

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船舶の運航支援に関する研究：
情報提供システムと海上交通リスクの検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-06-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 北澤, 文香 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1448

博士学位論文

船舶の運航支援に関する研究
—情報提供システムと海上交通リスクの検討—

平成 28 年度

(2017 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

北澤 文香

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	先行研究について	2
1.3	研究目的について	5
1.4	論文の構成	6
第 2 章	船舶に必要な支援の提案	7
2.1	必要な運航支援システム	7
2.2	船陸間通信について	8
2.3	無線 LAN システム構築による漁船の位置情報取得の可能性	10
2.4	船舶の航行海域ごとに必要な支援について	13
2.5	情報提供を行なう表示機器の検討	14
第 3 章	ヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援	16
3.1	ヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援の目的	16
3.2	ヘッドマウントディスプレイとは	17
3.2.1	ヘッドマウントディスプレイについて	17
3.2.2	使用したヘッドマウントディスプレイ	19
3.3	AR と VR について	21
3.4	AR の作業効率に与える影響	22
3.4.1	AR の作業効率に関する実験	22
3.4.2	AR の作業効率に関する実験の結果	22
3.5	表示するデータの検討	23
3.5.1	使用したデータ	23
3.5.2	ヘッドマウントディスプレイの表示画面と装着者の視野	25
3.6	表示画面の作成	27
3.6.1	表示情報の検討	27
3.6.2	表示画面の配色	30
3.6.3	情報の表示方法	31
3.6.4	作成した表示画面	32
3.7	実海域における実験	35
3.7.1	実海域実験の目的	35
3.7.2	実験状況	35
3.8	実験方法	36
3.8.1	ヘッドマウントディスプレイの情報の受信と表示情報の確認	36
3.8.2	画面の視認性の実験	37

3.9	実験結果	38
3.9.1	ヘッドマウントディスプレイの情報の受信と表示情報の確認	38
3.9.2	画面の視認性の実験評価結果	39
3.10	視認性向上のためのシステム改良と再評価	40
3.11	実海域実験の考察と今後の課題	42
3.12	第3章のまとめ	43
第4章	IWRAP を用いた各海域の潜在的リスクの検討	44
4.1	IWRAP を用いた各海域の潜在的リスクの検討の目的	44
4.2	IWRAP の開発の目的と経緯	45
4.3	IWRAP の機能	46
4.4	IWRAP の理論	48
4.4.1	IWRAP の理論の背景	48
4.4.2	理論の概要	48
4.5	Pc の値について	49
4.5.1	Pc 値の計算と使用値	49
4.5.2	Pc の値の検証	50
4.6	Ng の値について	52
4.6.1	IWRAP での見合い関係の定義	52
4.6.2	正面衝突の Ng の値	52
4.6.3	追い越し衝突の Ng の値	54
4.6.4	交差衝突の Ng の値	55
4.6.5	屈曲部衝突の Ng の値	56
4.6.6	合流衝突の Ng の値	57
4.7	IWRAP に必要なデータ量の検討	58
4.7.1	検討した海域(東京湾)について	58
4.7.2	IWRAP 内でのデータの取り扱いと解析目的	60
4.7.3	解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスク値の変化	61
4.7.4	解析対象日数に対する航路筋におけるリスクの変化	63
4.7.5	IWRAP に必要なデータ量の検討のまとめ	66
4.8	東日本大震災におけるリスク計算	67
4.8.1	東日本大震災の概要と解析目的	67
4.8.2	東京湾における東日本大震災	67
4.8.3	船種別の交通流比較	68
4.8.4	震災時におけるリスク変化	71
4.8.5	震災時のリスク評価のまとめ	72
4.9	台風襲来時の船舶のリスク計算	73
4.9.1	台風とは	73
4.9.2	台風時の船舶への影響と目的	73

4.9.3	解析する台風を選択	74
4.9.4	2011年の台風襲来時の交通流の変化	75
4.9.5	2011年の台風襲来時のリスクの変化	77
4.9.6	2014年の台風襲来時の交通流の変化	80
4.9.7	2014年の台風襲来時のリスクの変化	84
4.9.8	台風襲来時のリスク評価のまとめ	88
4.10	整流の有効性の評価(バーチャルAISの有効性の評価)	89
4.10.1	バーチャルAIS航路標識とは	89
4.10.2	解析する海域①(友ヶ島水道(由良瀬戸))	90
4.10.3	解析する海域②(明石海峡航路)	91
4.10.4	友ヶ島水道の解析結果①(交通流の変化)	92
4.10.5	友ヶ島水道の解析結果②(リスクの変化)	94
4.10.6	明石海峡航路の解析結果①(交通流の変化)	97
4.10.7	明石海峡航路の解析結果②(リスクの変化)	98
4.10.8	バーチャルAISの有効性に関するアンケート	99
4.10.9	整流の有効性の評価のまとめ	101
4.11	第4章のまとめ	102

第5章 モニタリングデータの有効活用について 103

5.1	モニタリングデータの有効活用の目的	103
5.2	モニタリングデータの対水速力の欠損部分の補完方法の検討と適用結果	105
5.2.1	解析対象船舶の対水速力データの異常	105
5.2.2	対水速力推定法の条件	107
5.2.3	スリップ比について	108
5.2.4	対水速力推定法の検討①風浪中航行推進性能方程式による方法	109
5.2.5	対水速力推定法の検討②計測データとプロペラ推定特性による方法	110
5.2.6	対水速力推定法の検討③海流予測値による方法	112
5.2.7	対水速力推定法の検討④計測データから設定したプロペラ荷重度と前進率の関係式を用いる方法(合理化案-1)	113
5.2.8	対水速力推定法の検討⑤計測データから設定したプロペラ荷重度と前進率の関係式を用いる方法(合理化案-2)	116
5.2.9	推定法を適用した結果	118
5.2.10	対水速力推定法のまとめ	120
5.3	モニタリングデータの異常値の取り扱いについて	121
5.3.1	モニタリングデータのクリーニングについて	121
5.3.2	モニタリングデータの状態	122
5.3.3	正規確率プロットを用いたスリップ比の状態の検証	123
5.3.4	3つのデータ範囲での正規確率プロットの結果	125
5.3.5	モニタリングデータの異常値の取り扱いについてのまとめ	128

5.4 第5章のまとめ	129
第6章 結論	130
6.1 論文の結論	130
6.2 今後の課題	132
謝辞	133
Appendix.1 5GHz 帯無線アクセスシステムの有効性	134
1.1 無線 LAN と使用する帯域についてと有効性について	134
1.2 5GHz 帯の使用に関する実証実験について	136
1.3 5GHz 帯の使用に関する実証実験結果	139
1.3.1 東京海上交通センターを基地局とした場合	139
1.3.2 金谷フェリーセンターを基地局とした場合	140
1.3.3 金谷フェリーセンターを基地局とのマルチホップ通信	141
1.4 課題に対する対策と有効性	142
Appendix.2 IWARP を用いたスリランカの解析結果	143
2.1 Dondra のデータ範囲と交通流の状態	143
2.2 Dondra の船種と船長の棒グラフ	146
2.3 Dondra の船種ごとの解析 General cargo ship について	148
2.4 Dondra のリスク解析の結果	149
2.5 Galle のデータ範囲と交通流の状態	151
2.6 Galle の船種と船長の棒グラフ	153
2.7 Galle の船種ごとの解析 General cargo ship について	155
2.8 Galle のリスク解析の結果	155
2.9 Galle のリスクの高いエリアについて	157
2.10 バーチャル AIS の設置場所について	159
Appendix.3 解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスク	160
参考文献	162

第1章 はじめに

1.1 研究背景

従来の運航スタイルは、陸の船舶管理部門と海上の船舶が個々に問題に対処してきた。しかし、近年海難事故による金銭的損失が国際競争力の低下に直結することや二酸化炭素削減など環境に配慮した運航が求められるようになったため、陸上の会社から船舶の動向をチェックし、より効率のよい運航を目指そうという動きがでてきている。

また、乗船期間の短縮や多国籍船員との向上により、船員ひとりひとりの技術にばらつきがみられるようになり、「フルプルーフ」に基づいた安全対策を入れたシステムが求められている。

海難は、安全が損なわれることによって起こる。安全の向上のため、航海計器の開発、搭載、ヒューマンエラーに基づくトレーニングの実施、および海上の様々なリスクに関する解析が続けられているが、必ずしも海難の減少にはいたっていない。

また、外航船舶に乗船する乗組員の数は、1977年から進められた近代船プロジェクトにより、約22～23名から現在約11名となった。技術の進歩による変化である一方、1人1人の業務量が増えたことは想像に難しくない。

このような背景から、乗組員の負担を増やすことなく、海難を減らし安全運航を実現することへの重要性が高まっているといえる。

1.2 先行研究について

船舶への運航支援に関する先行論文は、支援装置の提案と支援システムの提案に分けることができる。支援装置の提案では、疋田ら⁽¹⁾のレーダ画面を船橋前方に重ね合わせる目視認識支援装置がある。この研究では、レーダ情報と AIS 情報を運航者の目視した船舶にヘッドアップディスプレイ(HUD: Head Up Display)に重畳表示している。支援システムの提案では、小野⁽²⁾の内航海運における船舶管理高度化の事例や、中野⁽³⁾の運航支援システム、庄司⁽⁴⁾の先端ナビゲートシステムと情報の活用についてがある。小野は、自身の所属する会社で導入したシステムが、対外的には、トラブルの迅速対応による信頼の向上につながったことや、船舶管理担当者のスキルアップに効果があったと述べている。中野は、運航支援システムの定義を述べるとともに、目的、効果、技術動向などについて包括的に述べている。庄司は、東京海洋大学で進められた海洋ブロードバンドシステムと、先端ナビゲートシステムを通しての船舶運航における情報活用について述べている。運航支援に関する先行研究⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾では、通信の発達や情報共有、情報提供の重要性を一貫して述べている。本論文では、陸上の船舶管理やモニタリングではなく運航者へ離岸から着岸までの各航行海域ごとに支援を行うシステムを提案する。

