、船首航過距離 20L 程度以上を確保しており、バンパーの大きさの大きい楕円 (6L×12L) で計算される理論値のようにグラフ右上に分布する傾向が見られる。

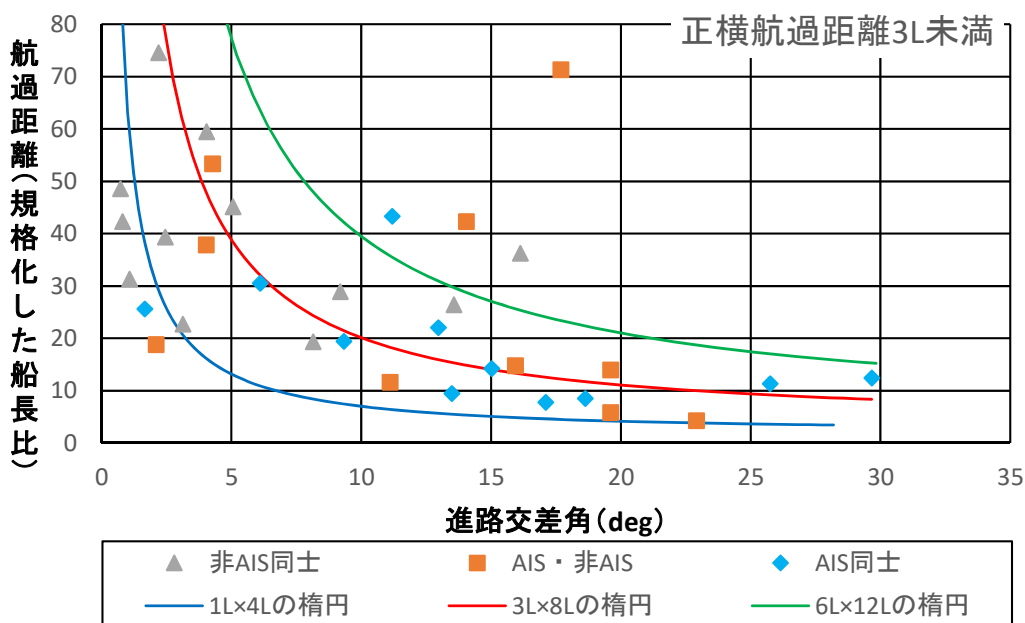


図 3.5.2 船首航過距離 (正横航過距離 3L 未満)

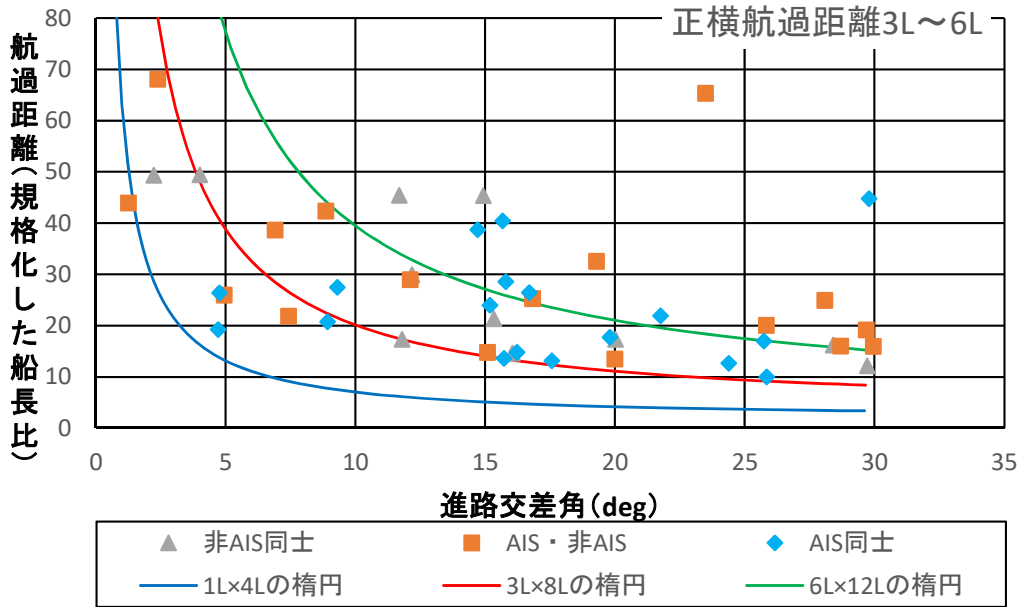


図 3.5.3 船首航過距離 (正横航過距離 3L~6L)

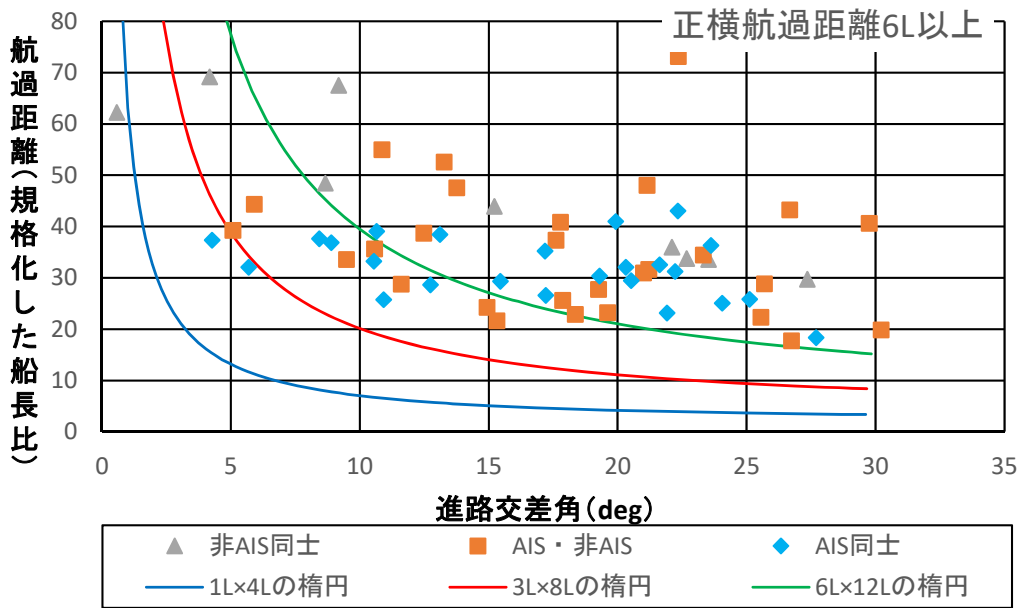


図 3.5.4 船首航過距離 (正横航過距離 6L 以上)

表 3.5.1 船首航過距離の統計値

正横航過距離	統計項目	船首航過距離(×L)、標本数			
		非AIS同士	AIS・非AIS	AIS同士	全ケース
3L未満	平均	39.5	27.4	18.6	28.8
	標準偏差	15.9	22.6	11.1	18.7
	最小	19.3	4.2	7.7	4.2
	最大	74.5	71.3	43.3	74.5
	標本数	12	10	11	33
3~6L	平均	28.9	30.4	23.1	27.2
	標準偏差	15.3	16.5	10.0	14.1
	最小	12.1	13.4	9.9	9.9
	最大	49.4	68.0	44.7	68.0
	標本数	11	17	18	46
6L以上	平均	47.1	35.3	32.0	35.7
	標準偏差	15.5	12.6	6.1	11.9
	最小	29.7	17.7	18.3	17.7
	最大	69.1	73.1	43.0	73.1
	標本数	9	28	24	61
全ケース	平均	38.0	32.3	26.2	31.3
	標準偏差	16.8	16.0	10.2	14.9
	最小	12.1	4.2	7.7	4.2
	最大	74.5	73.1	44.7	74.5
	標本数	32	55	53	140

次に、表 3.5.1 から AIS 搭載の有無で比較すると、AIS 搭載船同士（◆）及び AIS 搭載船と非 AIS 搭載船（■）の場合は、正横航過距離が大きくなるに従って船首航過距離の平均値が大きくなる傾向にある。非 AIS 搭載船同士（▲）は、正横航過距離 3L 未満の平均値が 39.5L と例外的に大きい数値を示している。

これは交差角が小さいケースが多いため、グラフ中の曲線で示した理論値のように大きい値となっているものと考えられる。この点を考慮すれば、非 AIS 搭載船同士（▲）も他の二つの場合と同様の傾向を示すものと推察できる。すなわち、2 船が離れて航過する程、船首を横切る距離は大きくなる、一般的な傾向と一致する結果となっている。

一方、表 3.5.1 から AIS 搭載船同士（◆）と非 AIS 搭載船同士（▲）で正横航過距離の区分毎の結果を比較すると、AIS 搭載船同士（◆）のほうが船首航過距離の平均値や標準偏差は小さい値を示す傾向がある。

このことは、AIS 情報により他船の動静を把握し易いことが要因として考えられ、船舶交通環境のモデル化等について検討する場合は、**情報環境 (AIS 利用環境) の異なる船舶が混在する要素を考慮する必要がある**ことを示唆している。

ここで、表 3.5.1 に示す船首航過距離の統計値をみると、正横航過距離 3L 未満の行及び船首航過距離の非 AIS 同士の列ともに標本数が 10 前後と少ないことが分かる。このため、表 3.5.1 に示す正横航過距離区分・AIS 搭載有無区分ごとに、正横航過距離と船首航過距離の一对の標本による平均の t 検定を行い、その有意性について検証した結果を表 3.5.2 に示す。

この t 検定結果から、正横航過距離及び AIS 搭載有無の全ケースにおいて、有意水準 (P<0.05) を満足する結果が得られており、本データに有意性があることが確認できた。

表 3.5.2 正横航過距離と船首航過距離の t 検定

		非AIS同士: ▲		AIS・非AIS: ■		AIS同士: ◆	
		正横航過	船首航過	正横航過	船首航過	正横航過	船首航過
正横航過距離	平均	1.7	39.5	2.2	27.4	2.3	18.6
	分散	0.7	254.0	0.6	511.1	0.3	122.9
	観測数	12	12	10	10	11	11
	ピアソン相関	-0.650		0.575		0.294	
	仮説平均との差異	0		0		0	
	自由度	11		9		10	
	t	-7.934		-3.595		-4.932	
	P(T<=t) 片側	0.000		0.003		0.000	
	t 境界値 片側	1.796		1.833		1.812	
	P(T<=t) 両側	0.000	<0.05	0.006	<0.05	0.001	<0.05
t 境界値 両側	2.201		2.262		2.228		
3L未満	平均	4.2	28.9	4.6	30.4	4.5	23.1
	分散	0.6	235.4	0.9	273.1	0.6	100.8
	観測数	11	11	17	17	18	18
	ピアソン相関	-0.013		0.095		0.658	
	仮説平均との差異	0		0		0	
	自由度	10		16		17	
	t	-5.341		-6.444		-8.312	
	P(T<=t) 片側	0.000		0.000		0.000	
	t 境界値 片側	1.812		1.746		1.740	
	P(T<=t) 両側	0.000	<0.05	0.000	<0.05	0.000	<0.05
t 境界値 両側	2.228		2.120		2.110		
6L以上	平均	7.3	47.1	7.6	35.3	7.7	32.0
	分散	0.6	241.6	1.0	157.7	1.3	37.2
	観測数	9	9	28	28	24	24
	ピアソン相関	0.376		0.219		-0.101	
	仮説平均との差異	0		0		0	
	自由度	8		27		23	
	t	-7.818		-11.828		-18.785	
	P(T<=t) 片側	0.000		0.000		0.000	
	t 境界値 片側	1.860		1.703		1.714	
	P(T<=t) 両側	0.000	<0.05	0.000	<0.05	0.000	<0.05
t 境界値 両側	2.306		2.052		2.069		
計	平均	4.1	38.0	5.7	32.3	5.5	26.2
	分散	5.8	282.6	5.5	255.3	5.7	104.0
	観測数	32	32	55	55	53	53
	ピアソン相関	0.127		0.279		0.575	
	仮説平均との差異	0		0		0	
	自由度	31		54		52	
	t	-11.482		-12.744		-16.664	
	P(T<=t) 片側	0.000		0.000		0.000	
	t 境界値 片側	1.696		1.674		1.675	
	P(T<=t) 両側	0.000	<0.05	0.000	<0.05	0.000	<0.05
t 境界値 両側	2.040		2.005		2.007		

3.6 まとめ

「第3章 解析手法及び解析結果」について、次のとおり取りまとめる。

前章で整理した研究対象の来島海峡における海上交通実態をもとに、「2船の相対速力との関係により4,000m以内（ほぼ、5分以内）」かつ、「概ね30度以内（小さい角度）で進路交差する」の2つの条件に基づき、行き会い関係にある航跡パターンを140ケース抽出した。

この140ケースの行き会いパターンをもとに、相手船との相対座標から船の大きさによる正規化処理のうえ算出した進路交差角と航過距離との関係性について、進路交差する2船が互いにバンパーを持ち、このバンパーが重ならないように操船者らが行動するという既往研究モデルを前提に解析した。なお、船の位置は、既往文献を参考に楕円中心から楕円長半径の0.2倍後方に変位させることとした。また、正横航過距離に関して既往研究にある限界航過左右距離と十分航過左右距離モデル、また、衝突危険度算定モデルにおける楕円の短半径を各ケースの状況に合わせて計算し、今回求めた航過距離と比較評価を行った結果、これら3つのモデルのうち限界航過左右距離に比較的近似していることが分かっている。

この解析結果を船首航過距離と正横航過距離で体系化するため、正横航過距離3L未満、3L～6L、6L以上の3つに分類し、140ケースの行き会いパターンの進路交差角と船首航過距離との関係を図化した。この結果に、2船の大きさ（全長をL）及び速力を同じとして、バンパーの大きさを1L×4L、3L×8L及び6L×12Lとした場合の理論値とを重ね合わせた結果、2船が離れて航過する程、船首を横切る距離は大きくなるという一般的な傾向と一致する結果となる一方で、AIS搭載船同士の行き会いケースのほうが船首航過距離の平均値や標準偏差は小さい値を示す傾向があることが分かった。

このことは、AIS情報により他船の動静を把握し易いことが要因として考えられ、船舶交通環境のモデル化等について検討する場合は、**情報環境 (AIS 利用環境) の異なる船舶が混在する要素を考慮する必要がある**等の一定の知見を得た。

なお、それぞれの値の有意性については、t検定により、正横航過距離及びAIS搭載有無の全ケースにおいて、有意水準（ $P < 0.05$ ）を満足する結果が得られており、本データに有意性があることが確認できている。

次章では、本章で取りまとめた解析結果をもとに、近年、越中島OZT研究会を中心として研究が進んでいる航行妨害ゾーン（OZT: Obstacle Zone by Target）における衝突予測線（LOPC: Line of Predicted Collision）を利用した評価手法の提案について考察する。

第4章 衝突予測線を利用した評価手法の提案

4.1 衝突予測線 (LOPC)

4.1.1 LOPC の概要

2 船 (A 船と B 船) を点として捉えると、衝突とは 2 船が同時に同じ位置に存在することである。A 船から衝突位置までの距離を D_A 、B 船から衝突位置までの距離を D_B 、それぞれの速力を V_A 及び V_B とする。ある距離離れた 2 地点から、衝突位置までに要する時間 (T) が 2 船とも同じになる (衝突する) ためには、(式 4.1.1) を満足しなければならない [38]。このとき、 N は、速力比を示す。

$$T = \frac{D_A}{V_A} = \frac{D_B}{V_B} \quad \therefore N = \frac{D_B}{D_A} = \frac{V_B}{V_A} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 4.1.1})$$

(式 4.1.1) 式を満足する衝突位置を連ねた点の軌跡は、図 4.1.1 に示すとおり、2 船が同速力であれば 2 船位置を結ぶ基線の 2 等分線となり、速力が異なる場合は低速力の船を囲む円となる。この線が「衝突予測線 (LOPC : Line of Predicted Collision)」(以下、「LOPC」という。) となる [38]。すなわち、2 船の位置と速力という 2 種類の情報が与えられると、当該海域には 2 船間の速力比 (N) に対応した LOPC が形成され、幾何学的にはこの LOPC 上でのみ衝突が起こることになる。この速力比 N や LOPC は、越中島 OZT 研究会で研究が進んでいる OZT の計算過程で算出される値である。

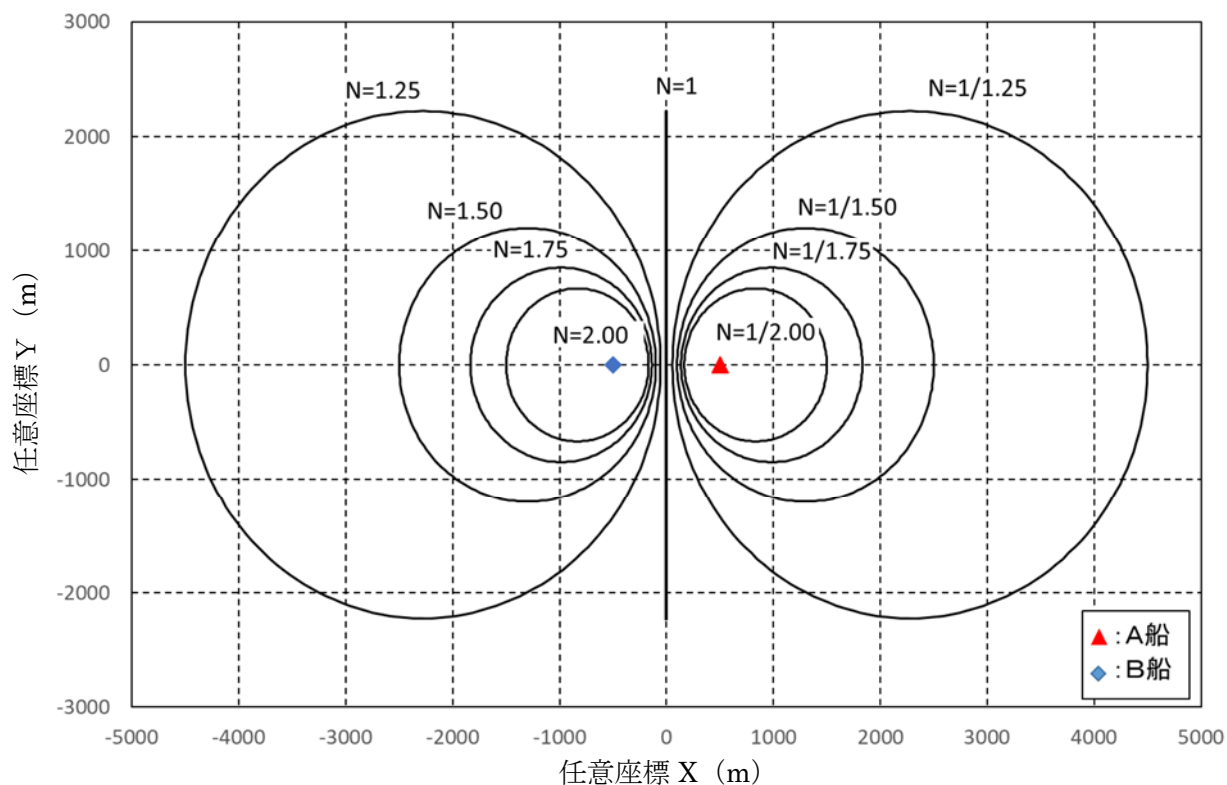


図 4.1.1 速力比 N 毎の LOPC

4.1.2 LOPC の計算手順

LOPC の計算手順を解説する。

座標面上に円の場合の LOPC を描くには、円の半径と中心座標位置が必要となる。

まず、図 4.1.2 に示すとおり、任意の X-Y 座標系において、A 船の位置を原点 (0,0)、B 船の位置を (1,000,0) とし、それぞれの船速を $V_a=10\text{kt}$ 、 $V_b=8\text{kt}$ とする場合を例として、座標面上への LOPC の計算手順 (描画方法) を示す。