本論文で支援装置として用いるヘッドマウントディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)を用いた支援としては、市川⁽⁵⁾のウェアラブル端末を活用した救急救命システムがある。市川のシステムは、ヘッドマウントディスプレイを装着した現場の通報者に対し、救急隊員が、画像で状況を把握するとともに、ヘッドマウントディスプレイ上に画像を表示し、音声でも指示を送るというものである。ヘッドマウントディスプレイを用いることで、心肺停止時に既存の音声のみの通信より、効果が高かったと述べている。また、ヘッドマウントディスプレイと同じく現実世界に情報を重畳表示するヘッドアップディスプレイを用いた研究に、高田ら⁽⁶⁾の HUD とジェスチャ操作の組み合わせによる運転中の機器操作ディストラクションの低減、中村ら⁽⁷⁾のヘッドアップ型情報提示装置を用いた、初心運転者のための合流支援システムがある。高田らは、ヘッドアップディスプレイに情報を表示するとともに、ジェスチャによる操作を行うことで、運転中に集中力が削がれ気が散るディストラクションを低減できると述べている。中村らは、事故の起こりやすい合流地点において、画像センサーによる位置検知による合流が可能であるかの判断を車に搭載したヘッドアップディスプレイに表示させた。このシステムを利用したことで安定して合流できるようになったとの結果を得ている。ヘッドマウントディスプレイやヘッドアップディスプレイを用いた先行研究⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾は、各論文とも課題はあるものの、情報表示装置として優れた点が多く見られ、装置利用の可能性を感じさせる。本論文では、装着による効果が実証されているヘッドマウントディスプレイを用いて、見張り支援を行う。

船舶の衝突と衝突回避について海上交通工学の分野において、以前より広く研究が行われてきた。有村ら⁽⁸⁾の衝突予防援助装置の安全性の評価に関する考察、中村ら⁽⁹⁾の船舶航行の安全性評価、日當ら⁽¹⁰⁾の閉塞された水路の航行危険度の評価尺度に関する研究、三宅⁽¹¹⁾らの AIS 記録データに基づく避航操船手法の解析、福戸⁽¹²⁾らの相手船による妨害ゾーン(OZT)を用いた衝突警報の検討、篠田⁽¹³⁾らのベイジアンネットワークを適用した漁船と

大型船の衝突海難のリスク解析に関する研究がある。有村らは、航行海域における衝突の潜在的危険を解析し、画像表示と危険な船舶の接近を音声で伝達する研究を行っている。この研究における潜在的危険は、閉塞領域の概念を活用した評価指標モデルを用い、実船の調査から考察し、有効と述べている。中村らは、明確な定義はない「嫌な見合い関係」を考慮した避航操船の負担を定量的に表す評価モデルの提案を行っている。北米から極東間で評価実験を行い、2 船間の見合い角度と速力差が負担に影響を及ぼすと述べている。日當らは、操船シミュレーターを用いて、閉塞された水路の通航シミュレーションを実施し、危険度・安全性評価に関する評価尺度の抽出を試みている。その結果、舵角による評価が良いとの知見を得ている。三宅らは、実際の運航に合致した避航操船アルゴリズムを開発することを目的に、AIS データから 2 船の船体位置や船首方位、相対運動などの情報を解析することで、避航操船の特徴の抽出を行った。福戸らは、衝突警報装置の使用状況の現状を踏まえ、OZT を用いた警報装置の概念の提案を行っている。OZT は、自船の変針に対して、相手船に妨害され航行することのできない海域を相手船の予定針路上に示したものである。AIS データを用いて OZT は算出されている。篠田らは、IMO で承認された FSA(Formal Safety Assessment)に関するガイドラインに沿って漁船と大型船の衝突事故のリスク評価を行っている。この研究は、発生した衝突事故のデータベースをもとにリスクが評価されている。船舶の衝突と衝突回避に関する先行研究^{(8)~(12)}では、2 船間の見合い関係の解消や衝突回避について述べられている。篠田⁽¹³⁾らの研究においても事故データのデータベースなしには、リスクを評価することができない。本論文では、2 船間ではなく、海域全体のリスクを把握するために AIS データを使用することができ、IALA の認めた国際基準のリスク評価ツールである IWRAP を用いてリスクを評価することにした。

環境に配慮した運航に関する先行論文として、西山ら⁽¹⁴⁾のウェザールーティングシステムの構築に関する研究-II. -船載型モニタリングシステムデータの活用-、辻本ら⁽¹⁵⁾の船舶の実海域性能計算法、笹ら⁽¹⁶⁾の実海域における荒天航海時の貨物船の運動性能について-オンボードデータによる運動および波浪特性の分析・推定-、安藤⁽¹⁷⁾の船舶運航におけるビッグデータの活用-燃費削減におけるケーススタディ-、Class NK⁽¹⁸⁾がソフトウェア会社の NAPA 社と共同で開発した「Class NK-NAPA GREEN」がサービスの提供を行っている。西山らは、コンテナ船に搭載した「船載型モニタリングシステム」により収集したデータの分析を行うことで、実海域中の航海性能の推定と、燃料削減につながるウェザールーティングの検討を行っている。辻本らは、実海域で優れた性能を持つ船舶の供給のため、設計段階で使用することができる客観的かつ統一的な実海域性能の評価指標の構築をめざし、ハイブリット計算法を開発し、SPICA というプログラムに搭載した。笹らは、国際航海に従事するバラ積み貨物船に各計測センサを搭載し、データを収集し、波浪特性の分析と推定を行っている。安藤は、コンテナ船の燃費削減のためのシステムの導入と収集したビッグデータの解析方法や解析結果のフィードバック、将来的な技術の連携まで幅広く述べている。Class NK は、運航モニタリング技術とビッグデータ解析技術、自己学習機能まで搭載した「Class NK-NAPA GREEN」によるサービスの提供を行っている。このサービスは、計画、モニタリング、フォローアップの三段階に分かれており、フォローアップで得た解析結果を次の航海の航海に活かすシステムとなっている。先行研究^{(14)~(18)}では、

環境に配慮した運航について述べているが、計測したデータの容量や解析に使用することができるデータ数などは明らかにされていない。本論文では、モニタリングデータの実態を明らかにするとともに、データの補完や解析データを得るためのクリーニングの手法の検討を行う。

1.3 研究目的について

本論文の研究目的は、船舶の運航の各段階における具体的な支援に関する検討を行うことである。船舶の運航の各段階とは、離岸し目的港に着岸するまでの一連の流れを指す。

離岸、着岸、出港、入港では、運航者は、多くの情報が必要になる上にタスクも多い。そのため、船内で手軽に情報収集を行い、収集した情報を利用するためには効率よく情報を集約、蓄積をし、発信することができるシステムが必要になる。このシステムを利用することで、運航者の行うタスクの負担を軽減することができると考えた。情報を運航者の作業負担を増やすことなく提供できる機器としてウェアラブル端末に着目した。本論文では、ウェアラブル端末の1つであるヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display)を用いた航海支援を行う。

目的地へ向かう航海中、多くの船舶は輻輳海域を航行する。図 1-1⁽¹⁹⁾に過去 5 年間の衝突事故の推移を示す。縦軸に隻数、横軸に年を示す。図 1-1 に示すように、船舶間の衝突事故は、2013 年から 2016 年は、減少傾向にあるが、ほぼ 600 隻台であり、横ばい状態が続いている。衝突事故の減少のためには、あらかじめ船舶が航行する予定の海域について分かっている情報を提供することが有効であると考ええる。航行予定海域の情報を事前に知ることによって、見張りを行う人員の増員のタイミングの検討を行うこともでき、安全運航につながると考える。船舶は、世界中を航海するため、世界共通の指標で海域のリスクを評価することが必要と考える。世界共通の指標で海域のリスクを評価するために、国際的なリスク評価ソフトを用いて評価を行う。

目的地へ向かう航海中、1.1 節で述べたように、船舶の運航が環境へ与える負荷の低減が求められている。そのため、船の運航状態を解析するためのモニタリングデータの収集と解析が行われるようになってきた。しかし、収集したデータから解析を行うデータの抽出する際に生じる解析に用いることのできないデータをどのように扱うかの検証は行われていない。本論文では、解析目的に対応したモニタリングデータの補完とクリーニング手法の検討を行う。

以上に示した船舶の運航の各段階における具体的な支援に必要な研究を本論文では行う。

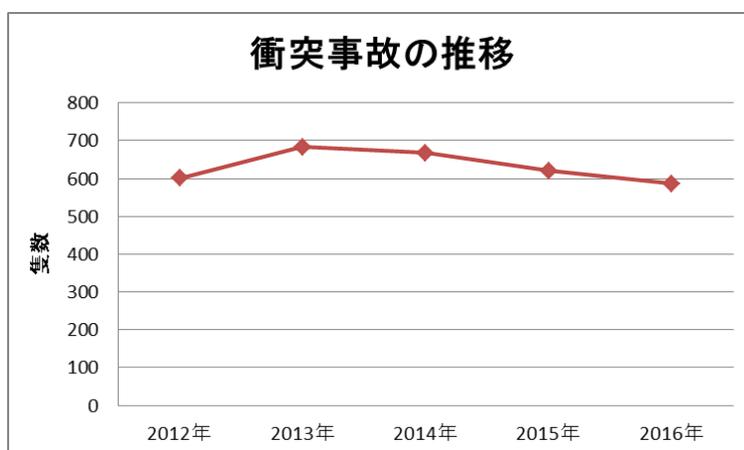


図 1-1 5 年間の衝突事故の推移

1.4 論文の構成

本論文の構成は、以下のようになっている。

第1章では、この研究の背景と概要について述べる。

第2章では、船舶に対して航行海域に応じた情報支援を提供するための支援システムの提案を行う。そして、提供する情報の整理を行い、情報の表示装置の検討を行う。

第3章では、情報の共有、発信が容易になった際、情報をどのような端末で表示するのがよいのかを検討する第一歩として、ヘッドマウントディスプレイを用いた情報提供システムの提案を行う。ヘッドマウントディスプレイは、ハンズフリーで操船者の視野を阻害しないことから、安全運航に欠かすことのできない見張りを妨げず情報を提供できる可能性がある端末である。