A 船と B 船位置を結ぶ線分 \overline{AB} を基線として、両船の距離 (\overline{AB}) を D と置く。2 船の速力比を N ($\frac{V_b}{V_a} = N$) とする (この例では $N < 1$)。また、LOPC の半径を L とする。

同図から、A 船及び B 船から LOPC 上の点、E、P 及び F までの距離については、 $\overline{AE}:\overline{BE} = V_a:V_b$ 、 $\overline{AP}:\overline{BP} = V_a:V_b$ 、 $\overline{AF}:\overline{BF} = V_a:V_b$ が成り立つ。

すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\overline{BE}}{\overline{AE}} &= \frac{V_b}{V_a} = N \quad \therefore \overline{BE} = N \times \overline{AE} \\ \overline{AE} = D - \overline{BE} &= D - N \times \overline{AE} \quad \therefore D = \overline{AE} + N \times \overline{AE} = (1 + N) \times \overline{AE} \\ \therefore \overline{AE} &= \frac{D}{1 + N} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 4.1.2)} \end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned} \overline{BE} &= N \times \frac{D}{1 + N} \\ \text{ここで同図から、} \overline{AF} - \overline{BE} &= D \quad \therefore \overline{AF} = \overline{BF} + D \quad \text{である。} \\ \overline{BF} = N \times \overline{AF} \quad \overline{AF} &= N \times \overline{AF} + D \quad \overline{AF} - N \times \overline{AF} = D \\ \therefore \overline{AF} &= \frac{D}{1 - N} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 4.1.3)} \end{aligned}$$

LOPC の直径は $2 \times L$ 、また、(式 4.1.2)及び(式 4.1.3)より、

$$\begin{aligned} 2 \times L &= \overline{AF} - \overline{AE} = \frac{D}{1 - N} - \frac{D}{1 + N} = \frac{2 \times N \times D}{1 - N^2} \\ \therefore L &= \frac{N \times D}{1 - N^2} \quad \dots \dots \dots \quad \text{(式 4.1.4)} \end{aligned}$$

(式 4.1.4)から LOPC の半径を求めることができる。

次に、LOPC の中心座標位置を（同図の通り）C とすると、C の座標は $(\overline{AC}, 0)$ である。
すなわち、

$$\overline{AC} = \overline{AE} + L = \frac{D}{1+N} + \frac{N \times D}{1-N^2} = \frac{D}{1-N^2} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 4.1.5})$$

同図の通り、LOPC の中心座標は常に基線 (\overline{AB}) の延長線上に存在すること、また、LOPC は低速船を囲む円になる（2 船の速度が同速で無い場合）。

以上から、A 船及び B 船が任意の座標を取る場合、高速船である A 船から低速船である B 船に向かう延長線上の C 点までの距離 \overline{AC} を(式 4.1.4)により計算すれば、LOPC の中心である C 点座標を求めることができる。

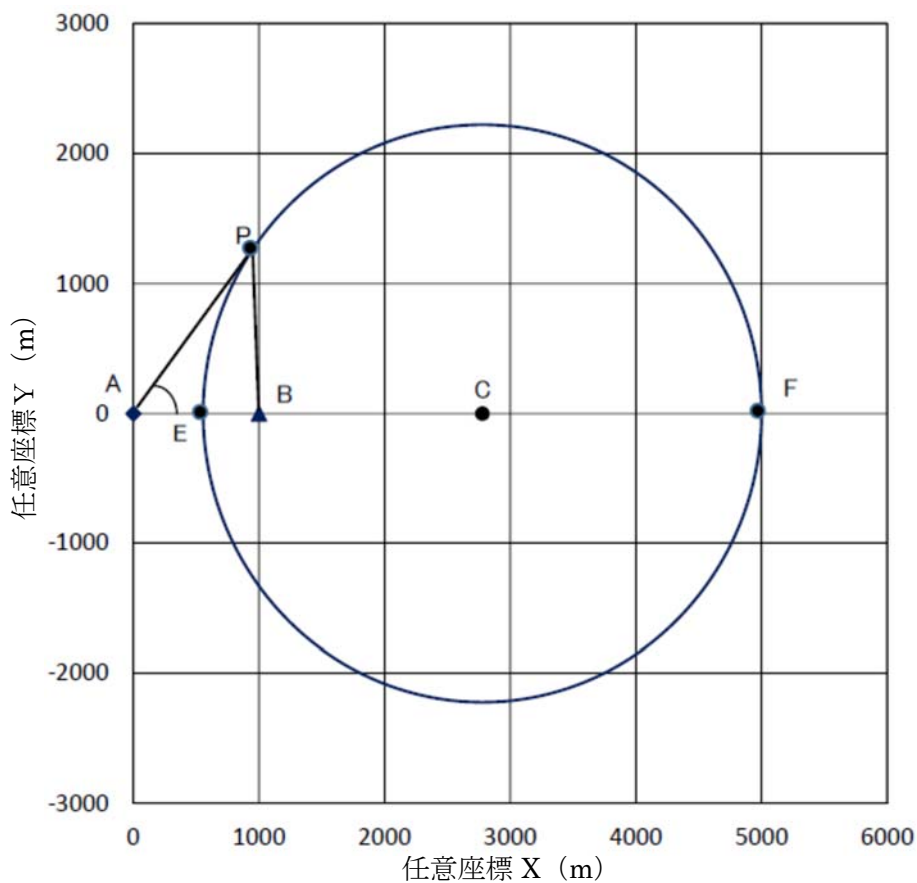


図 4.1.2 LOPC の概要

4.2 衝突予測位置 (PPC)

2 船それぞれの進路が与えられると、船の位置から進路方向に延長した直線と LOPC が交わる位置が得られる。ここでは、この位置を衝突予測位置 (PPC: Predicted Position of Collision) と呼ぶこととする。この 2 船に速力差がある場合、速力の速い船の PPC は、LOPC と進路の位置関係によって、2 箇所、1 箇所及び存在しない場合の 3 パターンの何れかになる。一方、速力の遅い船では、LOPC が船を取り囲む円となるので、必ず 1 個の PPC が存在する。

PPC の計算手順については、幾何学的な関係から計算する方法と円と直線の方程式から交点座標を計算する方法の 2 つがある。ここでは、前者の幾何学的な関係から計算する方法について以下に計算手順を示す。

図 4.2.1 において、A 船 (A 点) と B 船 (B 点) の位置を仮に同図の通りに配置する。この図では A 船の速力を 10kt、B 船の速力を 8kt とした時の LOPC を赤色の線で描いている。A 船の進路を θ_a (180°)、A 船の位置座標を (x_a, y_a) 、B 船の進路を θ_b (0°)、B 船の位置座標を (x_b, y_b) とする。なお、進路は方位角とし、Y 軸方向を North とし時計回りの角度とする。また、同図中の C は LOPC の中心、LOPC 上の点 P は A 船の PPC、点 Q は B 船の PPC である。それぞれの位置座標を、C (x_c, y_c) 、P (x_p, y_p) 、Q (x_q, y_q) とする。

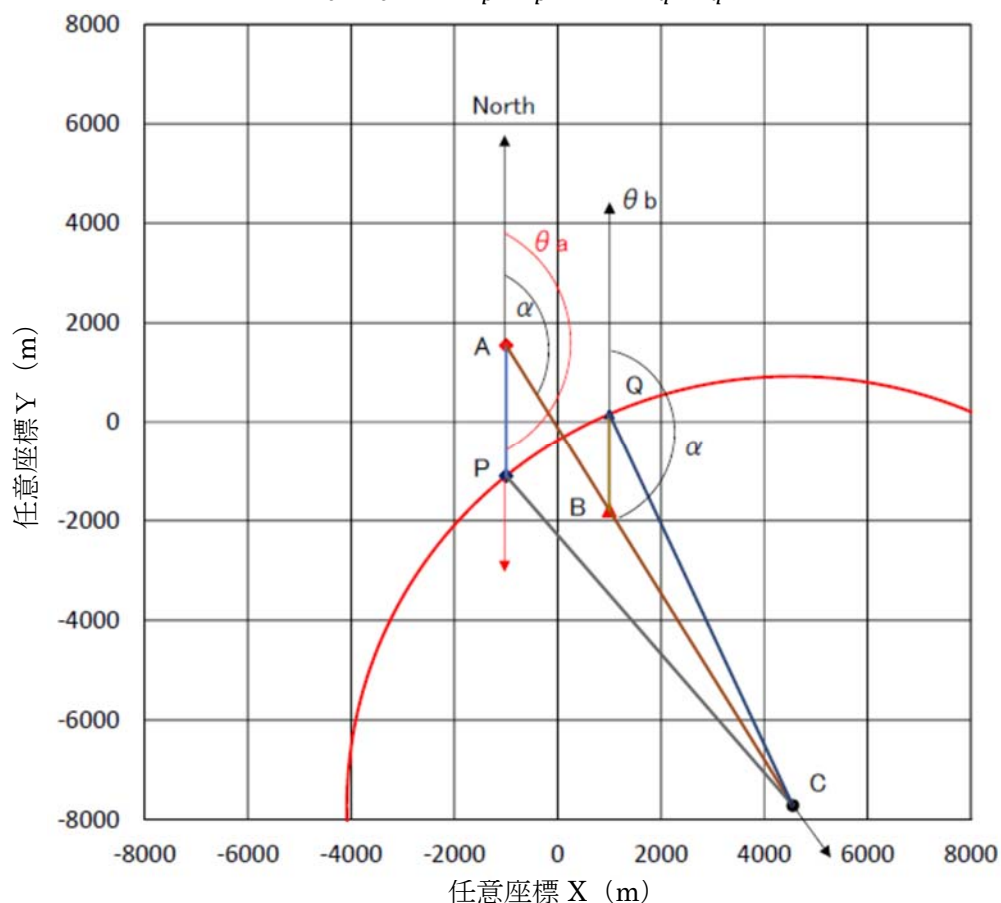


図 4.2.1 PPC の概要

ここで、基線 \overline{AB} の距離を D 、2 船の速力比を N とすると

$$D = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad \overline{AC} = \frac{D}{1 - N^2}$$

また、A 船から B 船への方位角 α は次式で求めることができる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \right)$$

\overline{AC} 及び α により、LOPC の中心座標 (x_c, y_c) は、A 船位置座標を基準に次式で表現できる。

$$x_c = x_a + \overline{AC} \times \sin(\alpha) \quad y_c = y_a + \overline{AC} \times \cos(\alpha) \quad \dots \quad \text{(式 4.2.1)}$$

次に、同図中の $\triangle ACP$ において、

$\angle CAP = \theta_a - \alpha$ 、 $\angle APC = \gamma_a$ 、 $\angle ACP = \beta_a$ とすると、

$$\frac{\overline{AP}}{\sin(\beta_a)} = \frac{\overline{CP}}{\sin(\theta_a - \alpha)} = \frac{\overline{AC}}{\sin(\gamma_a)} \quad \therefore \gamma_a = \sin^{-1} \left(\frac{\overline{AC}}{\overline{CP}} \times \sin(\theta_a - \alpha) \right)$$

また、

$$\beta_a = 180 - (\theta_a - \alpha) - \gamma_a$$

以上から、

$$\overline{AP} = \frac{\overline{CP} \times \sin(\beta_a)}{\sin(\theta_a - \alpha)} \quad \dots \quad \text{(式 4.2.2)}$$

なお、 \overline{CP} は LOPC の半径であるので、A 船の PPC 座標 $P(x_p, y_p)$ は、次式で求めることができる。

$$x_p = x_a + \overline{AP} \times \sin(\theta_a) \quad y_p = y_a + \overline{AP} \times \cos(\theta_a) \quad \dots \quad \text{(式 4.2.3)}$$

同様に、同図中 $\triangle QCB$ において

$\angle CBQ = \alpha - \theta_b$ 、 $\angle BQC = \gamma_b$ 、 $\angle BCQ = \beta_b$ とすると、

$$\frac{\overline{BQ}}{\sin(\beta_b)} = \frac{\overline{CQ}}{\sin(\alpha - \theta_b)} = \frac{\overline{BC}}{\sin(\gamma_b)} \quad \therefore \gamma_b = \sin^{-1} \left(\frac{\overline{BC}}{\overline{CQ}} \times \sin(\alpha - \theta_b) \right)$$

また、

$$\beta_b = 180 - (\alpha - \theta_b) - \gamma_b$$

以上から、

$$\overline{BQ} = \frac{\overline{CQ} \times \sin(\beta_b)}{\sin(\alpha - \theta_b)} \quad \dots \quad \text{(式 4.2.4)}$$

B 船の PPC 座標 $Q(x_q, y_q)$ は、次式で求めることができる。

$$x_q = x_b + \overline{BQ} \times \sin(\theta_b) \quad y_q = y_b + \overline{BQ} \times \cos(\theta_b) \quad \dots \quad \text{(式 4.2.5)}$$

4.3 評価方法

4.3.1 評価方法の概要

図 4.3.1 のように A 船（高速船）と B 船（低速船）を配置したケースを例示する。

このケースの場合、低速船である B 船を囲むように LOPC が形成され、各船の進路の延長線の交点として PPC (A1 及び B1) が求まる。LOPC と PPC は現時点で衝突の可能性がある線及び位置を明示しているため、ここに評価のポイントを置くことは合理的な方法である。船舶の大きさを考えず船舶の位置を点で捉えた場合には、幾何学的には、両船の PPC が重なっている場合は衝突し、重なっていない場合は衝突しないことになる。

しかしながら、実際には船舶の大きさによる操船者の死角範囲や速力による緊急停止距離等の違いがあるため、衝突の危険性を評価するためには、重なり「ある・なし」だけでなく、両船の物理的な大きさや位置、進路、速力等の条件を踏まえた評価を行う必要がある。また、衝突とは同じ時刻に同じ位置に両船が存在することなので、時間と空間の 2 つの観点での評価を前提とした「同時刻性の確保」と「空間での評価」を同時に行う必要がある。

例えば図 4.3.1 において A 船が A1 (A 船の PPC) に達するまでに要する時間に B 船の速力 (V_B) を乗じて求めた距離 (D_{B2} : B 船位置から A1 までの距離に等しい) を B 船の現在位置から進路方向に延長した地点が、A 船が A1 に居る時点での B 船位置 (B2) となる。

同様に、B 船が B1 (B 船の PPC) に達するまでに要する時間に A 船速力 (V_A) を乗じて求めた距離 (D_{A2} : A 船位置から B1 までの距離に等しい) から、B 船が B1 に居る時点での A 船位置 (A2) を求めることができる。

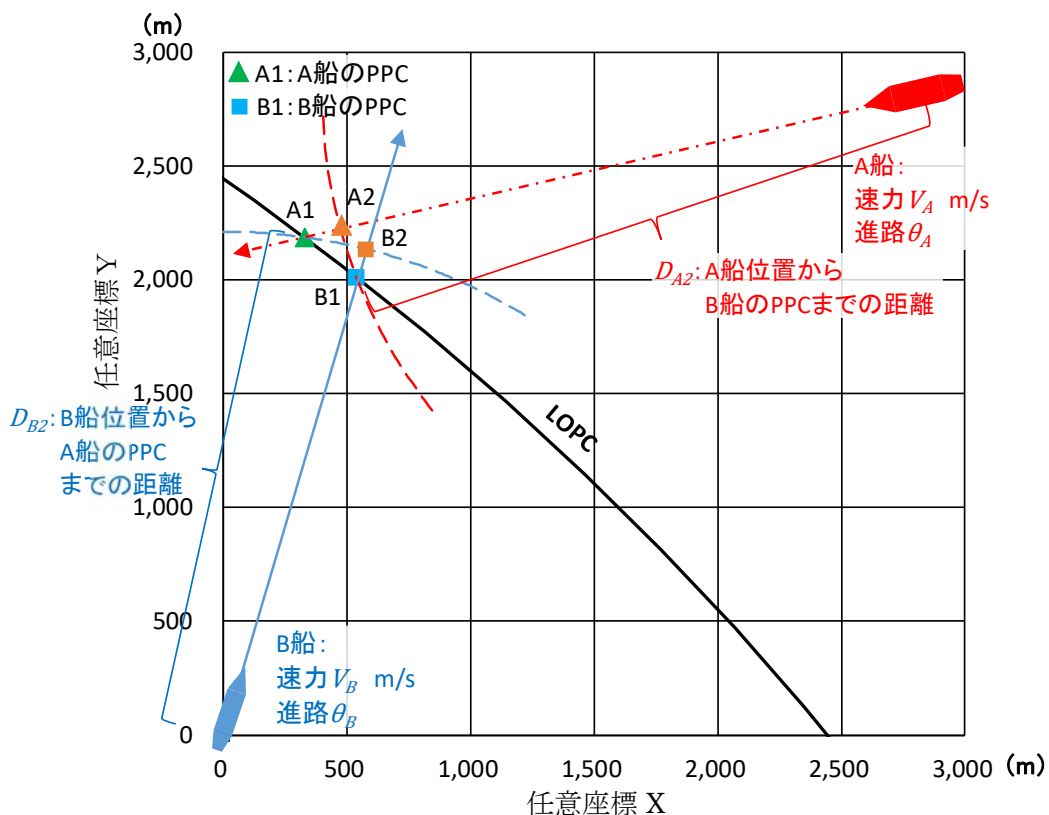


図 4.3.1 評価方法の説明例 1

このように得られた A 船 B 船の各点をもとに、A 船 B 船間の最接近距離を求め、各船のバンパーとの関係进行评估することで、進路交差時の最接近時点だけでなくそれ以前の時刻歴での危険度を判定することができる。

評価方法の概要を表 4.3.1 に示す。

本研究では、水域管理者や船舶運航者、航路管制が評価主体となり、有識者等で構成された委員会等の第三者機関が評価することを想定し、船舶交通環境の危険度を適切に評価できる評価手法の確立に向けた基礎的な研究として、表 4.3.1 に示すとおり最小限の項目と評価基準をもとにした評価方法を検討することとした。