第4章では、輻輳海域において海域のリスクの事前提供を行なうために、国際的なリスク評価ソフトである IWRAP を用いて海域のリスク評価を行った結果を述べる。IWRAP で使用されている理論、解析に必要なデータ量の検証、東日本大震災および台風襲来時におけるリスク評価、整流の有効性の評価、スリランカ沖の船舶のリスク評価について解析を行う。

第5章では、大洋航行中は環境に配慮した運航が求められることから、最適航海の実現のために、個々のモニタリングデータを収集する必要がある。収集されたデータを有効に活用し、船舶の運航実態を明らかにするために、データに含まれる欠損データの補完方法の検討やクリーニング方法の提案を行う。

第6章では全体を総括するとともに、今後の課題について述べる。

なお、Appendix において、本論文の研究と直接的な関連はないものの、参考となる重要な 5GHz 帯無線アクセスシステムと IWRAP を用いたスリランカの解析例および、4.7 節の捕捉資料である解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスクを示す。

第2章 船舶に必要な支援の提案

2.1 必要な運航支援システム

安全運航を実現するために必要と考える運航システムについて、卒業論文⁽¹⁾、修士論文⁽²⁾と研究を行なった。

卒業論文では、船舶の安全運航には、乗組員全員が操船情報や船内外の状況等の情報を「いつでも、どこでも、素早く」共有することは有効と考え、携帯可能な情報機器を利用したユビキタスな航海支援インフラストラクチャの構築のために、アンドロイド端末を利用した航海支援システムを提案した。

修士論文では、これからの船舶の運航に求められるのは、安全、効率の良さ、環境への配慮であると考え、船内の情報共有と陸からの支援が必要と考え、情報の整理と活用例の作成を行った。

図 2-1 に必要と考える運航システムについての概念図を示す。卒業論文と修士論文での成果より、船内では情報共有を行い、船内で収集したデータを陸上に送り、陸上から適切な情報提供を行なう運航支援システムが必要と考える。

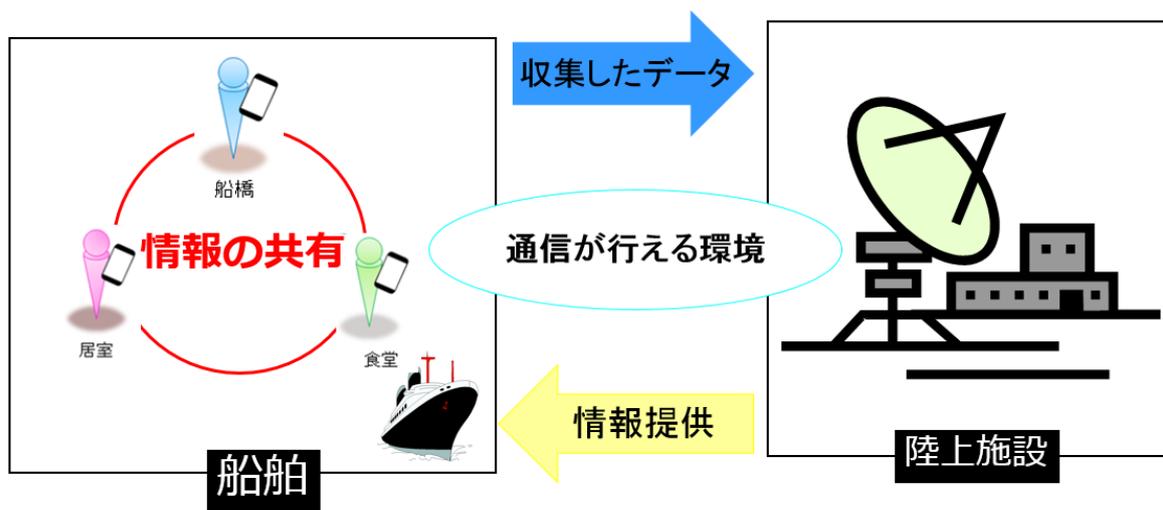


図 2-1 必要な運航システム

2.2 船陸間通信について

陸上から支援を行なう際、船陸間通信がスムーズに行なえる環境が必要となる。船陸間通信は、モールス信号や通話(音声通話)などの無線通信から音声通信、データ通信(Telex、FAX、メール、インターネット)を扱える衛星通信へと変化し、通信によって送信、取得できる情報量が増えてきた。

また、陸上と海上の船舶の通信に関しては、大洋航海では海洋ブロードバンドシステムが実用化されている。沿岸航海や湾内では、5GHz帯無線アクセスシステムなどが提案されている。本論文では、5GHz帯無線アクセスシステムを利用した日本沿岸無線LANシステムを提案する。図2-2に無線LANエリアの構成図を示す。このシステムは、沿岸に設置されている既存の灯台を基地局として活用し、無線LANエリアを構築するものである。利点としては、輻輳海域が集中する湾内や沿岸域において無線LANエリアの構築により、リアルタイム情報取得ができることがあげられる。この無線LANエリアを漁船にも活用してもらい、位置情報の提供につなげる可能性について2.3節で述べる。5GHz帯無線アクセスシステムの有効性については、Appendix.1にて述べる。

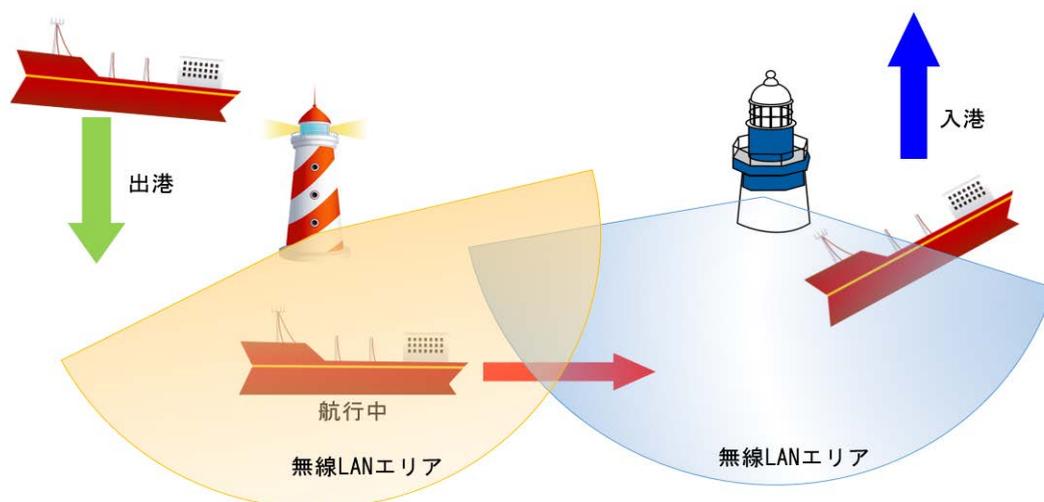


図 2-2 無線 LAN エリアの構成図

現在、海上での使われているデータ通信の最大通信速度と通信料金を表2-1に示す。表2-1は、国土交通省の発表資料⁽³⁾である。陸上で使われているデータ通信速度は、メールや小さな画像のHP(ホームページ)の表示で1Mbps~10Mbps、インターネットの動画やオンラインゲームで10Mbps~30Mbps、高画質動画やオンラインゲームで30Mbps~50Mbpsとなっている。それらを楽しむ通信として、携帯電話の3Gの通信速度は、受信が3.6Mbps、送信が384kbps、スマートフォンの4Gでは、受信が165Mbps、送信が10Mbpsとなっている。

このことを踏まえて、表中最大速度のGlobal Xpressを見てみると、3Gのデータ速度

に船から陸、陸から船とも到達していることが分かる。このことから、陸上の通信環境により近づいていることが分かる。

表 2-1 船陸間通信の最大通信速度と通信料金

		インマルサット F77	インマルサット FBB	VSAT(ku)	Global Xpress
通信速度(最大)	陸→船	64kbps	432kbps	1Mbps	50Mbps
	船→陸	64kbps	432kbps	512kbps	5Mbps
通信料金	課金方法	従量	従量	定額	定額
	値段	8円/10kbit	7万円 +3400円/MB	45万円/月	36万円/月

本論文では、陸上と海上がスムーズに通信が行える環境に将来的になることを前提に、船舶の航行海域ごとに必要な支援を検討し、必要な情報提供のための研究を行った。

2.3 無線 LAN システム構築による漁船の位置情報取得の可能性

漁船は、自船の位置情報を提供するのに抵抗のある船舶が多い。一方で、陸上生活においてルート案内や周辺の情報を得るために位置情報を提供することに抵抗のある人は少ない。平成 27 年に総務省が実施した通信利用動向調査結果を用いて漁船の位置情報取得の可能性について述べる。

図 2-3⁽⁴⁾に、年齢階層別インターネットの利用状況を示す。図 2-3 は、縦軸に割合をパーセンテージで示し、横軸に年齢層を示している。図 2-3 より、インターネット利用者は 13～59 歳で 9 割を超えており、全体で 83%となっている。図 2-4⁽⁴⁾は、インターネットをどの端末で閲覧、利用する場合にパソコン、スマートフォン、家庭用ゲーム機、携帯電話、タブレット型端末のどれを利用するかを複数回答でまとめた図である。図 2-4 は、縦軸に割合をパーセンテージで示し、横軸に年齢層を示している。図 2-4 より、インターネットの利用に 20～29 歳では 91.3%、30～39 歳では 84.6%、40～49 歳では 73.6%がスマートフォンを利用していると回答していることから、スマートフォンの普及が進んでいることが分かる。