表 4.3.1 評価方法の概要

項目	内容	備考
評価主体	水域管理者・船舶運航者・航路管制者など	
評価者	有識者等で構成された委員会等の第三者機関など	
評価対象	行会い状態にある船舶を対象として、操船海域（船舶交通環境）を評価	行会い状態にある船舶とは、5分以内に30度以内で進路交差する船舶
評価項目	航行船舶同士の見合い関係と行会い時の離隔距離に着目し、この離隔距離をベースとした衝突の危険度	
評価方法	両船 PPC 位置と他船位置間の最接近距離のうち短い距離で与えられる DREP と自船バンパーとの大小関係の比較	DREP の詳細は、4.3.3 項に後述する
評価基準	DREP が自船バンパー楕円半径より大きい場合：危険でない DREP が自船バンパー楕円半径より小さい場合：危険	

4.3.2 評価手順

前項 4.3.1 で概要説明したとおり、衝突の危険度を評価するためには、時間と空間の 2 つの観点での評価を前提とした「同時刻性の確保」と「空間での評価」を同時に行う必要があるため、評価の手順を次の通りとした。なお、評価手順は、図 4.3.2 に両船の最接近距離が 200m となるように、A 船の進路を 250.7° 速力を 7m/s、B 船進路を 015.0° 速力を 5m/s とし、A 船を B 船から方位 045.0° 、4,000m の位置に配置したケースで説明する。また、評価手順のフローを図 4.3.3 に示す。

- ① B 船が B1 に至る時の A 船位置を A2、A 船が A1 に至る時の B 船位置を B2 とする。例えば A2 は、A 船位置から B1 までの距離を半径とする円を、A 船位置から描く時、A 船進路の延長線との交点として求めることができる。【同時刻性の確保】
- ② B1 と A2 間の距離及び A1 と B2 間の距離を求め、それぞれの距離の小さな方の値を評価用の値とする。
- ③ 船の長さ等を基にしたバンパーと②との関係を基に危険度の判定を行う。【空間での評価】

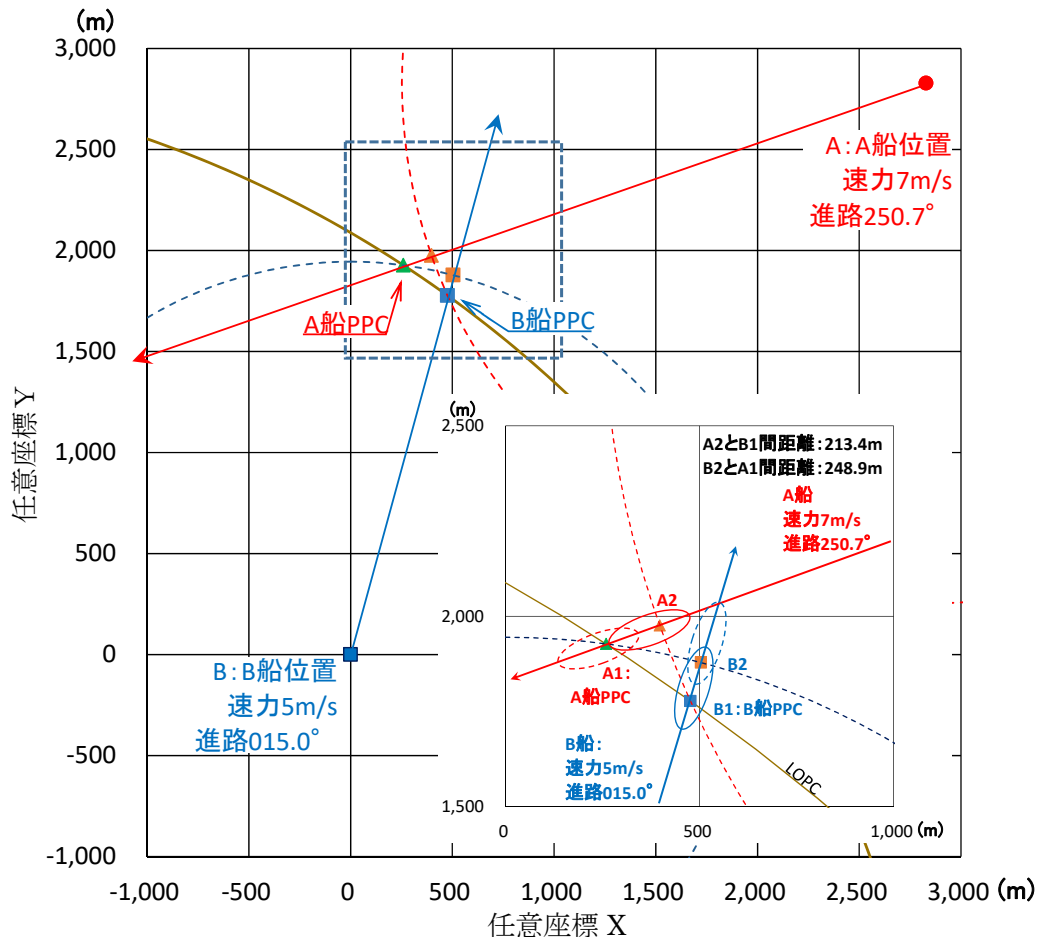


図 4.3.2 評価方法の説明例 2

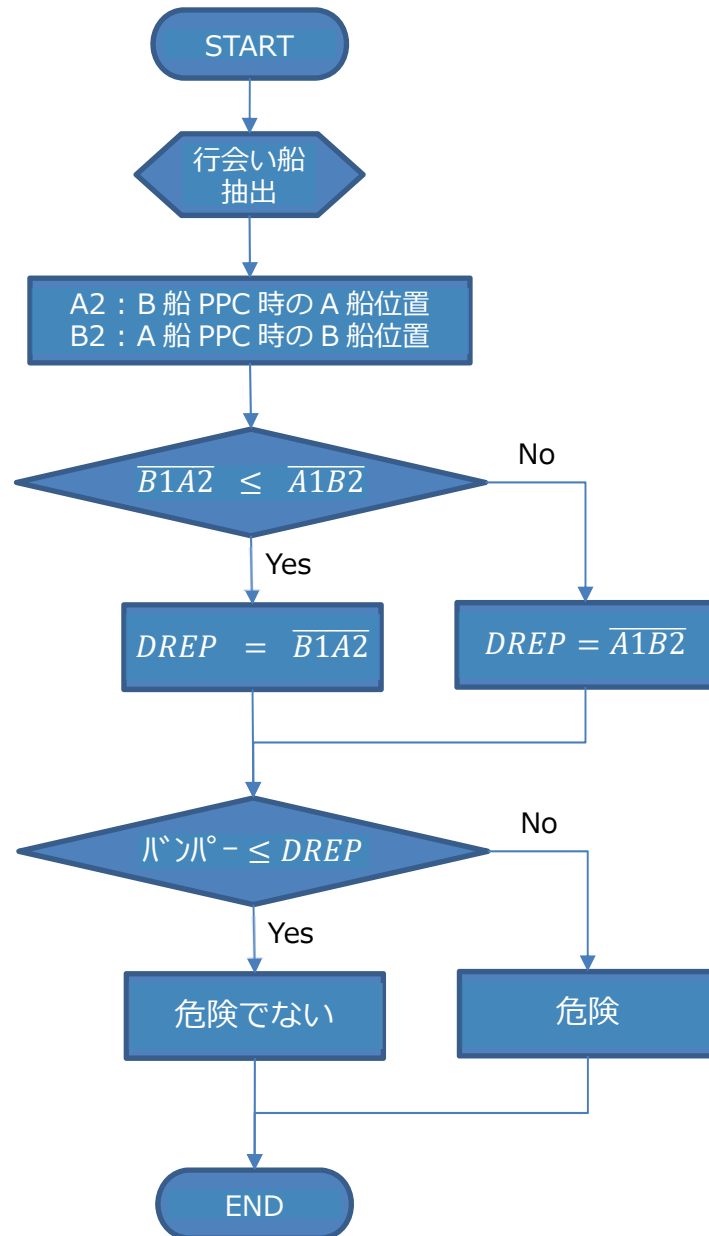


図 4.3.3 評価手順フロー

4.3.3 評価指標

前項の手順②による距離は、B1とA2間の距離が213.4m、A1とB2間の距離が248.9mであり、このケースの場合は213.4mを評価用の距離とする。

この数値をPPCを基準とした危険度評価指標 (Degree of Risk Evaluation index on the basis of PPC、以下「DREP」と略称する。) とする。

また、本評価方法は、どちらかの船を基準とする相対運動による評価ではなく、2船の真運動に基づいた評価方法である。このことから、実空間の位置座標上に2船のバンパーを表示した空間評価が可能となる。なお、具体的な評価例は5.1に後述する。

手順③で述べたバンパーによる危険度判定について、各位置における両船のバンパーを楕円としたイメージを図4.3.3に示す。

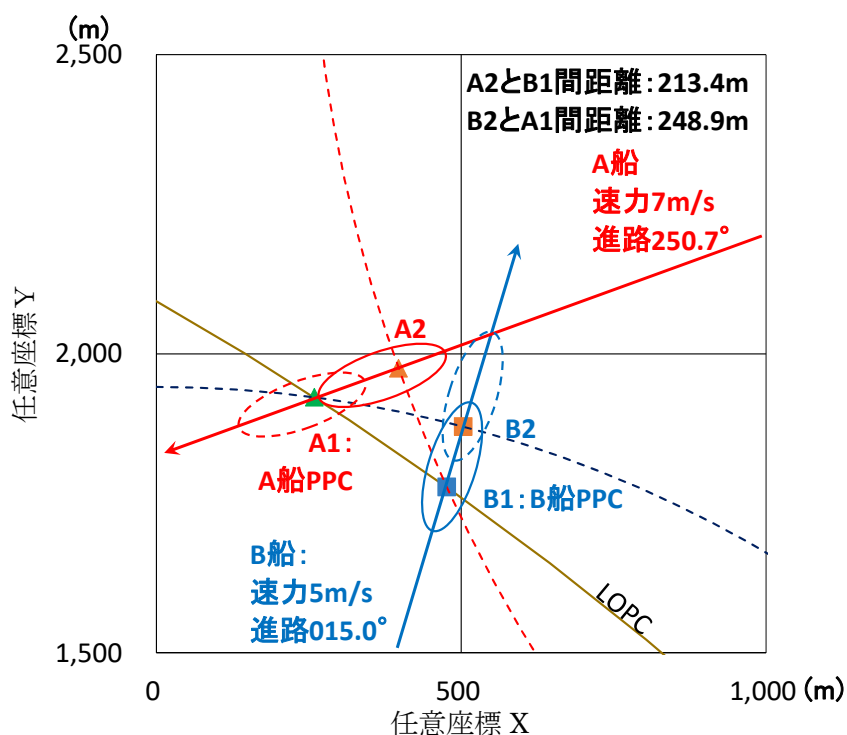


図 4.3.4 評価方法の説明例 3

4.4 任意シナリオによる評価例

4.3.2 評価手順の②までに示した A 船と B 船の PPC と同時刻の相手船までの距離の短い方の値を評価値とすることの有効性について、最接近距離と比較することで次のとおり検証した。

ここでは、B 船（進路 015.0° ）を原点位置として、B 船から方位角 $000.0^\circ \sim 180.0^\circ$ の範囲で 15.0° 間隔毎に $4,000\text{m}$ 離れた地点へ A 船（速力 7m/s ）を配置し、B 船の速力を任意に変更すると共に、B 船の条件に対して、最接近距離が 100m 、 200m 、 300m 及び 400m となるような A 船進路を求めるシナリオを設定した。ここでの最接近距離は安全航過距離（Safety Distance : SD）と同様であることから、以下、この距離を「SD」と呼ぶ。

図 4.4.1 は、上記のシナリオのうち B 船の速力を 6m/s として、方位 045.0° 方向の A 船位置から SD を確保するために必要な進路 θ_{A1} 及び θ_{A2} を作図で求める方法を示している。

まず、B 船位置を中心として半径 SD の円を描き、A 船位置から同円に接する直線を描く。この時、当該 2 本の直線の方法が SD を確保する相対進路となる。次に、B 船位置を中心とした A 船の速力円を描き、B 船の速力ベクトルに当該 2 本の直線（相対進路）を平行移動させた線が A 船の速力円と交わる点に対して、B 船位置から直線を描く時、この 2 本の直線の方法が、SD を確保する A 船の進路となる。このように作図すれば、B 船から方位角 $000.0^\circ \sim 180.0^\circ$ の範囲で 15.0° 間隔毎に $4,000\text{m}$ 離れた地点へ配置した各 A 船位置からは B 船の船首と船尾（または、左右舷）に向かう 2 つの進路が得られる。

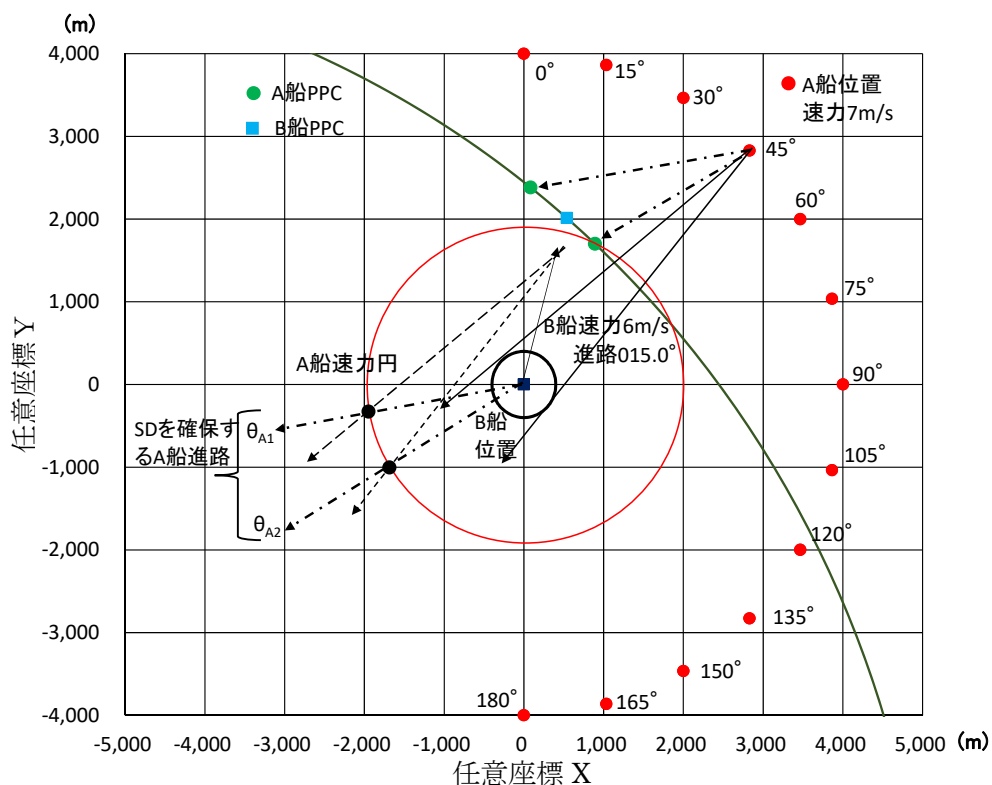


図 4.4.1 任意シナリオの設定条件等

各ケースにおける A 船と B 船の進路差に対する DREP と SD の比について比較を行った。当該結果の内、B 船速力を 5m/s としたケースを図 4.4.2 に示す。同図では、進路差によって差はあるものの、最大でも 1.5 倍程度となっている。

今回のシナリオの場合、B 船と A 船の位置を結ぶ線（基線）と B 船の進路が 90.0° となるのは A 船が 105.0° の方向に配置される時であり、この時、B 船進路は A 船位置から LOPC への接線と交わる点（接点）に向かう進路となる。また、SD が小さい程、A 船進路は、接点近くに向かう進路となる。基線長 4,000m とした時の速度比ごとの接点に向かう B 船と A 船の進路差の関係については幾何学的な条件から計算可能である [39]。具体的には、今津によれば、図 4.4.3 に示すとおり、A 船進路が LOPC に接する場合の A 船と B 船の進路差は幾何学的に速度比によって計算可能としており図 4.4.4 に示すとおりである [39]。

図 4.4.2 のケースでは速度比が 0.714 ((式 4.1.1)による) であるので、図 4.4.4 から速度比 0.714 のとき A 船と B 船の進路差が 44.4° となり、この付近で DREP と SD の比が最大となっていることが分かる。また、図 4.4.5 に示すとおり、A 船と B 船の速度差が小さい（速度比が 1 に近づく）程、DREP と SD の比が最大となる進路差は小さくなり、また、DREP と SD の比も大きくなる。このように、速度比により DREP と SD の比が最大となる進路差は異なるもののその関係は明らかである。このため、相手船との安全航過距離として使用される SD 値と DREP の関係に違いがあることを考慮する必要がある。