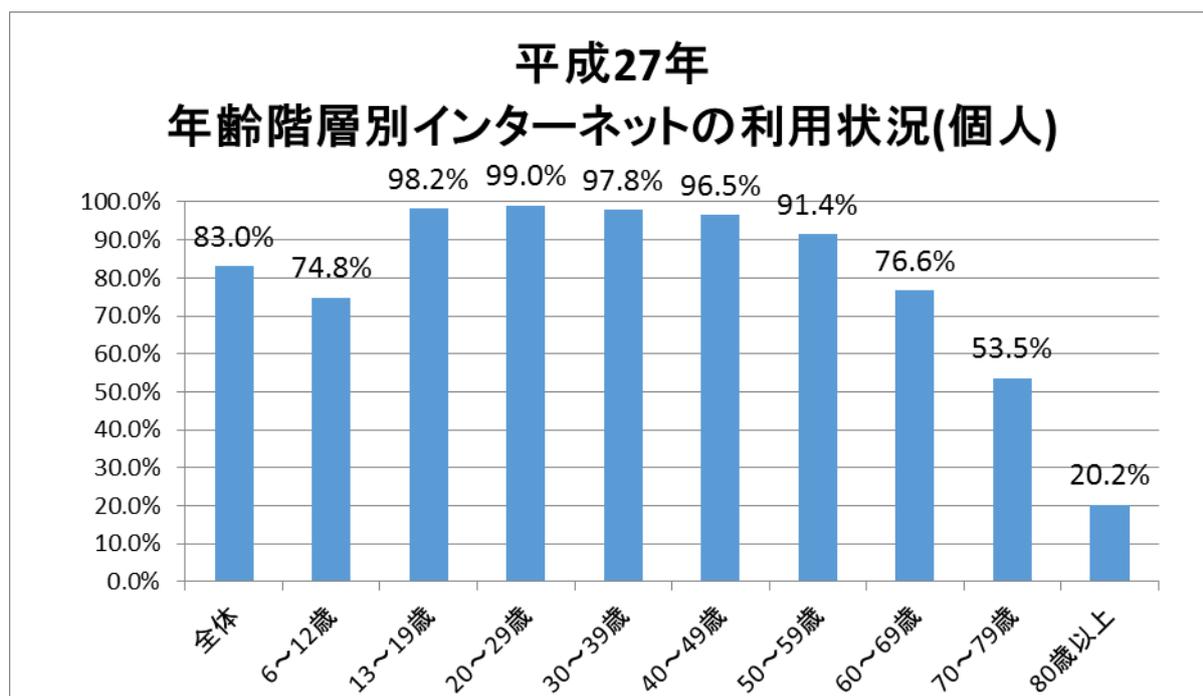


図 2-3 平成 27 年末年齢層別インターネットの利用状況(個人)

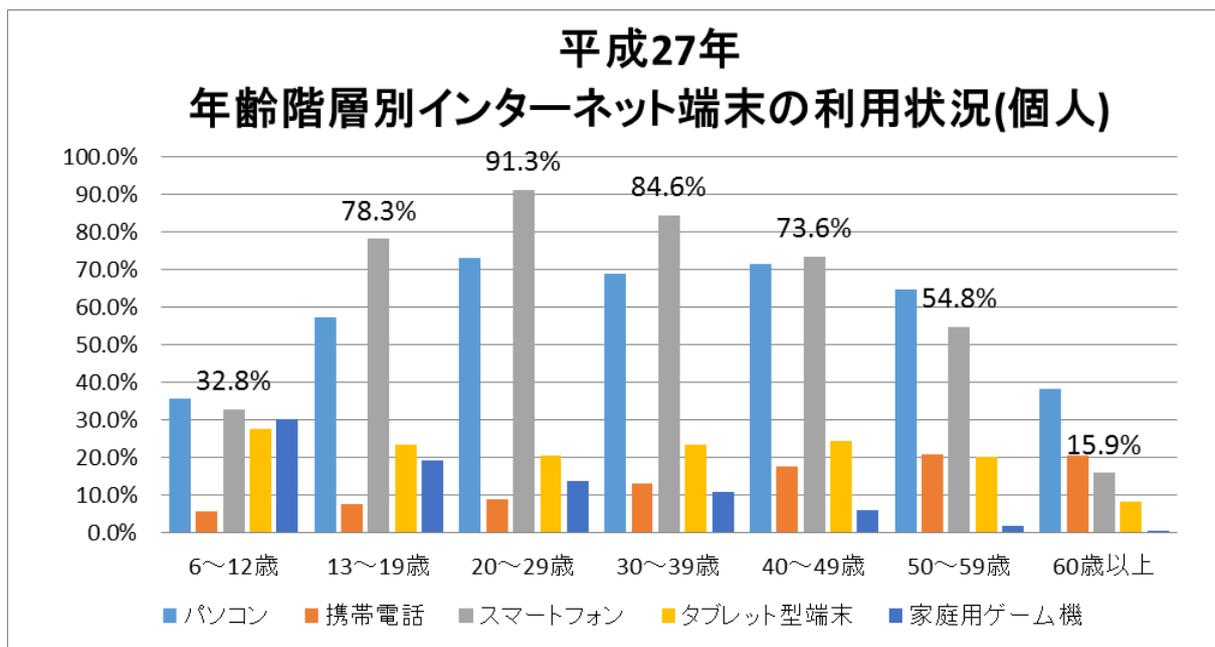


図 2-4 平成 27 年末年齢層別インターネット端末の利用状況(個人)

表 2-2⁽⁵⁾は、農林水産省が平成 27 年 11 月に発表した漁業就業動向調査の年齢層別漁業就業者数と就業者数を割合(%)で示した表である。表 2-2 より、スマートフォン利用者が少ない 50 歳以上の世代が 68.1%を占める一方で、スマートフォン利用者が 7 割を超える 50 歳未満の世代が 31.9%となっている。

将来的に、スマートフォンの利用が日常的な世代が多くなった時、漁船同士での正確な位置情報の提供をしないことを条件とすれば、位置情報の提供と引き換えに、海上でのインターネット利用ができることは魅力的になるのではないかと考える。また、漁船同士互いの正確な位置を知ることには抵抗はあっても、大型船や陸上の航行支援施設が知ることには抵抗が少ないと考える。そのため、海上での無線 LAN の使用と引き換えに、位置情報を提供してもらうシステムは実現可能性が高いと考える。

表 2-2 年齢層別漁業就業者数(%)

	就業人数	割合(%)
15～19歳	1,630	1.0
20～24歳	4,540	2.7
25～29歳	6,210	3.7
30～34歳	8,090	4.9
35～39歳	9,520	5.7
40～44歳	10,690	6.4
45～49歳	12,500	7.5
50～54歳	14,210	8.5
55～59歳	17,770	10.7
60～64歳	21,040	12.6
65～69歳	22,510	13.5
70～74歳	16,290	9.8
75歳以上	21,620	13.0

2.4 船舶の航行海域ごとに必要な支援について

船舶は、出港してから目的地に到着するまで離岸し、おおむね輻輳海域を航行し、大洋を経て輻輳海域を航行後、着岸する。この一連の流れを図 2-5 に示す。この離岸から着岸までの各段階において有効な情報提供を行う運航支援が必要と考えた。

離岸・着岸は、修士論文でウェアラブル端末を用いた操船支援として述べた。本論文ではウェアラブル端末の利用範囲を広げ、輻輳海域も含めたウェアラブル端末の 1 種であるヘッドマウントディスプレイを利用した情報提供について第 3 章で述べる。

次に輻輳海域を航行する船舶に対して交通状況を事前に提供することは、安全運航に有効と考える。交通状況の事前提供のために行った海域のリスク評価を第 4 章で述べる。

大洋航行中の船舶に対しては、環境に配慮した運航が求められることから、海上で収集されたモニタリングデータを利用した効率運航が必要と考えた。モニタリングデータの有効活用について第 5 章で述べる。

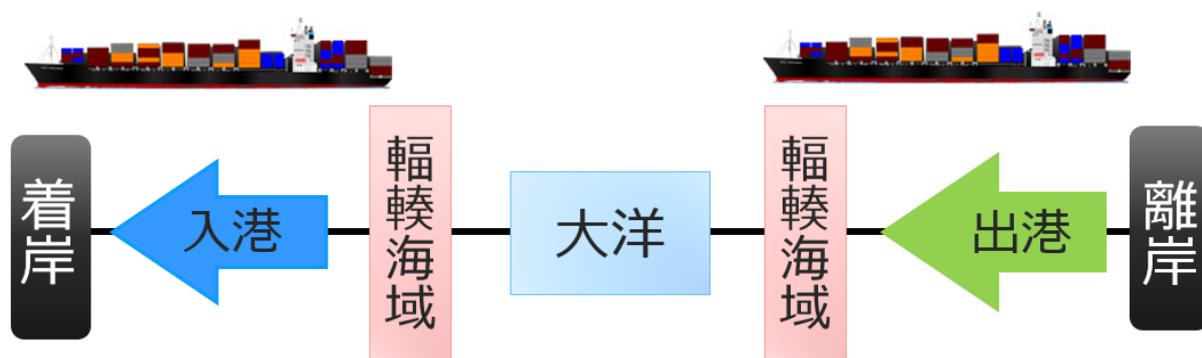


図 2-5 船舶の航行海域

2.5 情報提供を行なう表示機器の検討

情報を表示することができる機器は日々進化がめざましい。その中で、海上という陸上とは異なる環境で使用することができると思う機器 6 つを現在使用されているものを含め以下に示す。ただし、この 6 つは現時点では、陸上または、室内で使うことを主たる使用方法と考えているため、海上で使用する際の潮風による影響は現在分からない。以下に 6 つの機器を示す。

- ① デスクトップのパソコン
- ② ノートパソコン
- ③ タブレット端末(iPad など)
- ④ スマートフォン(iPhone、Android Phone)
- ⑤ ヘッドアップディスプレイ
- ⑥ ヘッドマウントディスプレイ

現時点において①と②は、電子海図(ENC)の表示装置として活用されている他、船内の情報を集約したモニタリングデータの収集などに使われている。

③のタブレット型情報端末は、スマートフォンとよく似た形状と機能を持っている。スマートフォンは、携帯電話としての電話番号を持ち、通話することができるが、タブレット型情報端末は、通話はできない。タブレット型情報端末の例として、Apple 社から販売されている iPad がある。タブレット型情報端末は、無線 LAN が使用できる環境下であれば、ケーブルなしでインターネット環境を使用することができる。また、操作がパソコンより比較的簡単であることから、幅広い年代に使用してもらうことが可能である。

④のスマートフォンは、③よりも小さく、軽いこと、常に持ち歩いているユーザーが多い機器である。そのため、スマートフォンのアプリを利用した船舶への位置情報や航行に必要な気象海象情報の提供などを推進する動きがある。

⑤のヘッドアップディスプレイ(Head Up Display)は、軍用機の飛行機や、一部の車のナビゲートシステムなどに用いられている表示機器である。⑤の利点としては、表示装置に触れることなく情報を得ることができ、現実の空間と情報を重畳できるという利点がある。

⑥のヘッドマウントディスプレイ(Head Mounted Display)についての詳細は第 3 章で述べる。⑤と⑥の大きな違いは、⑤は固定した位置にのみ情報を表示することができるのに対し、⑥は、装着者の行動やいる場所に情報を表示することができる。⑥の使用例についても第 3 章で述べる。

①から⑥までの機器の特徴について述べたが、船内において情報支援を行なう際に使用する機器は、用途に合わせて選択する必要があると考える。2.4 節で述べたように、航行海域ごとの支援を行なう際には、離岸、着岸、輻輳海域を航行する場合には、見張りの重要性が増すことから、見張りを妨げない機器としてヘッドマウントディスプレイを用いることにした。第 3 章で、ヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援について述べる。輻輳海域を航行前に海域のリスクを事前に知る際には、操作が比較的しやすいと考えるタブレット型情報端末による情報提供が望ましいと考える。海域の交通状況やリスクの提供

を行なうために行なったリスク評価について第4章で述べる。大洋航行中の船舶のモニタリングデータ収集には、現在と同じパソコンを利用するのが、データ量を考えた場合望ましいと考える。

第3章 ヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援

3.1 ヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援の目的

図 3-1 に本論文における第 3 章で述べる支援の位置づけを示す。本章での目的は、交通量の多い輻輳海域においてより重要となる見張りの支援を行うことである。安全運航において見張りが重要であることは、西村ら⁽¹⁾⁽²⁾の避航操船における見張り特性に関する研究や、古荘⁽³⁾の船舶の視認と見張りに関する一考察、児玉ら⁽⁴⁾の海難事故を例として船舶運航における視覚情報の重要性において述べられている。

現在、外航船では航海士と操舵手の 2 人体制で見張りを行っている。しかし、内航船や 1 人での当直を行う場合に、航海士は、安全運航に必要な情報を得るために船橋内を移動しなければならない。また、また、移動する際に、一時的に見張りから離れることになる。一方、陸上においては、スマートフォンの普及に伴い端末 1 つで様々な情報を瞬時に得るのが日常的になっている。

本論文では、ウェアラブル端末の 1 つであるヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display) を用いることで、見張りの妨げになることなく情報を提供することができるのではないかと考えた。本論文において、航海支援端末に求めることは 2 つある。1 つ目は、場所を限定することなく使用できることである。2 つ目は、動作や作業の妨げにならないことである。2 つの求めることに加えて、海上で使用した結果を考慮し改良する必要があると考える。陸上と違なり、電子機器を海上で使用する場合においては、海面反射による視認性の低下や、船橋外で使用する場合の潮風による劣化などへの対策や考慮が必要となるためである。本論文では、航海支援端末への情報の送受信と表示情報の確認および画面の視認性に関する実験を東京海洋大学の練習船汐路丸で実験を実施した。但し、劣化等についての検討は行わない。

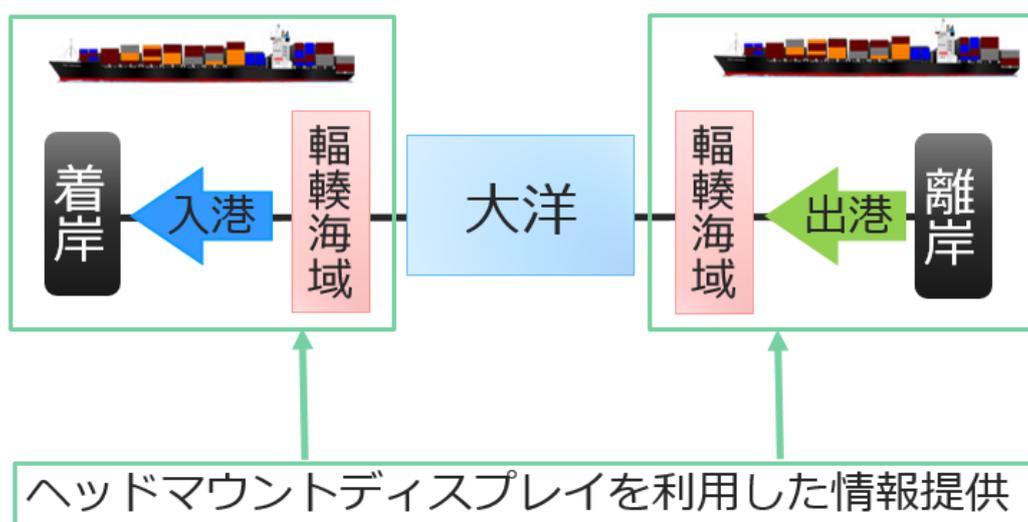


図 3-1 航行海域とヘッドマウントディスプレイを用いた航海支援

3.2 ヘッドマウントディスプレイとは

3.2.1 ヘッドマウントディスプレイについて

ヘッドマウントディスプレイとは、頭部に装着するディスプレイ装置のことである。ウェアラブルコンピュータの1つで、スマートグラスとも呼ばれている。現在、各メーカーによって製品の名称は異なるが、周囲が見える光学透過型と周囲が見えない非透過型の2つがある。光学透過型は、眼鏡と似た形状を持ち、現実空間に映したい情報を重畳表示することができる。図3-2は、光学透過型のEPSONから発売されたMOVERIOの着用した写真である。光学透過型の特徴として、開発途上であるが年々小型・軽量化が進んでいることがいえる。一般に購入できる製品のほとんどが眼鏡やサングラスと変わらない大きさになってきている。主に、周囲が見える利点をいかし、作業のサポートのためのマニュアルや情報の表示、道案内のための情報の表示装置として使われている。非透過型は、頭部全体を覆うため視界が完全に遮断されるが、表示画面に集中しやすいため、仮想空間への没入感を得やすい。図3-3⁽⁵⁾は、非透過型のOculusから発売されたOculus Rift+touchの着用した写真である。非透過型の特徴として装着者の周囲360度に写真や映像が表示されることがあげられる。3D映像もよりリアルに感じられる。年々表示画面の高画質化が進んでいる。主に、動画コンテンツの提供やゲームのプレイで使われている。

さらに、光学透過型は、両眼式と単眼式の2つがある。両眼式は、左右両方の目で1つの画面を見る装置である。現在販売されているヘッドマウントディスプレイの中で最も眼鏡に近い形状をしている。次ページの図3-2のMOVERIOは両眼式である。両眼式は、通常の眼鏡と同じように耳にかけて装着する。単眼式は、左右どちらか一方の目で画面を見る装置である。図3-4⁽⁶⁾は、brotherから発売されたAiRScouterの着用した写真である。単眼式は、頭部全体で装着する。図3-5⁽⁷⁾は、一般販売にいたることができなかったGoogle Glassである。Google Glassは、以前に販売されたヘッドマウントディスプレイと比較しても、コンパクトで軽量、高性能、高機能であり、ヘッドマウントディスプレイの時代の到来を予感させられる製品であった。しかし、社会問題では、写真撮影やHDビデオ録画機能の搭載が災いし、プライバシー侵害の懸念を払拭することができなかった。技術面での問題は、バッテリーの持ちが悪かったこと、見た目がスマートでなかったこと、魅力的なアプリケーションがなかったことであると塚本⁽⁸⁾は推測している。現時点で、従来のヘッドマウントディスプレイとは異なる現実空間と仮想空間をリンクさせるMRデバイスとして登場したのが、マイクロソフトのHoloLens(ホロレンズ)である。図3-6⁽⁹⁾に製品画像を示す。HoloLensは現在、開発者版のみであり、アメリカ、カナダのみの展開で日本での展開は未定となっている。HoloLensの特徴は、ディスプレイが透明であること、単体で動作するPCであること、入力作業にGGVを用いることがあげられる。まず、外観は、非透過型のヘッドマウントディスプレイのように見えるが、MRデバイスのため、ディスプレイが透明となっている。また、単体で動作するPCであるため、完全なワイヤレスである。Bluetooth搭載のため、任意でキーボードやマウスを接続することもできる。最後にGGVであるが、Gaze(視線、実際は頭部の向き)、Gesture(タップやホールドなどのハンド・ジェスチャー)、Voice(音声)を意味している。



図 3-2 MOVERIO の着用写真



図 3-3 Oculus Rift+touch の着用写真



図 3-4 AiRScouter の着用写真



図 3-5 Google Glass 本体

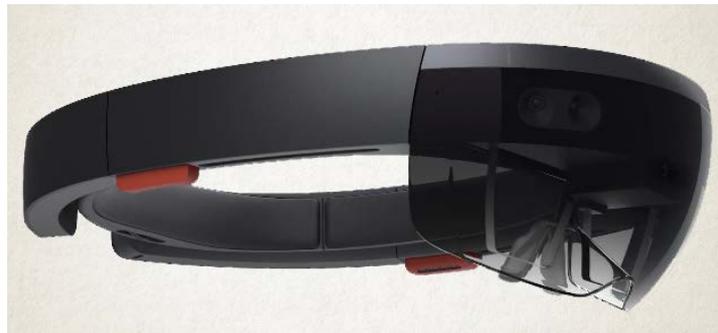


図 3-6 HoloLens 本体

3.2.2 使用したヘッドマウントディスプレイ

本論文では、支援装置を作成するにあたり、光学透過型の両眼式ヘッドマウントディスプレイを採用した。ヘッドマウントディスプレイに求める機能は、3つある。1つ目は、周囲の状況の把握に支障が出にくいことである。これは装着者の見張りを妨げる可能性を低くするためである。2つ目は、他の機器と一緒に使うことができることである。併用することができれば、他の作業を継続して行うことができる。3つ目は、装着した際に安定性があることである。眼鏡を装着したままでも使用できるとよいと考えた。3つを満たす現時点で最適と考えるヘッドマウントディスプレイとして EPSON の MOVERIO(モベリオ)を使用することにした。今後、ヘッドマウントディスプレイの進化に合わせて使用する製品は、変更していくことを考えている。