以上から、設定条件によるこのような特性を踏まえた上で、DREP を評価手法に取り入れることは可能であると判断した。

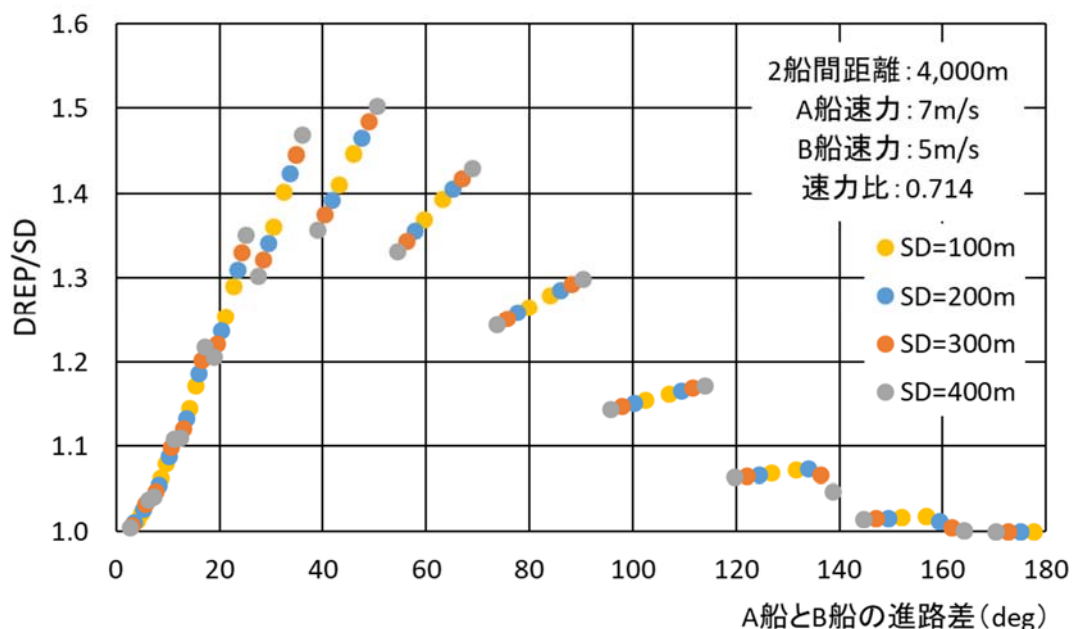


図 4.4.2 A 船と B 船の進路差に対する DREP と SD の比

V_B

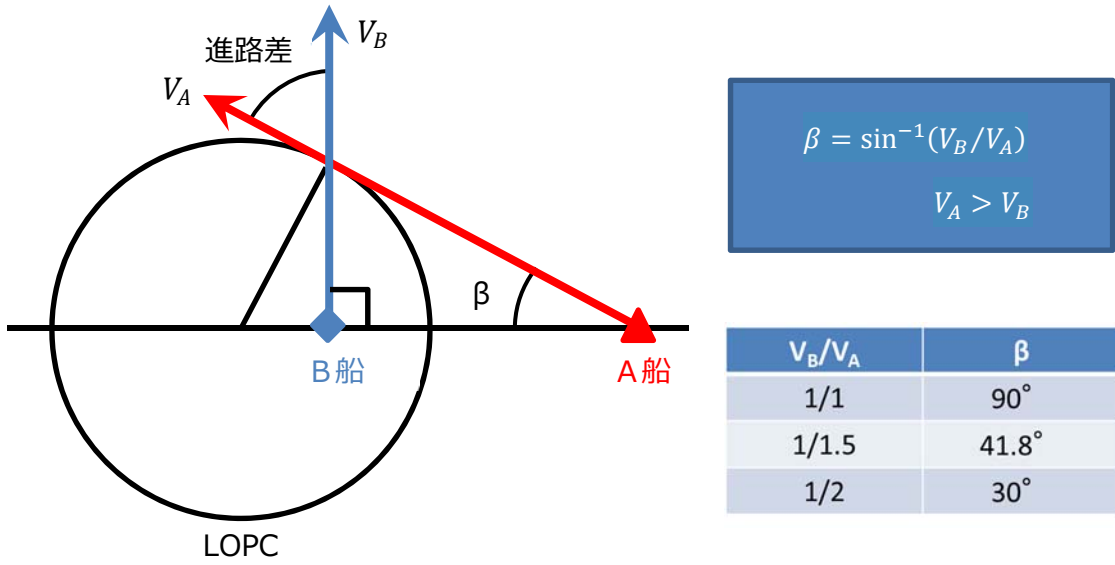


図 4.4.3 A 船が LOPC の接点に向かう場合の速力比と進路差

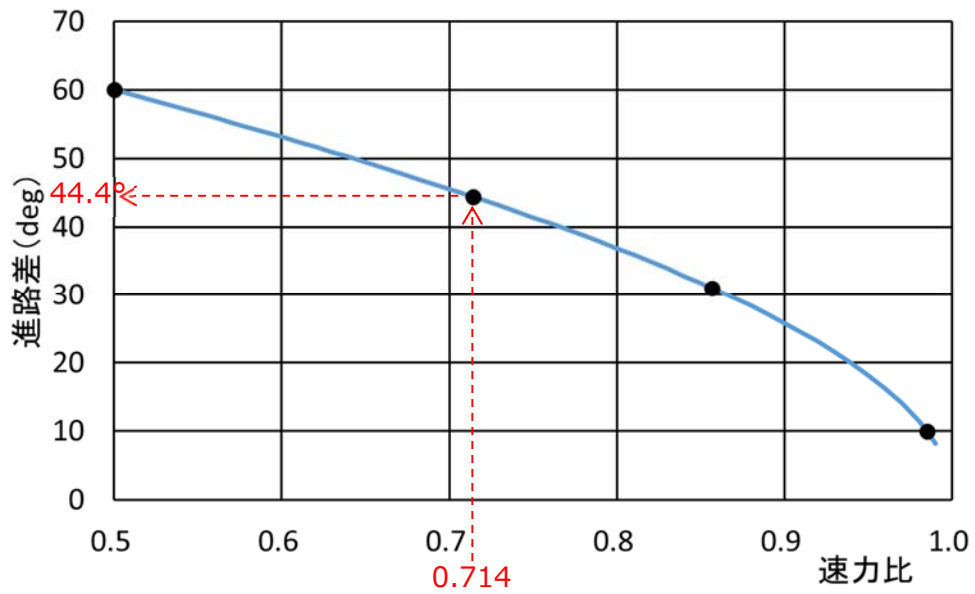
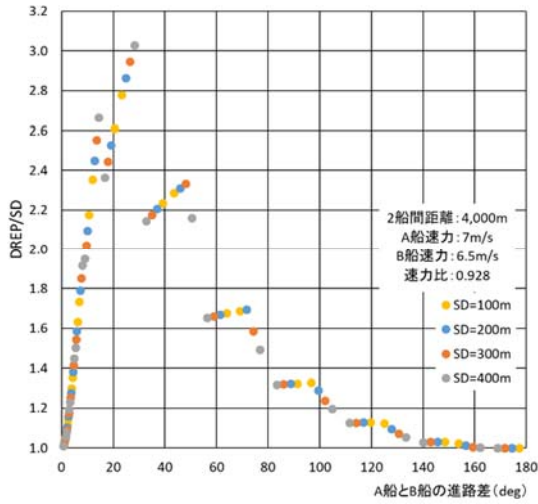
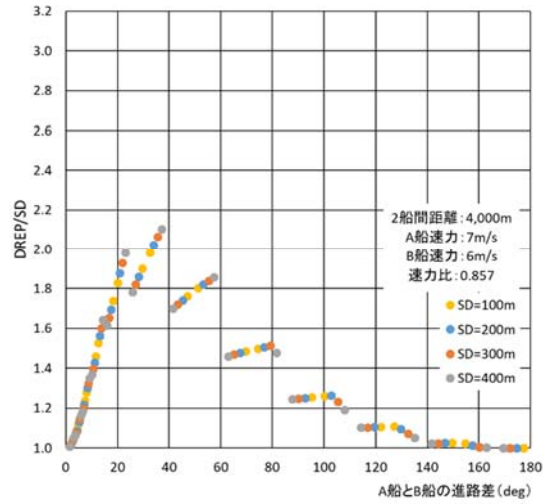


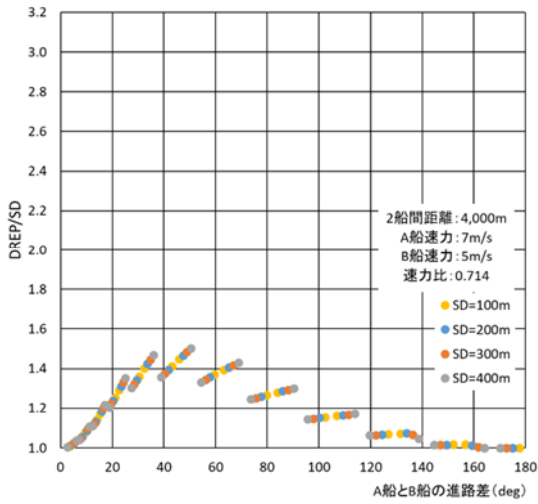
図 4.4.4 評価用の速力比と進路差の関係



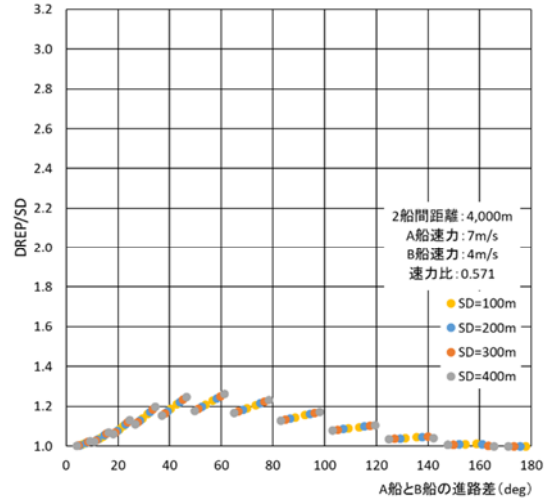
(a) 速力比 0.928



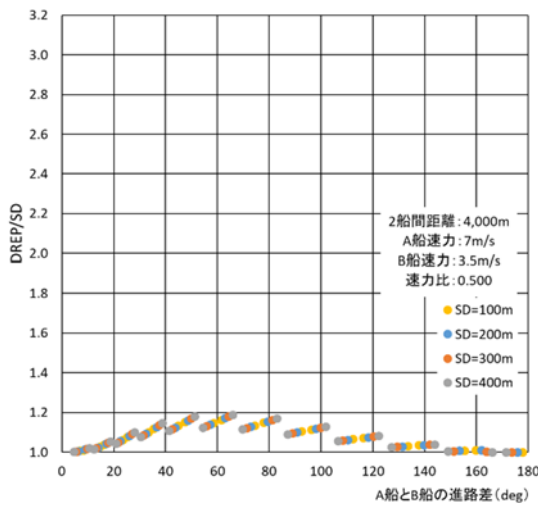
(b) 速力比 0.857



(d) 速力比 0.714



(e) 速力比 0.571



(f) 速力比 0.500

図 4.4.5 A 船と B 船の進路差に対する DREP と SD の比【速力比による比較】

4.5 まとめ

「第4章 衝突予測線を利用した評価手法の提案」について、次のとおり取りまとめる。

前章で整理した解析結果をもとに越中島 OZT 研究会で研究が進む OZT の計算過程で算定される衝突予測線 (LOPC : Line of Predicted Collision) [38]を利用した評価手法の提案を行うため、LOPC や PPC の計算方法についての概要を説明した。

LOPC については、2 船の位置と速力という 2 種類の情報が与えられると、当該海域には 2 船間の速力比 (N) に対応した LOPC が形成され、幾何学的にはこの LOPC 上でのみ衝突が起こることを説明するとともに、A 船の位置を原点 (0,0)、B 船の位置を (1,000,0) とし、それぞれの船速を $V_a=10\text{kt}$ 、 $V_b=8\text{kt}$ とする場合を例として、座標面上への LOPC の計算手順 (描画方法) を具体的に説明した。

また、PPC については、2 船それぞれの進路が与えられると、船の位置から進路方向に延長した直線と LOPC が交わる位置として得られることを説明するとともに、2 船の内、速力の速い船の場合、LOPC の状況によって PPC は 2 箇所、1 箇所及び存在しない場合があることや速力の遅い船では、LOPC が船を取り囲む円となるので、必ず 1 個の PPC が存在することを説明し、幾何学的な関係から計算する PPC の計算手順について説明した。

これらの LOPC と PPC を活用した評価手順を説明するため、「同時刻性の確保」と「空間での評価」を行うことの必要性を整理した。すなわち、衝突とは同じ時刻に同じ位置に両船が存在することなので、衝突の危険性を評価するためには、単に重なる「ある・なし」だけでなく、同時刻性を確保した上で両船の物理的な大きさや位置、進路及び速力等の条件を踏まえた評価を行う必要があるということである。

このことを踏まえた評価方法と手順について、相対運動による評価ではなく、2 船の真運動に基づいた評価方法であることを具体事例により説明するとともに、PPC を基準とした危険度評価指標 (DREP) を提案し、実空間の位置座標上に 2 船のバンパーを表示した空間評価が可能となることを任意のシナリオによる評価例で示した。

また、評価手順の有効性を検証するため、DREP と最接近距離 (SD) とを比較した。具体的には、速力比が 0.714 のケースでは両船の進路差が 44.4° 付近で DREP と SD の比が最大となり速力差が小さい (速力比が 1 に近づく) 程、DREP と SD の比が最大となる進路差は小さくなり、また、DREP と SD の比も大きくなることが分かり、このような特性を踏まえた上で、DREP を評価手法に取り入れることは可能であると判断した。

このように、2 船の位置と速力の情報があれば 1 本の LOPC (その瞬間に衝突の可能性のある線) が得られ、この LOPC を基に、2 船のバンパーの大きさから衝突の危険度を判定する新たな評価方法を提案した。

本評価方法は、相対運動 (DCPA や TCPA) によらない真運動による評価方法である点も大きな特徴であると考えられる。

次章では、本章で取りまとめた評価手法及び評価指標をもとに、バンパーモデルによる危険度評価について考察する。

第5章 バンパーモデルによる危険度評価

5.1 バンパーモデルによる危険度評価例

バンパーモデルによる危険度評価例を説明するため、図 4.3.4 に A 船が B 船の船尾に向かう進路 (241.1°) の条件を加えると共に、A 船及び B 船の全長 (L) を 100m、第 3 章での解析結果を参考にバンパーの大きさを 4L×1L の楕円とし、船の位置は楕円中心より長半径の 20% 後方に配置した例を図 5.1.1 に示す。この図に示す楕円の配置は、長半径の 20% 後方に配置したため、船の位置から前方に 2.4L、後方に 1.6L の位置となっている。

同図中の $\triangle A2B1C1$ において、 $\overline{A2B1}$ は A 船の速力円上の接線とほぼ等しいため、 $\angle C1A2B1$ は、略 90° となる。2 船の進路差を α とする時、A2 と C1 間の距離 (da) と B1 と C1 間の距離 (db) は、幾何学的な条件から (式 5.1.1) 及び (式 5.1.2) の式で求めることとする。

$$da = \left| \frac{DREP}{\tan(\alpha)} \right| = \left| \frac{\overline{A2B1}}{\tan(\alpha)} \right| \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 5.1.1})$$

$$db = \left| \frac{DREP}{\sin(\alpha)} \right| = \left| \frac{\overline{A2B1}}{\sin(\alpha)} \right| \quad \dots \dots \dots \quad (\text{式 5.1.2})$$

ただし、 $DREP = \overline{A2B1}$ とする。

本ケースでの数値条件における危険度の評価は、 $da \leq 1.6L$ & $db \leq 2.4L$ を満たす時が危険な状況にあると判定する。これは、 da は $\overline{A2C1}$ を示すことから、A 船バンパー楕円の船尾長半径 1.6L と等しく、 db は $\overline{C1B1}$ を示すことから、B 船バンパー楕円の船首長半径 2.4L と等しいため、それを下まわる場合を危険な状況と考えた判定基準の例である。

また、A 船進路が 241.1° のケースでは、同様に、A2' と C1' の距離を da 、B1 と C1' の距離を db 、DREP を A2'B1 の距離として求めることとし、この場合は、 $da \leq 2.4L$ & $db \leq 1.6L$ を満たす時を危険と判定する。

図 5.1.1 中に各距離の数値結果を記載しているが、A 船進路が 250.7° で A 船が B 船の船首側を横切る場合、わずかに両船のバンパーに重なる部分はあるものの、前記の判定基準以内であり、許容できる状況と判定できる。

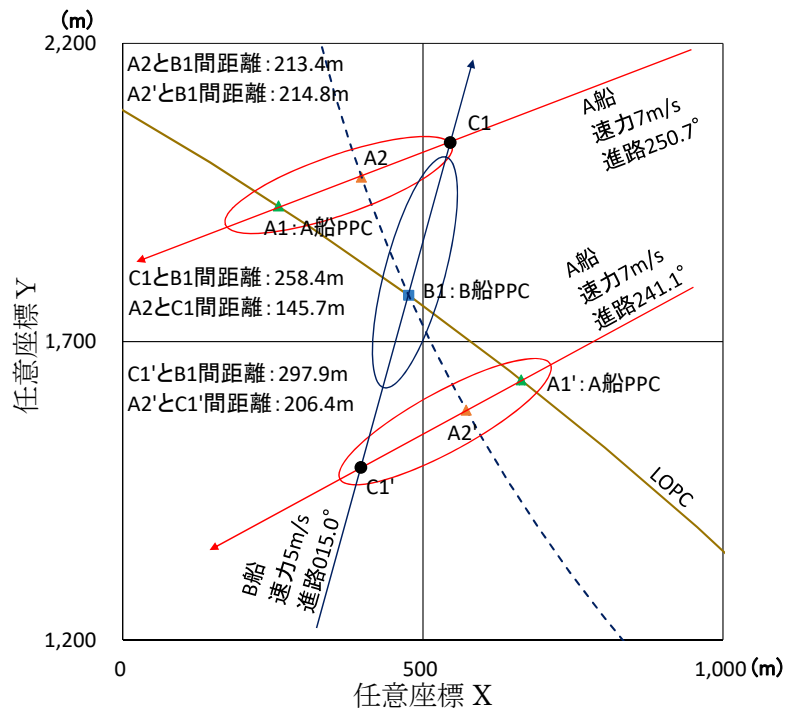


図 5.1.1 バンパーモデルによる危険度評価の例

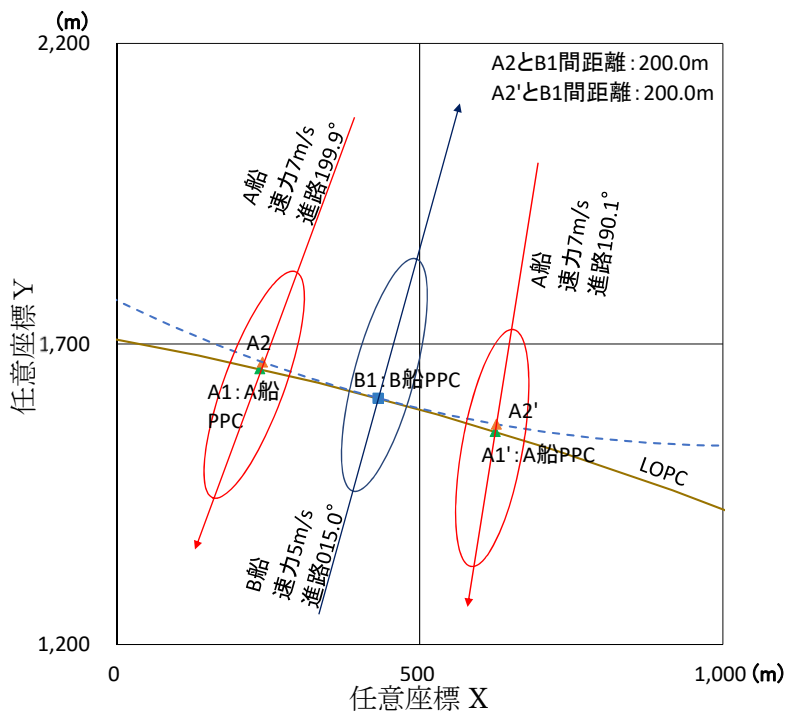


図 5.1.2 バンパーモデルによる危険度評価の例 2

A 船と B 船が、ほぼ反航して航過するようなケースを図 5.1.2 に示す。同図は、図 4.4.1 において、B 船から 15.0° の方向に A 船を配置したケースである。この例で分かるように、バンパーの船首尾方向の距離による判定に加えて、両船による DREP (A2 と B1 間の距離、または、A2' と B1 間の距離) とバンパーの横距離 (今回の数値例では 1L) を比較評価した危険度の判定についても、見合い関係に応じて、併せて行う必要がある。

前述したバンパーモデルによる危険度評価の 2 例と同様に、前章の図 4.4.1 で示した A 船位置 (B 船から方位角を 15.0° 間隔で変化させた) の各ケースの評価結果を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 バンパーモデルによる危険度評価結果

A 船位置 (deg)	A 船進路 (deg)	DREP (m)	da (m)	db (m)
0	174.2	202.3	533.5	570.5
0	164.5	203.2	344.7	400.1
15	199.9	200.0	2,326.9	2,335.5
15	190.1	200.0	2,326.9	2,335.5
30	225.5	203.2	344.7	400.1
30	215.8	202.3	533.5	570.5
45	250.7	213.4	145.7	258.4
45	241.1	214.8	206.4	297.9
60	274.9	230.3	41.2	234.0
60	265.8	233.1	81.3	246.9
75	297.3	251.8	55.1	257.7
75	289.0	257.3	18.0	257.9
90	317.2	271.4	170.6	320.6
90	310.0	281.2	130.9	310.2
105	333.4	278.6	313.5	419.4
105	327.6	293.2	270.0	398.5
120	345.7	268.3	478.0	548.1
120	341.4	284.8	429.1	515.0
135	354.7	247.6	670.4	714.6
135	351.6	262.1	605.9	660.2
150	1.5	226.6	943.8	970.7
150	359.1	237.4	834.4	867.5
165	6.9	210.9	1,478.1	1,493.1
165	4.9	217.8	1,227.6	1,246.7
180	11.5	202.1	3,304.9	3,311.1
180	9.8	205.3	2,252.9	2,262.3

これらの結果の内、A 船位置が、0.0°、30.0°、60.0° 及び 75.0° のケースを図 5.1.3～図 5.1.6 に例示する。

表 5.1.1 及び図 5.1.3～図 5.1.6 の結果のうち、図 5.1.5 に示す B 船の船首を A 船が横切るケース (A 船位置が 60.0° のケース) においては、 $da=41.2\text{m}$ 、 $db=234.0\text{m}$ であり、 $L=100\text{m}$ であることから $da \leq 1.6L$ & $db \leq 2.4L$ を満たすことになり、「危険」と判定される。

一方、その他のケースでは、 $da \leq 1.6L$ & $db \leq 2.4L$ 、または $da \leq 2.4L$ & $db \leq 1.6L$ を満たすことなく、「危険でない」と判定されるケースとなる。

以上により、船の長さを基準としたバンパーの大きさを仮定できれば、バンパーの前後の距離と横距離から、LOPC と PPC を基準とした真運動に基づく 2 船の関係から当該空間の危険度の評価が可能と考える。

なお、表 5.1.1 は A 船と B 船が 4,000m 離れた地点（図 4.4.1 に示した配置条件）での評価結果であり、両船の位置が移動すれば LOPC 及び PPC が変化し、これにより DREP の値も変わることになるため、 da 及び db も DREP に応じて変化する。このため、ある時間経過し、2 船が設定した進路・速力で移動した場合には評価結果も変わる場合があることに注意する必要がある。

また、判定結果は評価に使用するバンパーの大きさにより変わるものであり、どの程度のバンパーの大きさが評価のために適切であるかは、今後の課題である。

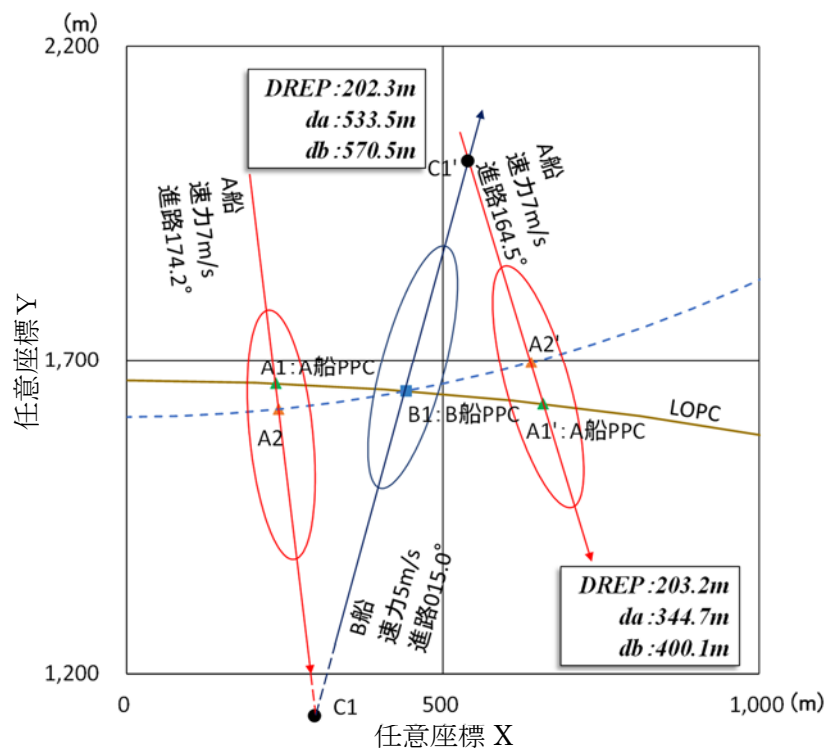


図 5.1.3 バンパーモデルによる危険度評価の例 3

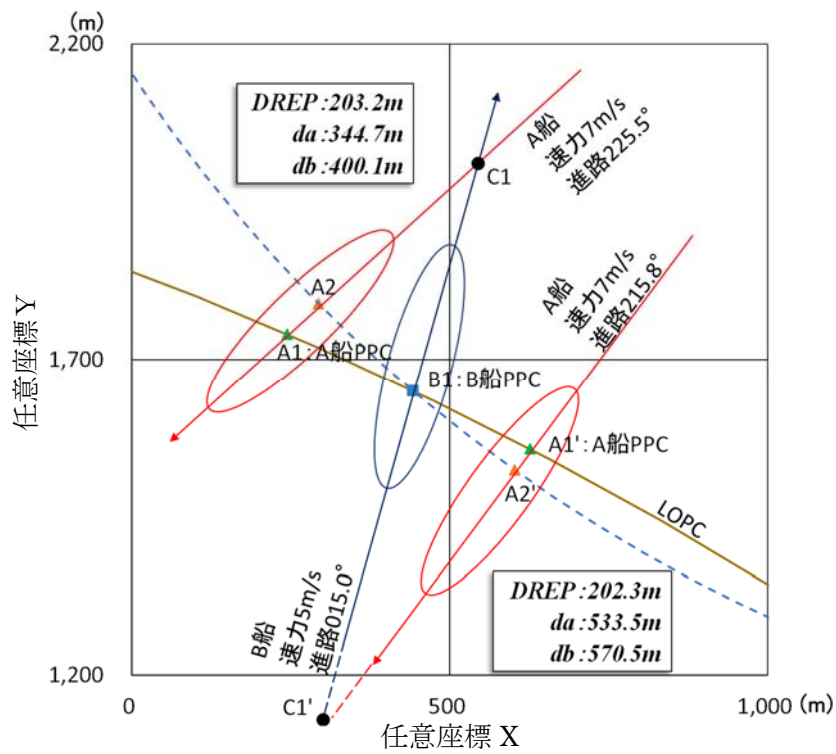


図 5.1.4 バンパーモデルによる危険度評価の例 4

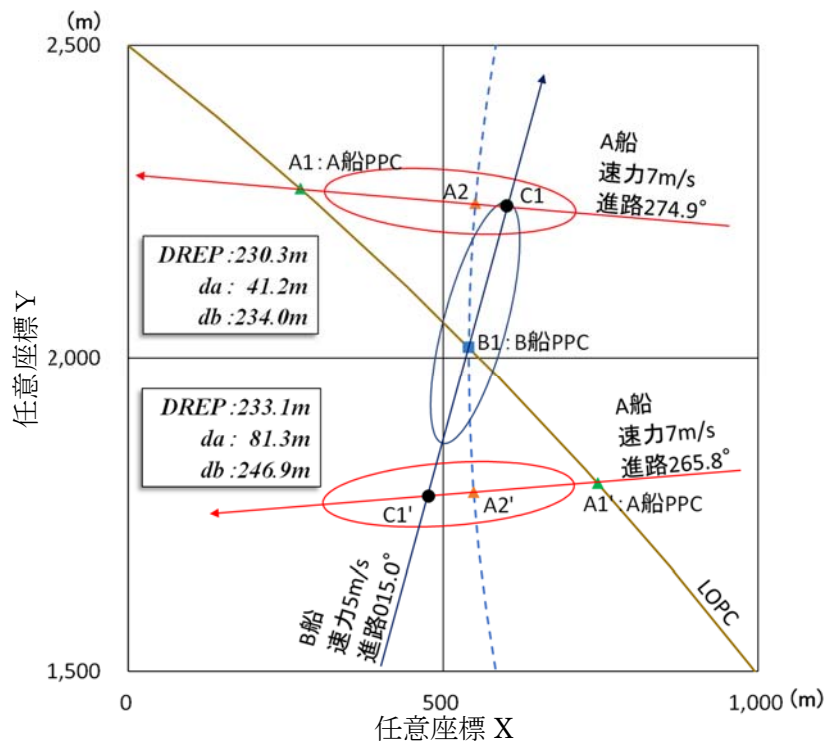


図 5.1.5 バンパーモデルによる危険度評価の例 5

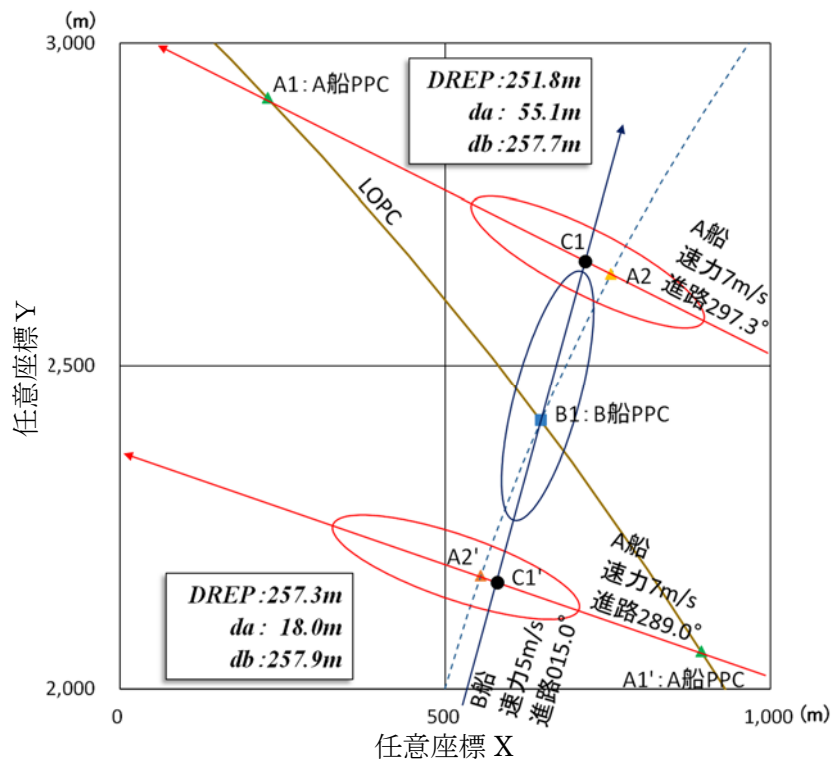


図 5.1.6 バンパーモデルによる危険度評価の例 6

5.2 実海域データによる解析結果

第3章で示した実海域での140パターンの行会いケースの内、両船共にAISを搭載している場合と両船共にAISを搭載していない場合を任意に抽出し、5.1節で提案した危険度評価手法を適用した危険度評価の解析結果について示す。なお、本節に示す図は、速力の速い船舶をA船、速力の遅い船舶をB船としている（以下、本節でのA船とB船は同様に区分している）。

5.2.1 両船共にAISを搭載している場合

(1)解析例1（図3.1.3(e) [22-29] のケース バンパーサイズ 4L×1L）

図5.2.1は、第3章の図3.1.3(e) [22-29] のケースに危険度評価手法を適用した解析結果を示している。A船位置は▲、B船位置は■で表示してあり、4.3.2節及び4.3.3節に示した評価手順及び評価指標の対象となるA船及びB船の位置をA0及びB0としている（DREPはA0とB0間の距離となる）。また、同図には、当該A0及びB0の位置を基準として5.1節で示したものと同様の考え方に基づくバンパーを表示している。本解析例では、A船の全長が84m、B船の全長が63mであり、バンパーサイズは4L×1Lとしている。A船とB船の全長が異なるので、(式3.2.1)により計算される規格化した船の長さ（Lg）に基づく評価を行うこととする。

(式5.1.1)及び(式5.1.2)により計算される da 及び db について、バンパーの前後のサイズである $1.6 \times Lg$ と $2.4 \times Lg$ による判定と、DREPとバンパー横距離（本ケースでは $1 \times Lg$ ）による判定も併せて行った。同図中に判定結果を示しているが、何れも「危険でない」との判定となっている。図5.2.1の横軸を9,000m～10,000m、縦軸を17,000m～18,000mに拡大した図を図5.2.2に示す。「危険」の判定については、A船及びB船のバンパーの重なりが無いことから判断可能である。

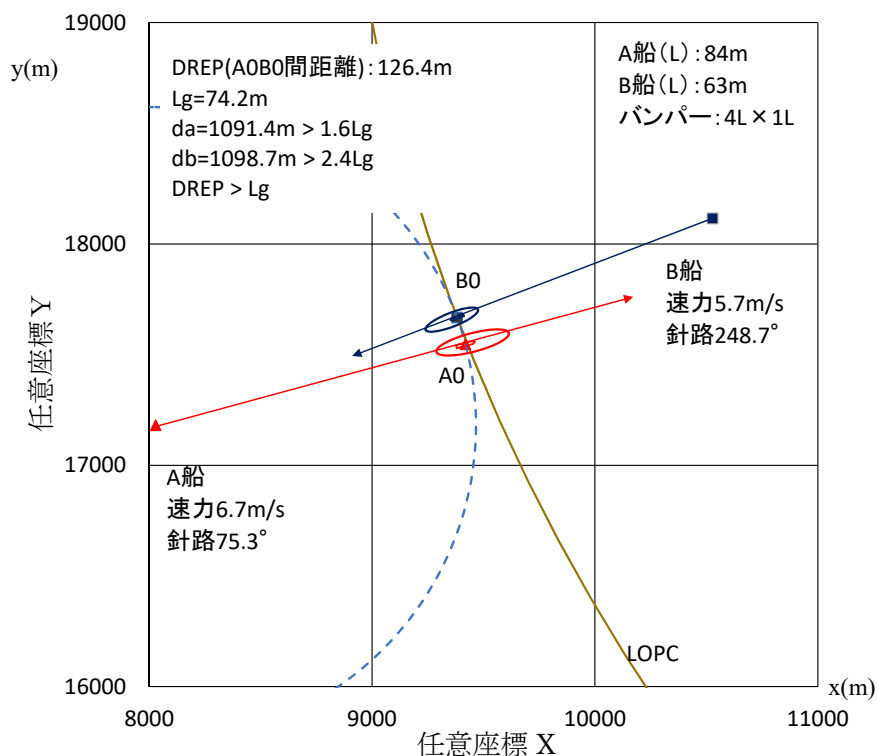


図 5.2.1 解析例 1-1 [22-29]

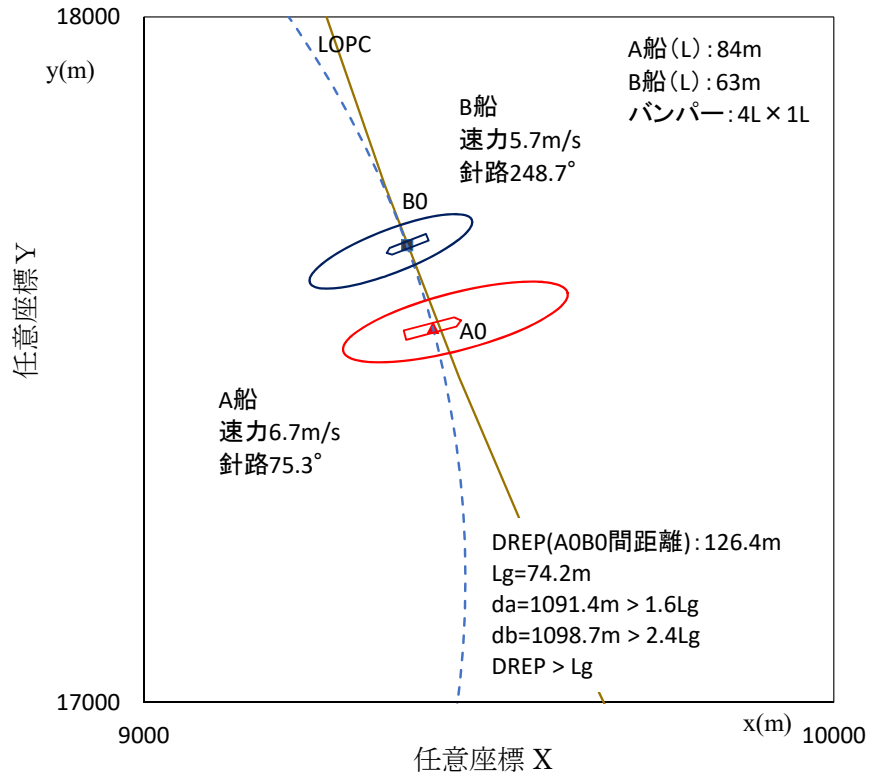


図 5.2.2 解析例 1-1 (拡大) [22-29]