図 3-7 に製品の写真を示す。右の小型端末(Small device)がヘッドマウントディスプレイ本体(Glass)と接続されており、画面表示を切り替えるリモコンのような機能を持っている。この小型端末には画面表示機能はないが Android OS(Operating System)が搭載されている。Android OS は、Linux ベースのモバイル用オープンソースオペレーティングシステムである。現在 Android OS は、スマートフォンやタブレット型端末に搭載されている。OS として世界シェア 1 位であると同時に、広く認知されている。Linux については、3.5.1 項で述べる。装着者は、画面から視線を動かすことなく小型端末を操作することができる。装着者が使用中の画像を図 3-8⁽¹⁰⁾に示す。ヘッドマウントディスプレイの仕様を表 3-1⁽¹¹⁾に示す。



図 3-7 使用した MOVERIO 本体



図 3-8 MOVERIO の操作中の写真

表 3-1 ヘッドマウントディスプレイの仕様

液晶パネルサイズ	0.42 型ワイドパネル (16 : 9)
液晶パネル画素数	960×540 (QHD)
画角	約 23 度
仮想画面サイズ	仮想距離 5m : 80 型相当 仮想距離 20m : 320 型相当
色再現性	24bit カラー (約 1677 万色)
プラットフォーム	Android™4.0 (RAM : 1GB、内蔵メモリー : 8GB)
電源仕様	バッテリー : リチウムポリマーバッテリー
駆動時間	約 6 時間(動画ファイル連続再生時)
外形寸法 (W×D×H),質量	本体 : 185mm×170mm×32mm、88g
	小型端末 : 55mm×120mm×19mm、24g
センサー	GPS、地磁気センサー、加速度センサー、ジャイロ

3.3 AR と VR について

非透過型のヘッドマウントディスプレイに用いられる技術が VR(Virtual Reality)である。以後単に VR と記す。VR は、日本語で仮想現実と訳され、一般的に実際の現実として目の前にあるわけではなかが、機能としての本質は現実と同じであるような環境をコンピュータや様々なデバイスを用いてユーザーの感覚を刺激することを工学的に作り出す技術と定義されている⁽¹²⁾。

VR でリアリティを得るためには、3次元空間性、リアルタイム性、自己投射性の3つの要素が揃うと理想的だといわれている。3次元空間性とは、ユーザーにとって自然な3次元空間を構成していることである。これを実現するためには、3DCG や立体音響の技術が必要となる。リアルタイム性とは、ユーザーの起こした行動が仮想空間に反映できることである。これを実現するためには、入力インターフェース技術が必要となる。具体的には、簡易なパッドによる操作や3次元ポインタ、モーションキャプチャなどである。自己投射性とは、ユーザーが仮想空間内でも普段の感覚で感覚と矛盾なく行動できることである。現在この自己投射性を解決するために、技術開発が進められている状況である。完全に3つの要素を満たすのは難しいため、一般的にはある程度満たしていれば、VR と考えられている。

光学透過型のヘッドマウントディスプレイに用いられる技術が、AR(Augmented Reality)である。以後単に AR と記す。AR は、VR から派生した技術であり、現実世界の光景に計算機内で生成した情報を重畳描画する拡張現実感のことであり、直感的に情報を取得できる特徴がある。絶対にミスは許されない医療現場では、AR 技術が初期頃から血管の位置の表示に使われてきた。近年では、遠隔医療で使用され始めている。アメリカの Sports Vision 社が実際の競技の映像にアノテーションを表示させる技術を実用化している。アノテーションは、データに注釈となりうるデータのことであり、また、カーナビゲーションなどのナビゲーションに用いられている。パイオニアから発売されている製品では、HUD(Head Up Display)に情報を表示することで運転手はほとんど視線を動かすことなく、情報を取得し安全運転に役立っている。図 3-9⁽¹³⁾に表示画面を示す。



図 3-9 (ND-HUD10)の表示画像

3.4 ARの作業効率に与える影響

3.4.1 ARの作業効率に関する実験

遠山ら⁽¹⁴⁾は世代間の格差がないよう、被験者を14歳から88歳までの143名とし、紙媒体とヘッドマウントディスプレイ使用時の探索時間と正答率、疲労度の比較で作業効率を測った。疲労度については、心理的応答評価の一種である0～100の値で示されるVAS(Visual Analog Scale)で評価している。

図3-10(a)は経路ガイド、図3-10(b)は数表である。具体的な実験内容としては、図3-10(a)で示された経路を丸から四角へと矢印を辿り、図3-10(b)上での四角の位置にある数字を答えるものである。

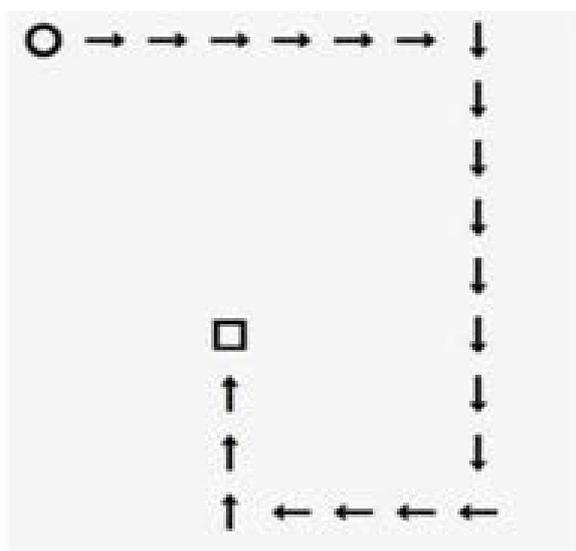


図 3-10(a) 経路ガイド

0	30	74	97	87	83	92	1	39
81	54	61	85	66	95	15	24	44
64	77	79	73	88	18	53	29	3
60	71	35	46	5	99	75	12	96
19	89	40	63	94	17	98	4	90
34	58	26	57	8	48	82	45	76
78	21	20	68	16	55	67	9	23
14	36	7	38	32	11	86	69	51
22	80	84	59	25	42	13	27	49

図 3-10(b) 数表

3.4.2 ARの作業効率に関する実験の結果

実験において、ヘッドマウントディスプレイを使用した場合の所要時間は、平均10.9秒となり、紙媒体では平均30.6秒であった。短時間ではあるが、探索時間、正答率、疲労度のどれもヘッドマウントディスプレイを使用した方がよい結果となった。特に、遠山らは、視線を動かすことなく探索できることによって作業が容易になったと述べている。これらの結果から、ヘッドマウントディスプレイは見張りを援助する情報提供端末として優れているのではないかと考える。

3.5 表示するデータの検討

3.5.1 使用したデータ

本論文では、東京海洋大学練習船汐路丸の船橋に設置しているモニタリング装置を經由し、収集している汐路丸の航海データ、機関データと汐路丸の船内で収集しているAIS(Automatic Identification System)データを使用した。AISデータは、動的情報、静的情報、航海関連情報の3つがある。

収集されたデータより、針路、船速、風速、GPS(Global Positioning System)による緯度経度などリアルタイムに変化する情報を取得することにした。

図3-11にデータ取得のためのシステムの構成を示す。汐路丸の船内では、各装置からのデータを船内LAN(Local Area Network)経由収集し、Linuxサーバにおいて受信、加工し、無線LANを利用し、ヘッドマウントディスプレイへ送信している。

Linuxは、無料でかつオープンソースなソフトウェアとして共同開発されたLinuxカーネルをカーネルとして用いたUnix系OS(オペレーティングシステム)のことを示す。カーネルとは、階層型に設計されたOSの中核となる部分のことである。Linuxは、ユーザー権限が厳格に管理され、安定性も高く、使用料が無料であることから、サーバに使われることが多い。基本的にLinuxサーバは、余計なライブラリーやモジュールが入っておらず、グラフィックインターフェイス(GUI)もインストールされていない。そのため、処理速度が早く、CPUの負荷が低いという特徴がある。これらの利点を考慮し、本論文では、LinuxサーバのOpen Blocksを使用することにした。