図 5.2.1 の A 船及び B 船位置から、1 分後、2 分後、3 分後の位置における解析結果を図 5.2.3、図 5.2.4 及び図 5.2.5 に示す。

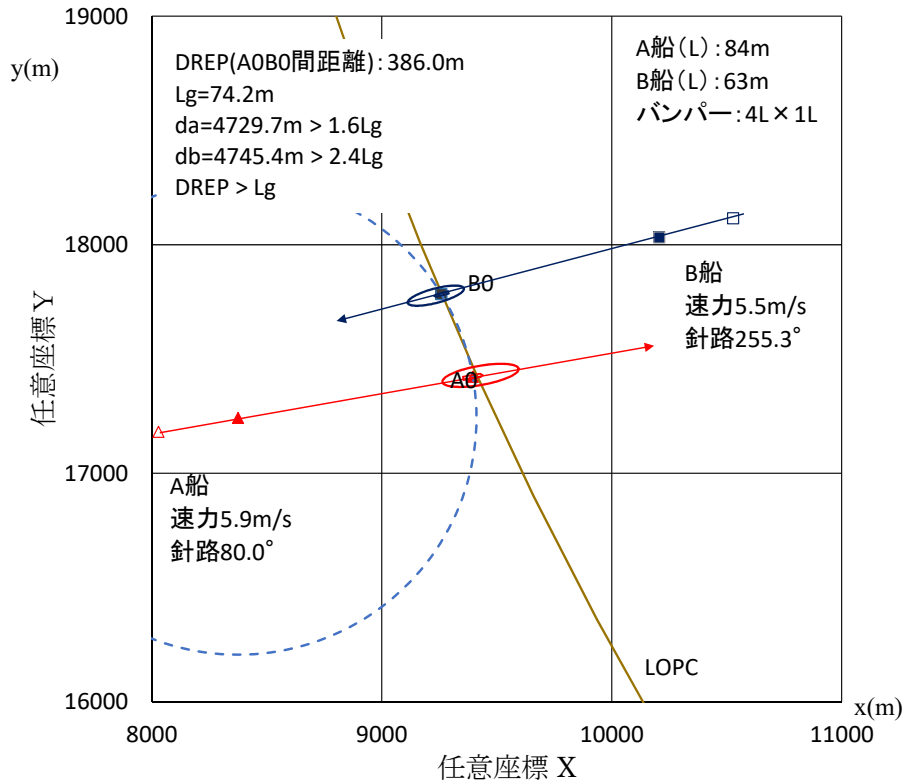


図 5.2.3 解析例 1-2 (1 分後) [22-29]

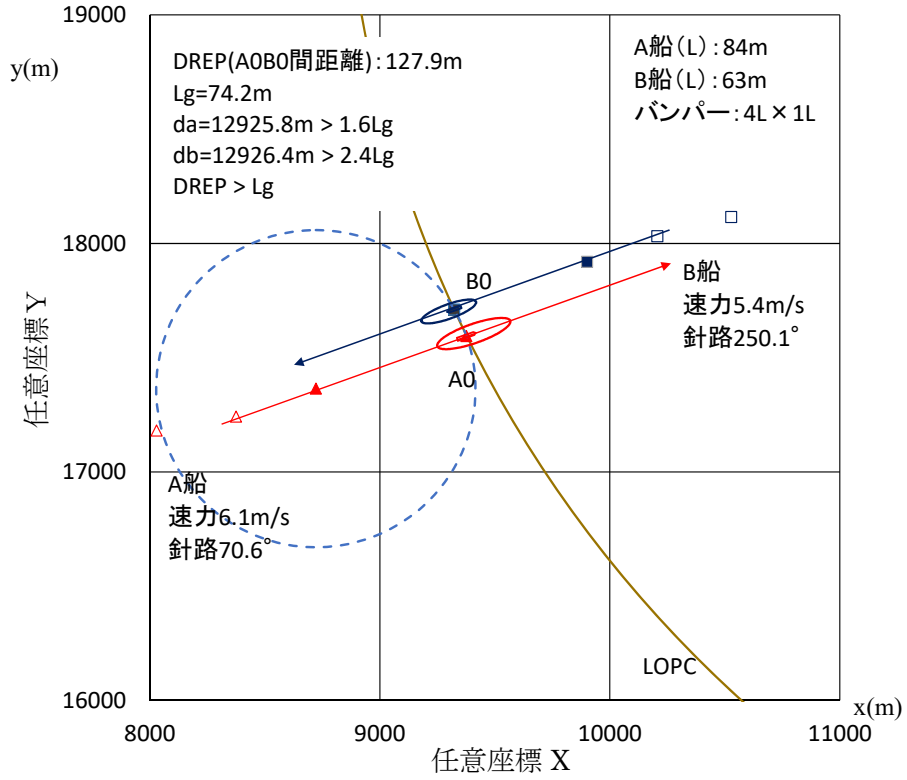


図 5.2.4 解析例 1-3 (2分後) [22-29]

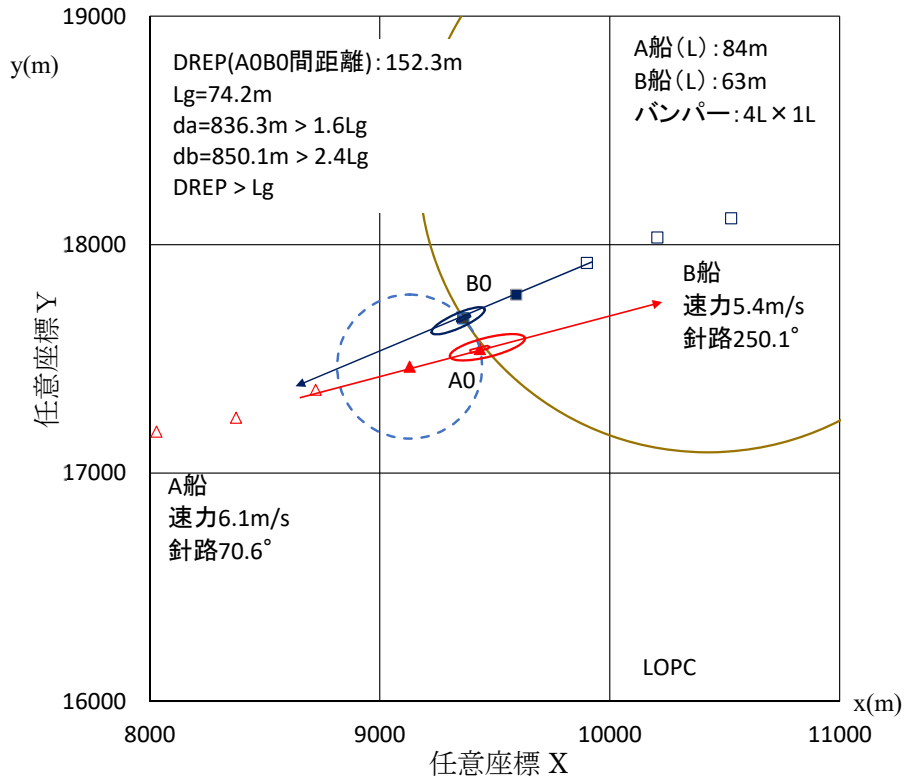


図 5.2.5 解析例 1-4 (3分後) [22-29]

各図とも、同図中△及び□のマークで A 船及び B 船の過去位置を表示している。

図 5.2.1 及び図 5.2.3～図 5.2.5 の 4 つの図を比較してみると、両船の進路の違いによってバンパー間の距離が変化するものの、全ての図で「危険でない」との判定となっている。次に、評価のバンパーサイズを 8L×3L に変更した場合を、図 5.2.6 及び図 5.2.7 に示す。

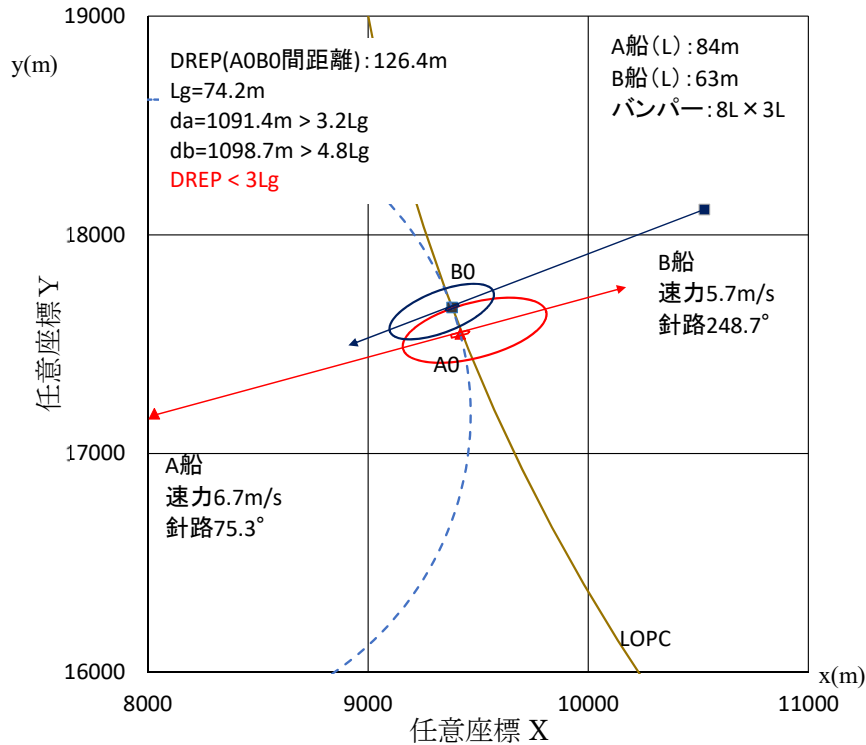


図 5.2.6 解析例 1-5 (8L×3L のバンパー) [22-29]

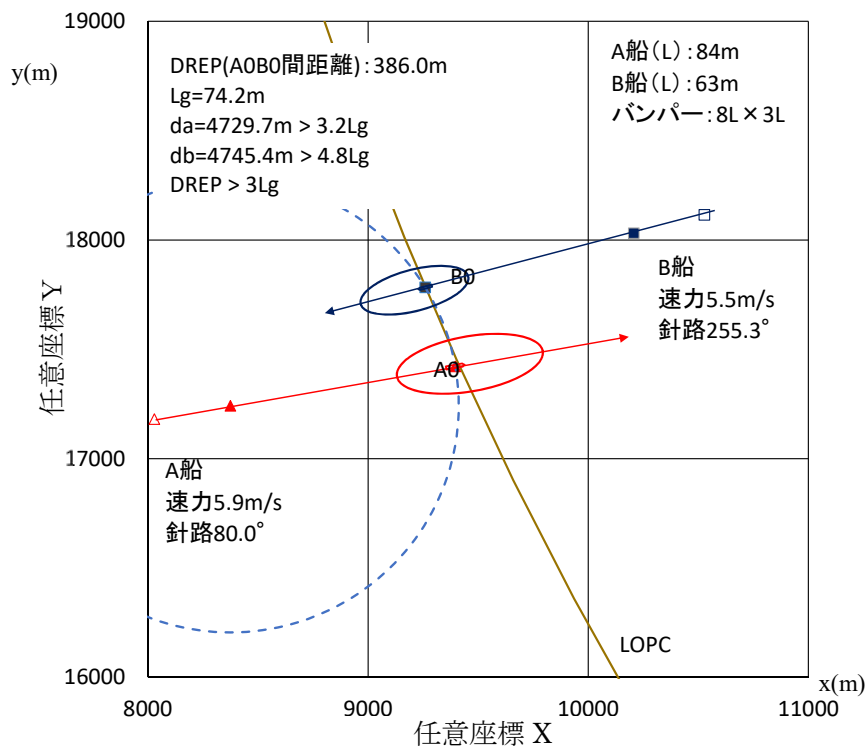


図 5.2.7 解析例 1-6 (8L×3L のバンパー) [22-29]

図 5.2.6 は図 5.2.1 (解析例 1-1) の状況でバンパーサイズを $8L \times 3L$ にした場合、図 5.2.7 図 5.2.7 は図 5.2.3 (解析例 1-1 の 1 分後) の状況でバンパーサイズを $8L \times 3L$ にした場合を示している。図 5.2.6 では、A 船及び B 船のバンパーが重なっており、DREP とバンパー横距離 ($3 \times Lg$) による判定が「危険」となっていることが分かる。その 1 分後の図 5.2.7 では A 船進路が右に、B 船進路が左に変移したことから、バンパーの重なりが無くなり、DREP とバンパー横距離 ($3 \times Lg$) による判定が「危険でない」に変わっている。なお、 da 及び db の判定値は、バンパーの大きさに合わせ $3.2Lg$ 及び $4.8Lg$ に変更した。

(2)解析例 2 (図 3.1.11 (d) [137-125] のケース バンパーサイズ $4L \times 1L$)

図 5.2.8 は、第 3 章の図 3.1.11 (d) [137-125] のケースに危険度評価手法を適用した解析結果を示している。このケースの A 船及び B 船の進路差は 228.4° (131.6°) であり、横切り関係にあるケースと捉えることができる。図中の各記号の意味は図 5.2.1 等と同じである。A 船は全長が 153m のフェリー、B 船は全長 85m の貨物船であり、 $Lg=123.8m$ となっている。このケースでは、DREP とバンパー横距離 ($1 \times Lg$) による判定は「危険でない」ものの、DREP を基に計算された da 及び db による判定は両方とも「危険」となっている。このことは、A 船のバンパー後方と B 船のバンパー前方が相当程度の重なりがあることから理解できる。

図 5.2.8 の A 船及び B 船位置から、1 分後及び 2 分後の位置における解析結果を図 5.2.9 及び図 5.2.10 に示す。

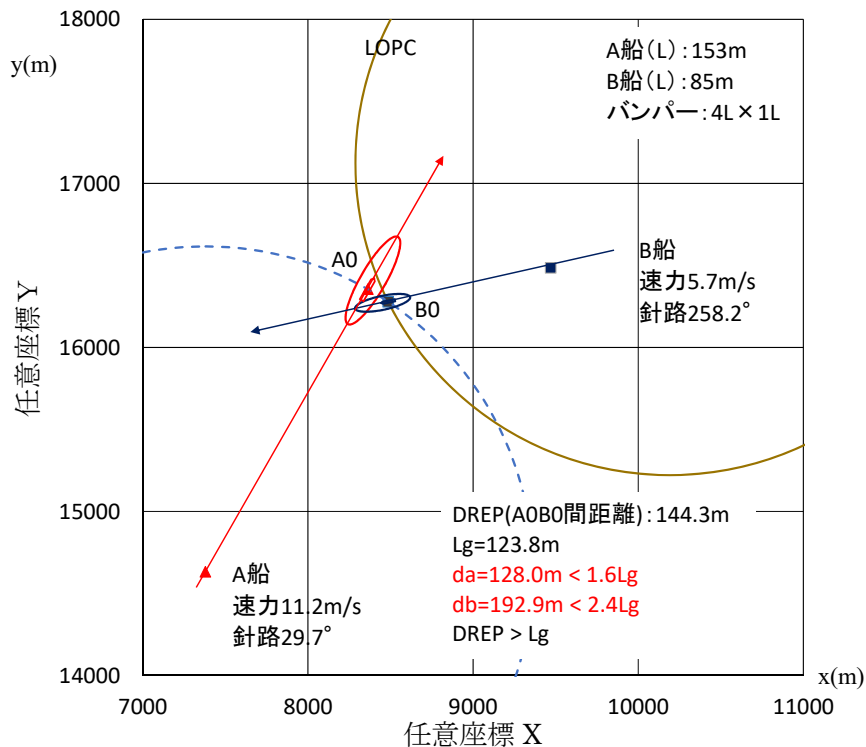


図 5.2.8 解析例 2-1[137-125]

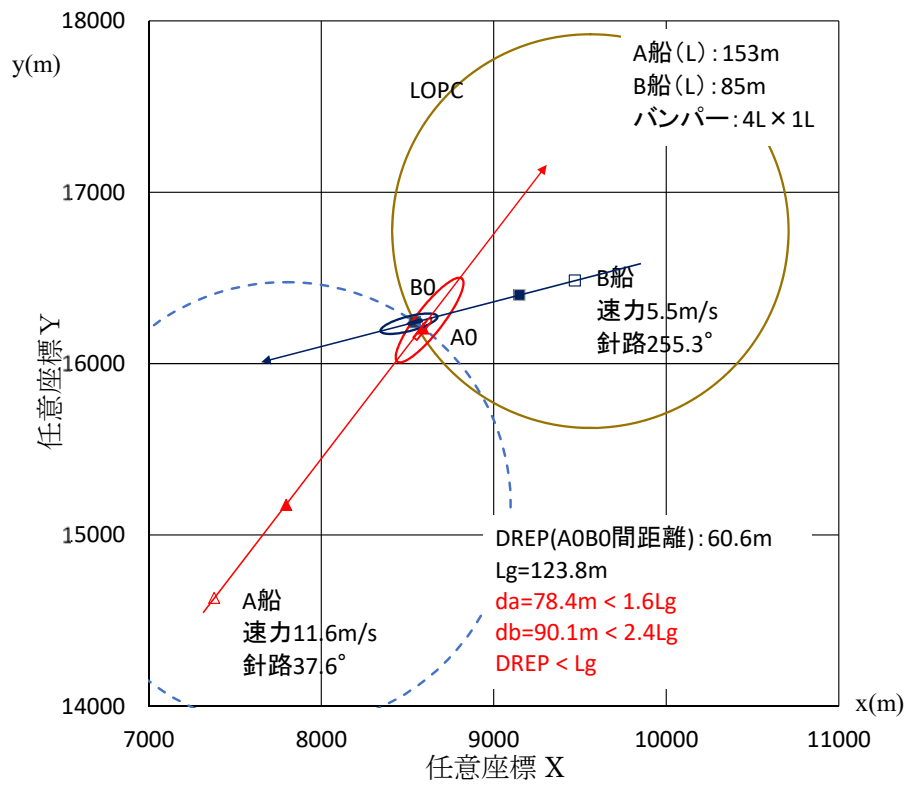


図 5.2.9 解析例 2-2 (1分後) [137-125]

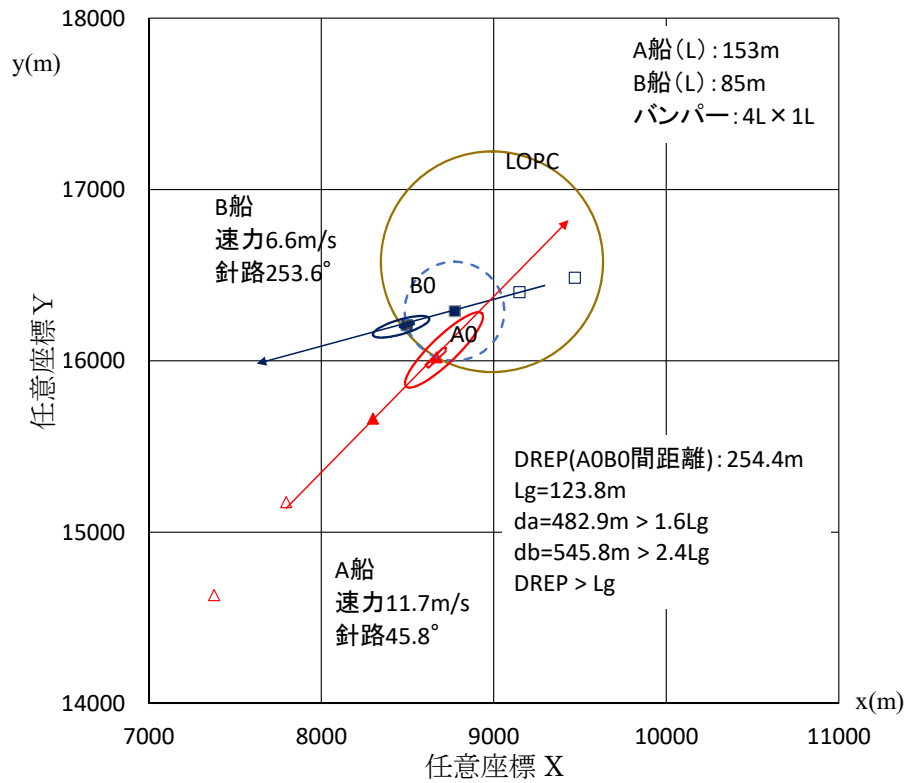


図 5.2.10 解析例 2-3 (2分後) [137-125]