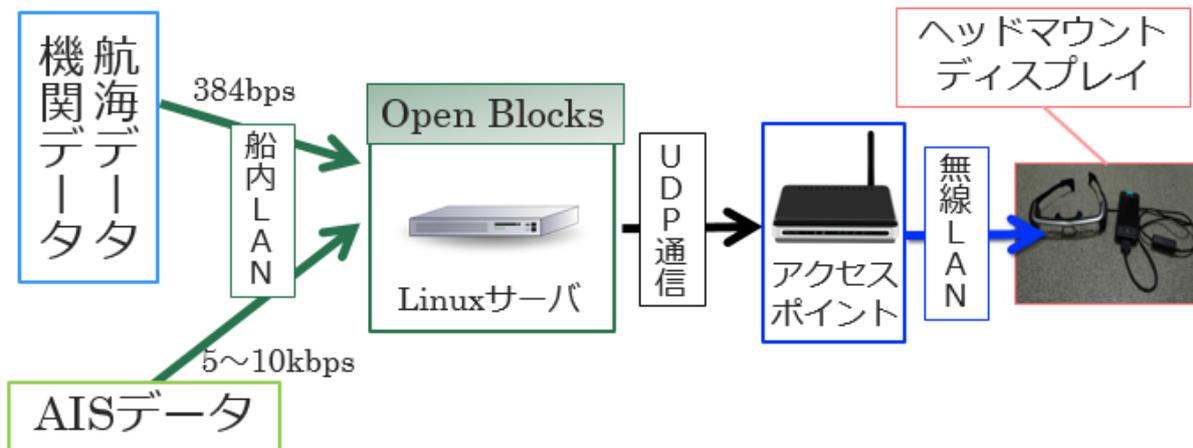


図 3-11 船上での情報収集システムの構成図

図 3-12 にデータ表示までのヘッドマウントディスプレイ内での処理を示す。Linux サーバで受信し UDP(User Datagram Protocol)データを、ヘッドマウントディスプレイに UDP 送信する。新規開発したヘッドマウントディスプレイ内の Android アプリケーションが、UDP データ受信処理、データ表示計算処理をし、Glass に表示している。Linux サーバ内でデータの UDP 送受信をしているが、ほぼ遅延なく Glass まで送られている。これは、汐路丸に搭載されているレーダ画面とヘッドマウントディスプレイの Glass 画面を比較したが遅延は感じられなかったため Glass 内での処理もほぼ遅延がないと推測されるためである。図 3-11 と図 3-12 に示した処理により、サーバ上のデータに対し、約 1 秒以内にリアルタイムにヘッドマウントディスプレイへ情報を配信することを可能にした。

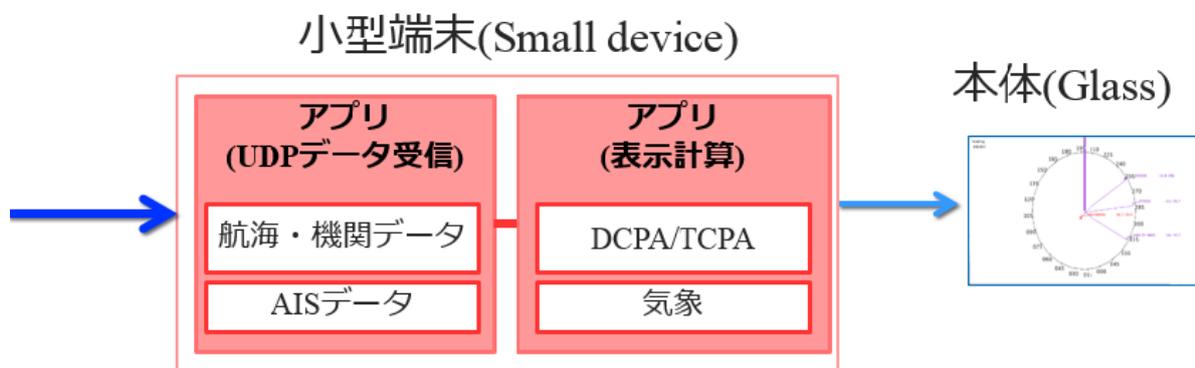


図 3-12 情報表示システム構成図

3.5.2 ヘッドマウントディスプレイの表示画面と装着者の視野

ヘッドマウントディスプレイで表示できる画面は使用者の視野を大きく損なわない大きさになっている。図 3-13 に表示画面の例を示す。図 3-13 は、装着した際の見え方を西川⁽¹⁵⁾が作成した図である。本来であればヘッドマウントディスプレイの端末上に表示されている画面を直接図として表示したいが、ヘッドマウントディスプレイ端末の特性上難しい。そのため、図 3-13 以降は、ヘッドマウントディスプレイへ送信しているパソコン上の画面を「ヘッドマウントディスプレイの表示画面」として扱うこととする。

図 3-13 では、周囲の画像に対して画面の画像が大きいいため、装着者の視野をヘッドマウントディスプレイが狭める印象を受ける。しかし、実際は、装着者の視野の 11% に表示されている。



図 3-13 ヘッドマウントディスプレイの画面

本論文で使用するヘッドマウントディスプレイは、装着者の視野内において、20m先では 320 型の画面の大きさに相当して見ることができる。図 3-14⁽¹¹⁾は、装着者からの距離と画面の見える大きさを示した図である。遠くを見ることで、近くでは見えにくい文字も端末を操作することなく拡大して読み取ることができる。

また、周囲と画面が同化してしまい見えにくい場合には、一時的に手をかざすことや、視線を周囲の壁などの遮光物にずらすことで、画面を視認することが可能となっている。

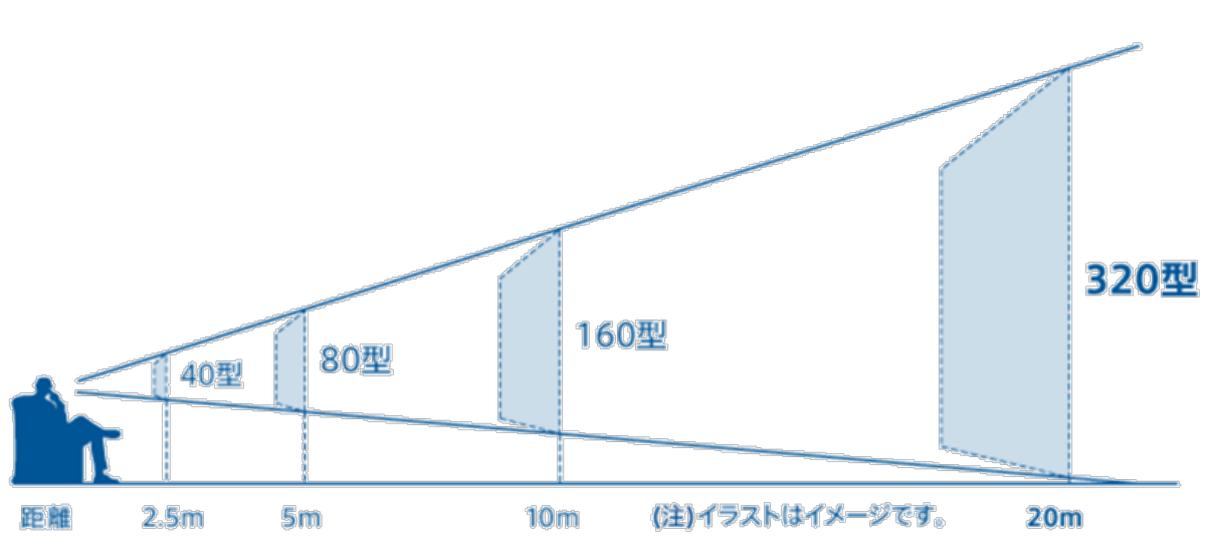


図 3-14 装着者からの距離と画面の大きさ

3.6 表示画面の作成

3.6.1 表示情報の検討

表示情報を検討するにあたり、操船者の避航行動を考慮することにした。操船者は、安全に目的地へと向かうため、常に見張りを行っている。竹本ら⁽¹⁶⁾は、操船者の避航すべき船舶を発見し、避航するにいたる行動を次のような一連の情報処理系統に基づいて行動していると捉えている。最初に他船の認識をし、次に見合い関係の識別を行い、さらに衝突の危険の有無を判断し、最後に適切な避航法の選択を行う。本論文では、この4つの段階のうち、他船の認識と衝突の危険の有無の判断することを支援することにした。

他船の認識を支援するために、AISデータを用いることにした。AISデータは、航行中の船舶であれば、2～10秒で情報が更新される。AISデータの受信範囲は、アンテナ設置場所や天候状況の影響により常に一定ではないが、見通し範囲内で約20NM程度の広範囲をカバーしている。

本論文では、広範囲の危険な見合い関係を割り出すことではなく、海上衝突予防法における互いの視野の内にある船舶同士の避航操船を支援したいと考えた。しかし、互いの視野の内にある船舶の具体的な距離は法律上定義されていない。そのため、海上衝突予防法に定義されている灯火の視認距離を用いることにした。表3-2に海上衝突予防法第22条灯火の視認距離で定められた灯火の種類と距離を示す。50m以上の船舶のマスト灯の視認距離は6NMであることから、より安全な操船を目指し、汐路丸で収集されたAISデータの中で自船から6NM以内の船舶を対象とした。

表 3-2 海上衝突予防法の灯火の視認距離

長さ 50m 以上の船舶	マスト灯	6NM
	げん灯	3NM
	船尾灯	3NM
	引き船灯	3NM
	全周灯	3NM
長さ 12m 以上 50m 未満 の船舶	マスト灯	5NM (長さ 20m 未満の船舶にあっては、3NM)
	げん灯	2NM
	船尾灯	2NM
	引き船灯	2NM
	全周灯	2NM
長さ 12m 未満の船舶	マスト灯	2NM
	げん灯	1NM
	船尾灯	2NM
	引き船灯	2NM
	全周灯	2NM
他の動力船に引かれている航行中の船舶であって、その相当部分が水没しているため視認が困難であるもの	全周灯	3NM

注)長さ 50m 以上、長さ 12m 以上 50m 未満、長さ 12m 未満の船舶は、他の動力船に引かれている航行中の船舶であって、その相当部分が水没しているため視認が困難であるものを除く。

竹本らの研究によると、操船者は衝突の危険の有無を判断するのにジャイロコンパスによる方位計測と方位の変化とレーダ ARPA(Automatic Radar Plotting Aids)、AIS の捕捉機能を使っていると述べている。

本論文では、衝突の危険の有無の判断を支援する情報として、レーダ ARPA から得る DCPA(Distance to Closest Point Approach)と TCPA(Time to Closest Point Approach)が重要であると考えた。AIS データから DCPA と TCPA 計算し、端末に表示させるため、今津⁽¹⁷⁾の式(1)~(6)を用いることにした。

$$\Delta X = V_T \sin C_T - V_O \cos C_O \quad (1)$$

$$\Delta Y = V_T \cos C_T - V_O \cos C_O \quad (2)$$

$$V_R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (3)$$

$$C_R = \tan^{-1} \Delta X / \Delta Y \quad (4)$$

$$DCPA = d |\sin(C_R - A_Z + 180)| \quad (5)$$

$$TCPA = d \cos(C_R - A_Z + 180) / V_R \quad (6)$$

V_T :相手船の速力(knot)、 V_O :自船の速力(knot)、
 C_T :相手船の針路(degree)、 C_O :自船の針路(degree)、
 A_Z :相手船の真方位(degree)、 d :相手船と自船の距離(NM)