図 5.2.8、図 5.2.9 及び図 5.2.10 を順番に見ていくと、A 船は右に進路を変更し、図 5.2.9 の時点では、DREP とバンパー横距離 ($1 \times Lg$) による判定、また、DREP を基に計算された da 及び db による判定が全て「危険」となっている。しかし、その 1 分後の図 5.2.10 では全ての判定が「危険でない」に変わっていることが分かる。

5.2.2 両船共に AIS を搭載していない場合

図 5.2.11 は、第 3 章の図 3.1.17 (d) [241-246] のケースに危険度評価手法を適用した解析結果を示している。このケースの A 船及び B 船の進路差は 154.6° である。

図中の各記号の意味は前項と同様に、A 船位置は▲、B 船位置は■で表示しており、4.3.2 節及び 4.3.3 節に示した評価手順及び評価指標の対象となる A 船及び B 船の位置を A0 及び B0 としている (DREP は A0 と B0 間の距離となる)。また、同図には、当該 A0 及び B0 の位置を基準として 5.1 節で示したものと同様の考え方に基づくバンパーを表示している。本解析例では、A 船の全長が 84m、B 船の全長が 63m であり、バンパーサイズは $4L \times 1L$ としている。A 船と B 船の全長が異なるので、(式 3.2.1)により計算される規格化した船の長さ (L_g) に基づく評価を行うこととする。

(式 5.1.1)及び(式 5.1.2)により計算される da 及び db について、バンパーの前後のサイズである $1.6 \times L_g$ と $2.4 \times L_g$ による判定と、DREP とバンパー横距離 (本ケースでは $1 \times L_g$) による判定も併せて行った。

A 船及び B 船共に AIS 非搭載船であったので、全長は目視による総トン数の観測結果から推測した値である。なお、バンパーの大きさは $4L \times 1L$ 、 $L_g=55.2m$ である。このケースでは、DREP とバンパー横距離 ($1 \times L_g$) による判定、DREP を基に計算された da 及び db による判定は全て「危険でない」となっている。同図の状況から 1 分後、2 分後、3 分後及び 4 分後の状況について、危険度評価手法を適用した解析結果を図 5.2.12～図 5.2.15 に示す。

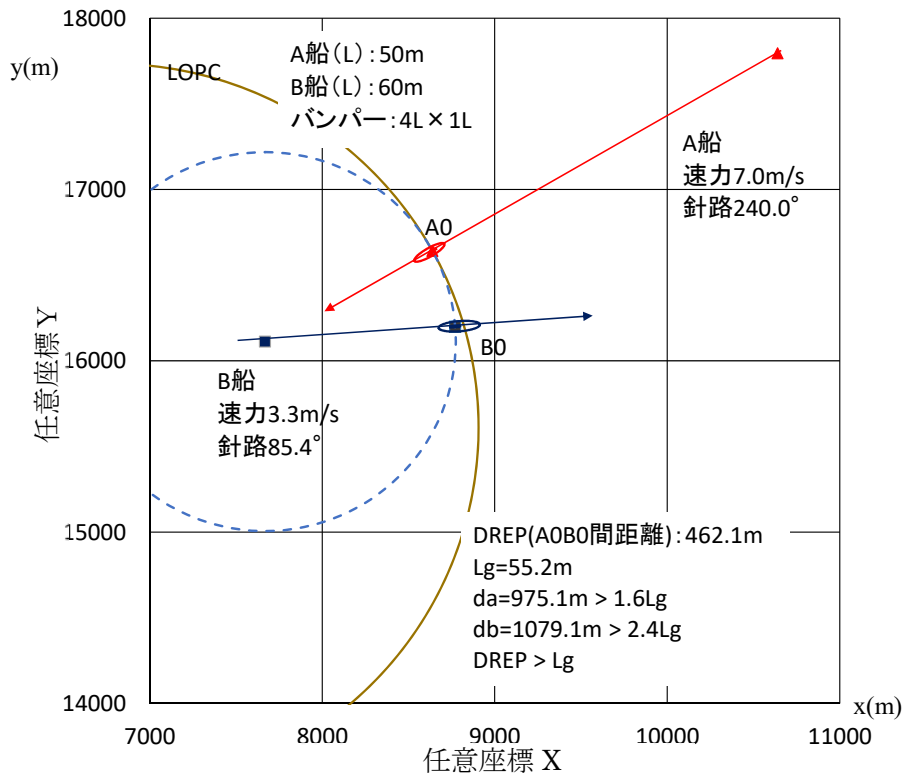


図 5.2.11 解析例 3-1 [241-246]

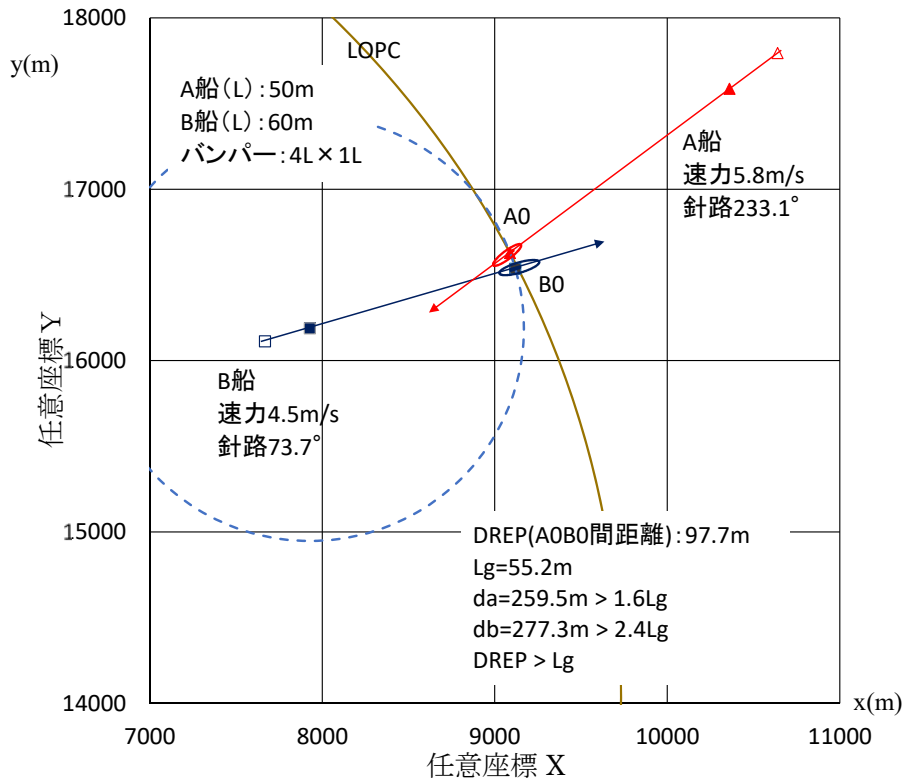


図 5.2.12 解析例 3-2 (1分後) [241-246]

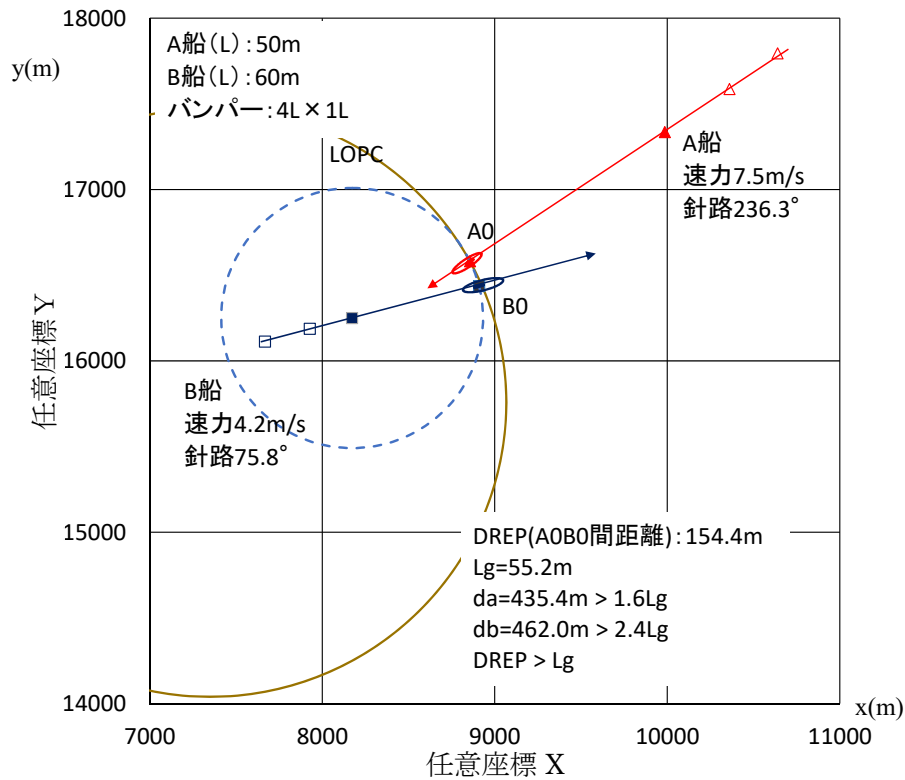


図 5.2.13 解析例 3-3 (2分後) [241-246]

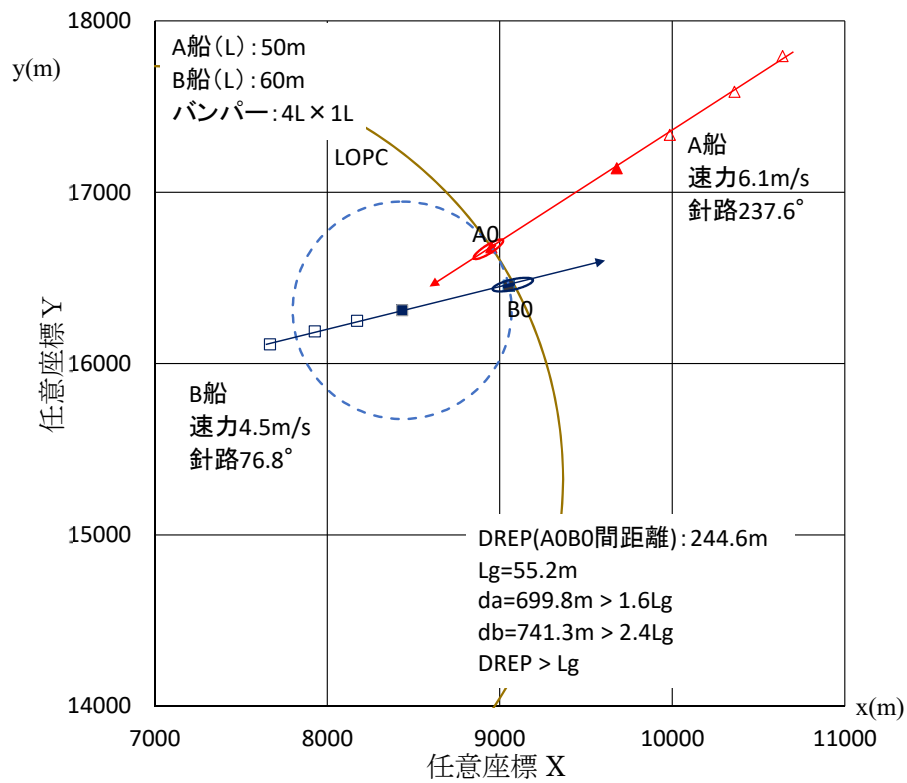


図 5.2.14 解析例 3-4 (3分後) [241-246]

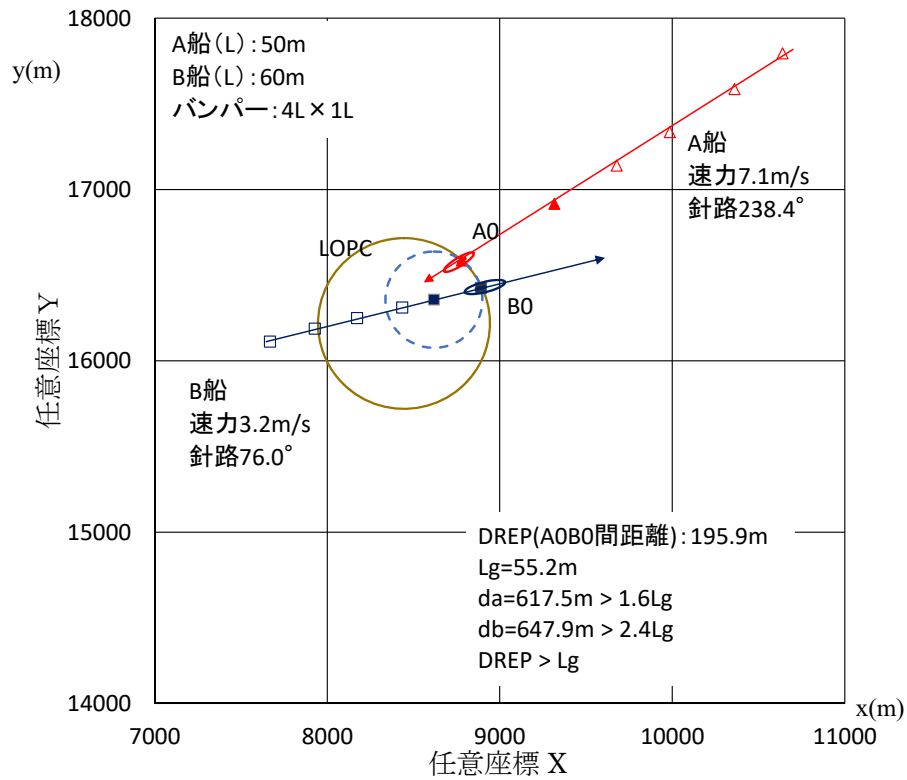


図 5.2.15 解析例 3-5 (4分後) [241-246]

図 5.2.11 の 1 分後の図 5.2.12 において、A 船及び B 船がそれぞれ左に進路を変える結果となっていることから、DREP は比較的小さな値を示しているものの、両船の全長が小さいこともあり、判定は全て「危険でない」、バンパーの重なりもなしとなっている。その後も、全ての判定は「危険でない」を示す結果となっている。但し、バンパーを例えば、8L×3Lにする場合は、この判定結果は変わってくる事に注意する必要がある。図 5.2.16 に図 5.2.12 と同じ状況でバンパーの大きさを 8L×3L にした場合の結果を示す。同図から DREP とバンパー横距離 (3×Lg) による判定が「危険」に変わっていることが分かる。

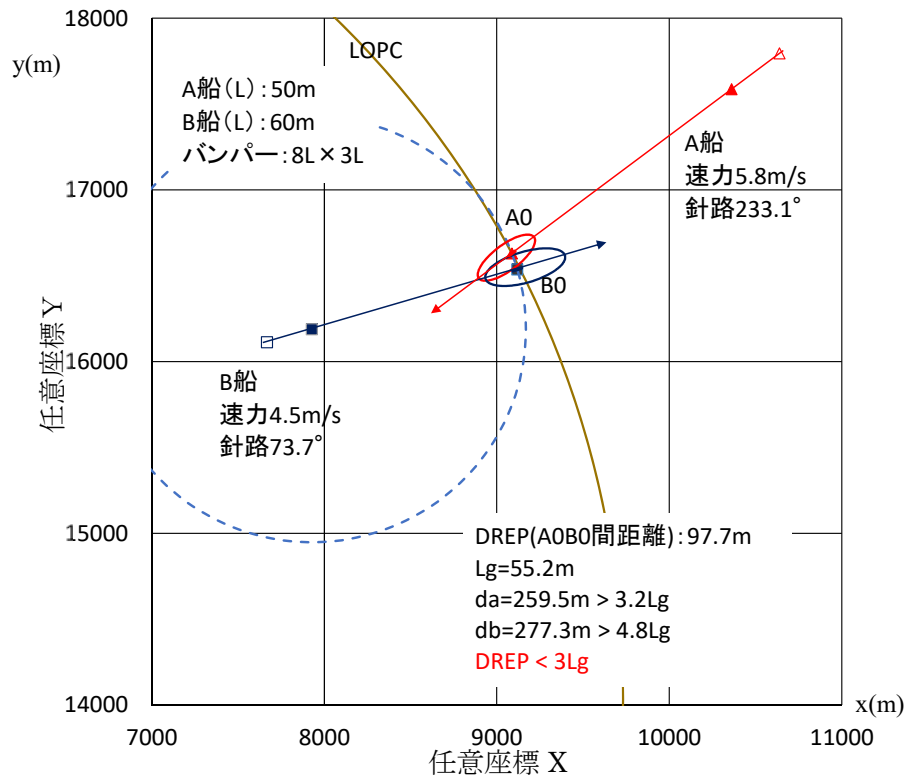


図 5.2.16 解析例 3-6 (4 分後) [241-246]

5.3 まとめ

「第5章 バンパーモデルによる危険度評価」について、次のとおり取りまとめる。

行会い関係にある A 船と B 船の全長 (L) を 100m、バンパーの大きさを $4L \times 1L$ の楕円 (船の位置から前方に $2.4L$ 、後方に $1.6L$ の大きさ)、A 船と B 船の進路交差距離をそれぞれ da 、 db と仮定し、A 船が B 船の船首前方で交差した場合と船尾後方で交差した場合に応じた任意のシナリオを用いて、第4章で提案した危険度評価指標値である DREP を基準とした危険度評価手法による危険度評価を試行した。危険度の評価は、A 船が B 船の船首前方で交差した場合は $da \leq 1.6L$ & $db \leq 2.4L$ 、A 船が B 船の船尾後方で交差した場合は $da \leq 2.4L$ & $db \leq 1.6L$ を満たす時が危険な状況にあるとの判定基準を例示し判定した。

このようにバンパーモデルによる危険度評価について 6 例を示し考察した結果、船の長さを基準としたバンパーの大きさを仮定できれば、バンパーの前後の距離と横距離から、LOPC と PPC を基準とした真運動に基づく 2 船の関係から当該空間の危険度の評価が可能であることを示した。

次に、第3章で示した実海域での 140 パターンの行会いのケースの内、両船共に AIS を搭載している場合と両船共に AIS を搭載していない場合を任意に抽出し、5.1 節で提案した危険度評価手法を適用した解析結果を示した。

この結果、時間経過による進路・速力の変化や 2 船の全長が異なる実海域データのように、評価対象の設定・計算条件等に変化があったとしても、座標空間上に適切に LOPC 及び PPC 等が出力でき、また、危険度評価指標値である DREP と 2 船の全長から規格化した船の長さから、「危険でない」「危険」の判定が行えることが検証できたと考える。

一方、判定結果は評価に使用するバンパーの大きさにより変わるものである。どの程度のバンパーの大きさが評価のために適切であるかについては、本論では明確な議論はしておらず、今後の課題となっている。

しかしながら、バンパーの大きさをフレキシブルに変えることができるということは、評価対象とする海域の特性を踏まえた設定が可能であることを意味すること、また、AIS の搭載・非搭載による船舶ごとのバンパーの大きさの変更が可能であること、すなわち、船舶ごとの情報環境の差異をバンパーの大きさに反映して評価することが可能となることを示唆していると考えられる。

次章では、本章までの内容をもとに結論をまとめる。

第6章 結論

6.1 結論

本研究では、情報環境（AIS 利用環境）の異なる船舶が混在する船舶交通環境を前提とした危険度評価手法の開発を目的とし、来島海峡航路西口において観測されたレーダ観測データを基に次の検討を行った。

各章で得られた結果や知見は次のとおりである。

(1)第 2 章研究対象の整理

- 来島海峡航路の西口は、多種多様な船舶による複雑な交通流が形成され易いため、数多くの行き会いケースが得られる最適な研究フィールドである。
- 同水域において、AIS 搭載船は、474 隻中 223 隻（全体の 47%を占める割合）であり、500 総トン未満を中心とする 5 割以上の小型船舶が AIS を搭載していない。
- また、日本船籍の AIS 搭載船の動向について、平成 25 年 2 月から平成 29 年 12 月までの約 5 年間で 2 倍以上増加しているものの、プレジャーボート、漁船も含めると搭載率は約 3%と少ない状況にある。
- AIS は海難事故の軽減に大きく寄与しているものの、AIS 搭載船の動向や海難事故の発生状況を見る限り、レーダの重要性は変わらない。
- このため、AIS 搭載船と AIS 非搭載船の混在する（情報量に差異がある）状況による潜在的な危険の存在が危惧される。

(2)第 3 章解析手法及び解析結果

- 来島海峡における海上交通実態をもとに、「2 船の相対速力との関係により 4,000m 以内」かつ、「概ね 30 度以内で進路交差する」の 2 つの条件に基づき、行き会い関係にある航跡パターンを 140 ケース抽出した。
- この 140 ケースの行き会いパターンをもとに、進路交差する 2 船がお互いにバンパーを持ち、このバンパーが重ならないように操船者らが行動するという既往研究モデル（限界航過左右距離モデル・十分航過左右距離モデル・衝突危険度算定モデル）を前提に解析した結果、何れのモデルとも特徴的な関係は見出せなかった。
- この解析結果を船首航過距離と正横航過距離で体系化するため、正横航過距離 3L 未満、3L~6L、6L 以上の 3 つに分類し、進路交差角と船首航過距離との関係を図化するとともに、2 船の大きさ（全長を L）及び速力を同じとして、バンパーの大きさを 1L×4L、3L×8L 及び 6L×12L とした場合の理論値とを重ね合わせた結果、2 船が離れて航過する程、船首を横切る距離は大きくなるという一般的な傾向と一致する。
- AIS 搭載船同士の行き会いケースのほうが船首航過距離の平均値や標準偏差は小さい値を示す傾向がある。
- このことは、AIS 情報により他船の動静を把握し易いことが要因として考えられ、船舶交通環境のモデル化等について検討する場合は、情報環境（AIS 利用環境）の異なる船舶が混在する要素を考慮する必要がある。
- なお、それぞれの値の有意性については、t 検定により、正横航過距離及び AIS 搭載

有無の全ケースにおいて、有意水準 ($P<0.05$) を満足する結果が得られており、本データに有意性があることが確認できている。

(3)第 4 章衝突予測線を利用した評価手法の提案

- 前章で整理した解析結果をもとに近年、実海域における衝突危険度評価として研究が進んでいる航行妨害ゾーン (OZT : Obstacle Zone by Target) の基本的な理論に基づき衝突予測線 (LOPC : Line of Predicted Collision) を利用した評価手法の提案を行うため、LOPC や PPC の計算方法について概説した。
- LOPC については、2 船の位置と速力という 2 種類の情報が与えられると、当該海域には 2 船間の速力比 (N) に対応した LOPC が形成され、幾何学的にはこの LOPC 上でのみ衝突が起こることになる。
- また、PPC については、2 船それぞれの進路が与えられると、船の位置から進路方向に延長した直線と LOPC が交わる位置として得られる。
- 2 船の内、速力の速い船の場合、LOPC の状況によって PPC は 2 箇所、1 箇所及び存在しない場合がある。速力の遅い船では 1 個の PPC が存在する。
- 衝突の危険性を評価するためには、単に重なり「ある・なし」だけでなく、「同時刻性の確保」や両船の物理的な大きさや位置、進路及び速力等の条件を踏まえた「空間での評価」を行う必要がある。
- PPC を基準とした危険度評価指標 (DREP) を提案し、実空間の位置座標上に 2 船のバンパーの位置関係を表示する空間の評価が可能となる。
- DREP と最接近距離 (SD) とを比較した結果、速力比が 0.714 のケースでは両船の進路差が 44.4° 付近で DREP と SD の比が最大となり速力差が小さい (速力比が 1 に近づく) 程、DREP と SD の比が最大となる進路差は小さくなり、DREP と SD の比も大きくなる。
- このように、2 船の位置と速力の情報があれば 1 本の LOPC (その瞬間に衝突の可能性のある線) が得られ、この LOPC を基に、2 船のバンパーの大きさから衝突の危険度を判定する新たな評価方法を提案した。
- 本評価方法は、相対運動 (DCPA や TCPA) によらない真運動による評価方法である点も大きな特徴である。

(4)第 5 章バンパーモデルによる危険度評価

- 船の長さを基準としたバンパーの大きさを仮定できれば、バンパーの前後距離と横距離から、LOPC と PPC を基準とした真運動に基づく 2 船の関係をもとに当該空間の危険度の評価が可能である。
- 時間経過による進路・速力の変化や 2 船の全長が異なる実海域データのように、評価対象の設定・計算条件等に変化があったとしても、座標空間上に適切に LOPC 及び PPC 等が出力でき、また、危険度評価指標値である DREP と 2 船の全長から規格化した船の長さをもとに、「危険でない」「危険」の判定が行える。
- バンパーの大きさをフレキシブルに変えることができるということは、評価対象とす

る海域の特性を踏まえた設定が可能であることを意味する。

- AIS の搭載・非搭載によるバンパーの大きさの変更が可能であり、船舶ごとの情報環境の差異をバンパーの大きさに反映して評価することが可能となる。

以上示した各章で得られた結果や知見に基づき、2 船の位置と速力の情報から得られる衝突の可能性のある線 (LOPC) を基に、2 船の進路と LOPC の交点 (PPC) を基準とした危険度評価指標 (DREP) を提示し、2 船のバンパーの大きさから衝突の危険度を判定する新たな評価方法を提案した。これにより、実空間の位置座標上に 2 船のバンパーの位置関係を表示する空間の評価が可能となる。

本評価方法は、相対運動 (DCPA や TCPA) によらない真運動による評価方法である点も大きな特徴であると考ええる。

6.2 今後の課題

AIS の利用環境の違いにより、船首航過距離特性が異なることから、AIS 搭載の有無によりバンパーの大きさを変えることで、情報環境の異なる船舶が混在する要素を考慮可能と考える。

判定結果は評価に使用するバンパーの大きさにより変わるが、どの程度のバンパーの大きさが評価のために適切であるかについては、本論では明確な分析はしておらず、今後の課題となっている。

しかしながら、バンパーの大きさをフレキシブルに変えることができるということは、評価対象とする海域の特性を踏まえた設定が可能であることを意味すること、また、AIS の搭載・非搭載による船舶ごとのバンパーの大きさの変更が可能であること、すなわち、船舶ごとの情報環境の差異をバンパーの大きさに反映して評価することが可能となることを示唆していると考ええる。

今後、来島海峡西口や他海域などの実海域における船舶データを用いて、情報環境（AIS 利用環境）の異なる船舶が混在する要素を考慮のうえ、AIS 搭載船及び AIS 非搭載船のバンパーの違いを検討する必要がある。より実用的な評価方法の検討・提案については、今後の課題であり、分析精度を高め、評価モデル等の検証を行うと共に、モデルの深化を図る必要があると考えている。

参考文献

- [1] 国土交通省港湾局 監修：2019 年版 数字で見る港湾，公益社団法人 日本港湾協会，2019.07.
- [2] 国土交通省海事局：海事レポート 2018，引用日：2019 年 7 月 19 日，http://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk1_000072.html
- [3] 中国地方整備局（港湾空港部）：瀬戸内・海の路ネットワーク推進協議会，引用日：2019 年 08 月 25 日，<https://www.uminet.jp/know/detail.php?id=22>
- [4] 海上保安庁：海上保安統計年報，2008～2017.
- [5] 内閣府：国際海事機関（IMO）概要，2016 年 1 月 26 日，<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/imo/>
- [6] 国土交通省海事局 海上技術安全局安全基準課安全評価室：主要なタンカー油流出事故について，引用日：2019 年 7 月 19 日，http://www.mlit.go.jp/kaiji/seasafe/safety11_.html
- [7] 小瀬邦治・石谷清幹：海上交通システムの構成と安全，（編）海上交通システム研究会，山海堂，1992.
- [8] 公益財団法人 海難審判・船舶事故調査協会：過去の重大海難事故 平成後期（20 年～）時代，引用日：2019 年 8 月 23 日，<http://www.maia.or.jp/nenpyou/heiseikouki.html>
- [9] 海上保安庁：海上保安レポート 2018，引用日：2019 年 8 月 23 日，<https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/books/report2018/html/top.html>
- [10] 藤井弥平・巻島勉・原潔：海上交通工学，海文堂出版株式会社，1981.8.
- [11] 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，第 88 号，pp.137-144，1993.3.
- [12] 井上欣三・宇佐美茂・柴田登紀子：制限水域における航過距離と隔離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 巻，pp.297-306，1994.3.
- [13] 長澤明：海上交通工学研究会の歴史と展望，日本航海学会誌「NAVIGATION」，創立 50 周年記念特集号，pp.48-57，1998.12.
- [14] 公益社団法人 日本航海学会：日本航海学会研究会論文レビュー，日本航海学会，2002.
- [15] 喜多秀行：海上交通の現象記述モデル，日本航海学会誌「NAVIGATION」，第 129 号，pp.19-30，1996.9.
- [16] 藤井弥平・田中健一・渡辺建次・山田一成・関正美：船舶の閉塞領域について，日本航海学会誌，第 35 号，pp.71-76，1966.7.
- [17] 藤井弥平・黒崎悦明：海上交通管制の研究-II -避航領域と衝突危険度判定について-，日本航海学会論文集，第 55 号，pp.127-132，1976.8.
- [18] 杉崎昭生：海上交通シミュレーション，日本航海学会誌「航海」，第 48 号，pp.55-58，1976.2.
- [19] 杉崎昭生：ミクロ的海上交通流シミュレーション，日本航海学会誌「航海」，第 80 号，pp.14-19，1984.6.
- [20] 奥山育英：ネットワークシミュレーション，日本航海学会誌「航海」，第 80 号，pp.20-27，1984.6.

- [21] 長澤明：避航を考慮した海上交通流シミュレーション，日本航海学会誌「航海」，第 80 号，pp.28-34，1984.6.
- [22] 中村紳也：海上交通現象の予測・再現モデル，日本航海学会誌「NAVIGATION」，第 129 号，pp.31-40，1996.9.
- [23] 長澤明：海上交通環境評価指標の開発，日本航海学会誌「NAVIGATION」，第 129 号，pp.41-51，1996.9.
- [24] 日本航海学会：日本航海学会論文集，日本航海学会（J-STAGE）.
- [25] 福井淡 原著・浅木健司：図解 海上交通安全法（新訂 15 版），海文堂，2018.4.
- [26] 来島海峡海上交通センター・今治海上保安部：来島海峡マリンガイド，来島海峡海上交通センター・今治海上保安部，2016.
- [27] 海上保安庁：書誌第 103 号 瀬戸内海水路誌（瀬戸内海・豊後水道），一般財団法人日本水路協会，2013.03.
- [28] 水井真治・山田多津人・月坂明広・中川義教：小型 FRP 船レーダ映像の 2 次元分布の解析，日本航海学会論文集，第 124 号，pp.71-77，2011.3.
- [29] TatsutoYAMADA・ShinjiMIZUI・AkihiroTSUKISAKA・KoujiSEIDA：Signal Analysis of Radar Echoes from the Small FRP Boat，Asia Navigation Conference 2012，第 11 回，2012.11.
- [30] TatsutoYAMADA・ShinjiMIZUI・AkihiroTSUKISAKA・YoshinoriNAKAGAWA：Echo Point Characteristics of the Small FRP Boat on the Radar Screen，Asia Navigation Conference 2013，第 12 回，2013.10.
- [31] 総務省：情報通信統計データベース，引用日：2019 年 8 月 30 日，<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/index.html>
- [32] 日本小型船舶登録機構：年度末における在籍船，日本小型船舶登録機構，2013～2017.
- [33] 農林水産省：2013 年漁業センサス，農林水産省，2014.
- [34] 公益財団法人海上保安協会：東京湾の安全な航行環境の構築に向けて，日本財団，2017.
- [35] 港湾事業評価手法に関する研究委員会編：港湾投資の評価に関する解説書 2011，一般財団法人 みなと総合研究財団，p.2-16-29，2011.7.
- [36] 山田多津人・長澤明・西野朝生：横切り状態における船舶間の相対位置の解析，日本航海学会論文集，第 103 号，pp.77-83，2000.9.
- [37] 山田多津人・長澤明・西野朝生：船舶間の相対位置の解析，日本航海学会論文集，第 101 号，pp.29-36，1999.9.
- [38] 今津隼馬：衝突予測線と衝突危険，日本航海学会誌「NAVIGATION」，第 186 号，pp.41-44，2013.10.
- [39] 今津隼馬：避航は真運動で，日本船長協会誌「船長」，第 134 号，pp.7-27，2017.3.
- [40] 月坂明広・水井真治・庄司るり・山田多津人：船舶交通環境の新たな危険度評価に関する基礎的研究-I，日本航海学会論文集，第 133 巻，pp.43-49，2015.12.
- [41] 月坂明広・庄司るり・山田多津人・水井真治：船舶交通環境の新たな危険度評価に関する基礎的研究-II，日本航海学会論文集，第 136 巻，pp.65-71，2017.7.

- [42] 月坂明広・山田多津人・庄司るり・水井真治：船舶交通環境の新たな危険度評価に関する基礎的研究-Ⅲ., 日本航海学会論文集, 第 138 巻, pp.20-26, 2018.7.
- [43] TatsutoYAMADA・RuriSHOJI・ShinjiMIZUI・AkihiroTSUKISAKA : Collision Risk Evaluation and Ship Handling for Avoidance based on the LOPC and the Bumper Model, Asia Navigation Conference 2018, 第 17 回, 2018.11.
- [44] AkihiroTSUKISAKA・TatsutoYAMADA・RuriSHOJI・ShinjiMIZUI : A study on a new risk assessment of ship traffic environment, International Association of Institute of Navigation, 第 16 回, 2018.11.

謝辞

論文博士取得への希望を快諾いただき、5年の長きにわたり懇切丁寧かつ的確なご助言やご指導を賜るとともに論文審査の主査を務めていただきました東京海洋大学副学長兼大学院応用環境システム学専攻教授 庄司るり先生、並びに、論文審査に際して副査を務めていただきました同学専攻教授稲石正明先生、同学専攻教授久保信明先生、同学専攻准教授田丸人意先生には、謹んで深甚なる謝意を表します。

また、本論文をまとめるにあたり、5年の長きにわたり懇切丁寧かつ的確なご助言やご指導を賜りました広島商船高等専門学校教授 水井真治先生、並びに、海上保安大学校教授 山田多津人先生におかれましては、論文とりまとめ以前の10年以上前から航海用レーダに関する共同研究や海上交通実態調査、各種の航行安全対策検討委員会など、さまざまな場面でご指導をいただきましたこと、謹んで深甚なる謝意を表します。

特に、水井先生には、論文博士取得に向けた活動途中に何度も諦めかけた学会発表や査読付き論文投稿に際して、技術面だけでなく精神面も含めてきめ細やかなアドバイスをいただくなど、トータルサポートいただきましたこと、深く感謝申し上げます。また、山田先生には、海上交通工学に関する専門的な視点からの的確なアドバイスをいただくとともに、技術的な相談にも迅速かつ的確な助言をいただきましたこと、深く感謝申し上げます。

会社関係に関しては、博士論文審査申請の承認をいただきました中電技術コンサルタント株式会社坪井俊郎代表取締役社長を始め、保科公伯常務取締役、金本満常務取締役ほか幹部の方々には心からお礼申し上げます。また、学位取得を勧めていただいた当時の上司の中本裕之氏（現、臨海都市研究所 代表取締役）、その承認をいただき貴重な機会を与えていただいた当時の中電技術コンサルタント株式会社幹部、末國光彦取締役社長（現、相談役）、林喜代文常務取締役（現、中国工務株式会社 顧問）、河野清常務取締役（現、顧問）、下村三朗取締役（現、株式会社 E-SYSTEM 技術本部長付専門部長）、さらには、それぞれの後任で温かく見守り励まし続けていただいた周藤浩司取締役企画本部長、石田滋樹取締役交通・都市本部長、三宅健一事業企画部長、入社以来海事業務の礎を築きご指導ご支援を賜った小笠原弘典氏（現、新開発コンサルタント株式会社 顧問）、住岡宣博氏（元、株式会社土木技術コンサルタント 代表取締役社長）、金子保専門役、藤原哲宏氏（現、中国地下工業株式会社 代表取締役）、上田昭彦照査専門役、梶谷茂専門役その他会社関係の皆様には、大変感謝しております。

また、学位論文執筆活動にあたり、側面的に支援いただいた先輩・同僚の方々、そのほか書面には書ききれないほど多くの方々のお陰によりここまで来られたことに対して、改めて感謝申し上げます。

最後に、これまで温かい目で見守り支えてくれた家族（妻里恵、息子優太・健人）に深い感謝の意を表して謝辞といたします。

令和元年9月吉日