3.6.2 表示画面の配色

ヘッドマウントディスプレイの表示画面を設計するにあたり、ビューマネジメントの問題を考慮する必要がある。ビューマネジメントとは、表示する情報などを含めた見え方を管理することを指す。具体的な問題としては、現実世界に画面を重畳表示することから、画面が見づらい、表示される情報が多すぎて装着者に負担がかかることがあげられる。画面が見づらくなることを考慮し、表示する文字や図の配色の検討を行った。

本論文では操船者はヘッドマウントディスプレイを装着したまま見張りをを行うことを目的としているため、海面上に疑似的に映る数字や文字を読む必要がある。しかし、海上は海面反射や気象海象の影響を受けやすいため、陸上と比較しても物標を視認しにくい。海上よりヘッドマウントディスプレイの画面表示の視認性が高いと考えられる陸上でも背景色と表示情報の色が近くなってしまうことによる視認性の低下の問題がある。視認性や画面表示による支援に関する3つの先行研究を参考に有効と推測される色を選別することにした。

1つ目は、背景色と反対の色を用いてコントラストを強めて視認性を高める研究を富士原ら⁽¹⁸⁾が行っている。本論文では、ヘッドマウントディスプレイの画面の背景となる色は、青や濃紺と快晴時の海面からの照り返しである。本論文では、照り返しは黄とした。色相環チャート⁽¹⁹⁾を用いた場合の反対色は、赤、橙、黄、黄緑、紫であった。

2つ目は、海上における安全色を用いたブイ(海上浮標)の視認性について河本ら⁽²⁰⁾が調査した結果がある。この視認性の調査で視認率の高かった色は、黄、黄赤、赤であった。

3つ目は、**Head Up Display**を用いて見張りを支援する装置の開発と評価を行った研究である。この疋田ら⁽²¹⁾の支援装置では、目視している船影上に対象船のレーダエコーおよびレーダから得られる情報を重畳表示するものである。この装置の文字表示には、蛍光緑が使用されていた。

これら3つの研究を参考に、できる限り海上において視認することが容易な配色を見つけるため、背景色と文字の同じ組み合わせを作らずに画面を作成した。

3.6.3 情報の表示方法

先に述べたが、情報を多く1つの画面にまとめて表示してしまうと、情報量過多になり、装着者の負担が増してしまう。そのため、本論文では、サーバで収集した情報を3つのモードに分けて表示することにした。3つのモードのどれを選択するかを選ぶモード選択画面を次ページの図3-15に示す。

1つ目は、見張りモード(Look out)である。このモードでは、他船の認識を補助するための情報を提供することを目的としている。

2つ目は、危険ランキングモード(Degree of risk)である。このモードでは、衝突の危険の有無の判断を補助することを目的としている。

3つ目は、気象モード(Weather)である。このモードでは、自船で計測された相対と真の風向、風速を場所を選ばずに提供することを目的としている。

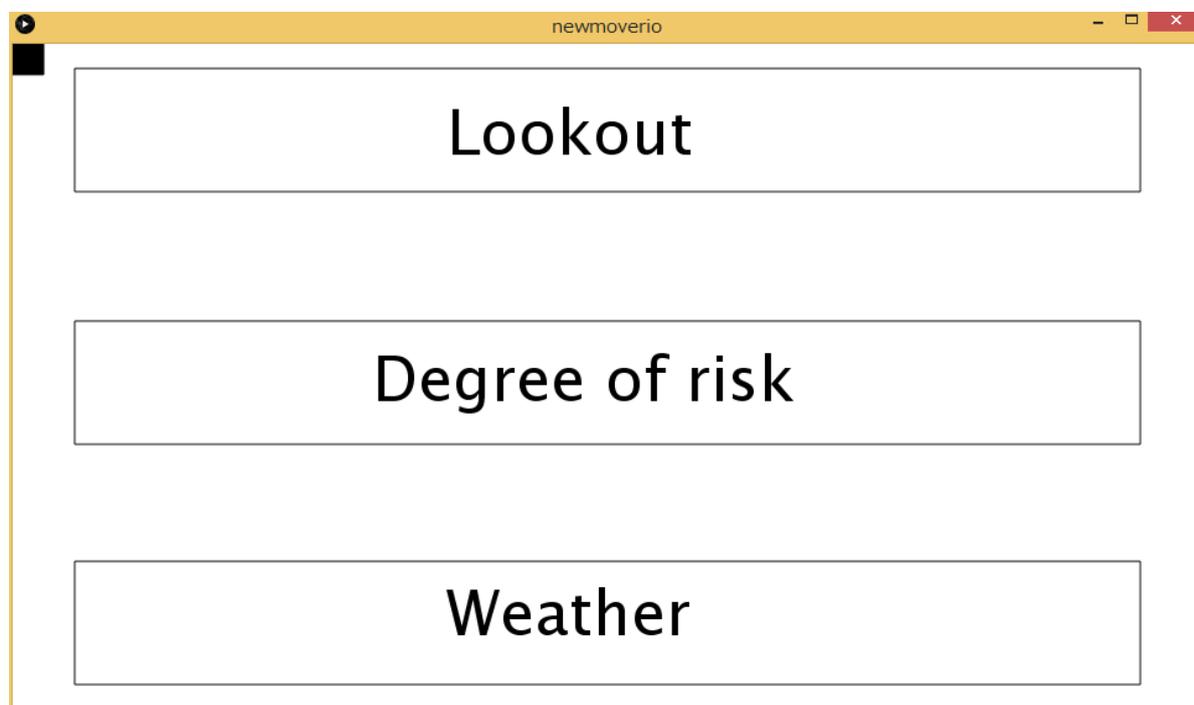


図 3-15 作成した選択画面

3.6.4 作成した表示画面

見張りモードでは、操船者が船首方向の延長上にいることを仮定し、船首方向をヘッドマウントディスプレイの画面の中央に固定した。この表示形式は、**course up** の状態である。図 3-16 に 2016 年 5 月 17 日館山湾に停泊中の見張りモードの画面を示す。停泊中のため、周囲の船舶数は多くない。

船首方向は、図 3-16 中の左上に数字で表示される他、円の中心線も追従している。3.6.1 項で述べた理由から他船の認識を 6NM 以内の船舶としたため、中心の円の半径は 6NM である。自船の周囲にいる他船は、船名、速力、自船からの距離の順で数値を表示している。

また、自船から相手船の距離が 3NM 未満の場合には赤で、3NM 以上 6NM 以下の場合には紫で数値を表示している。図 3-16 中の赤の船舶(SANYOMARU)は、距離は 0.9NM と近いが、船速が 0 に近いことから、自船と同じく停泊中であることが分かる。

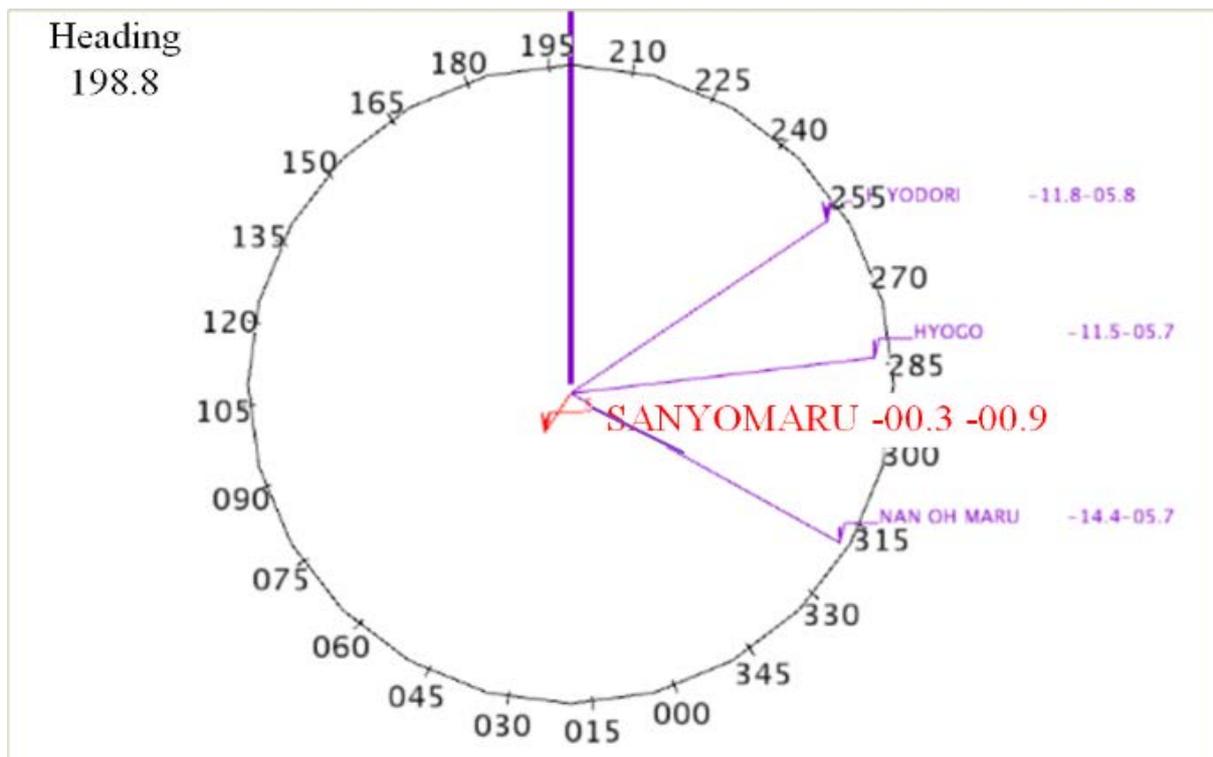
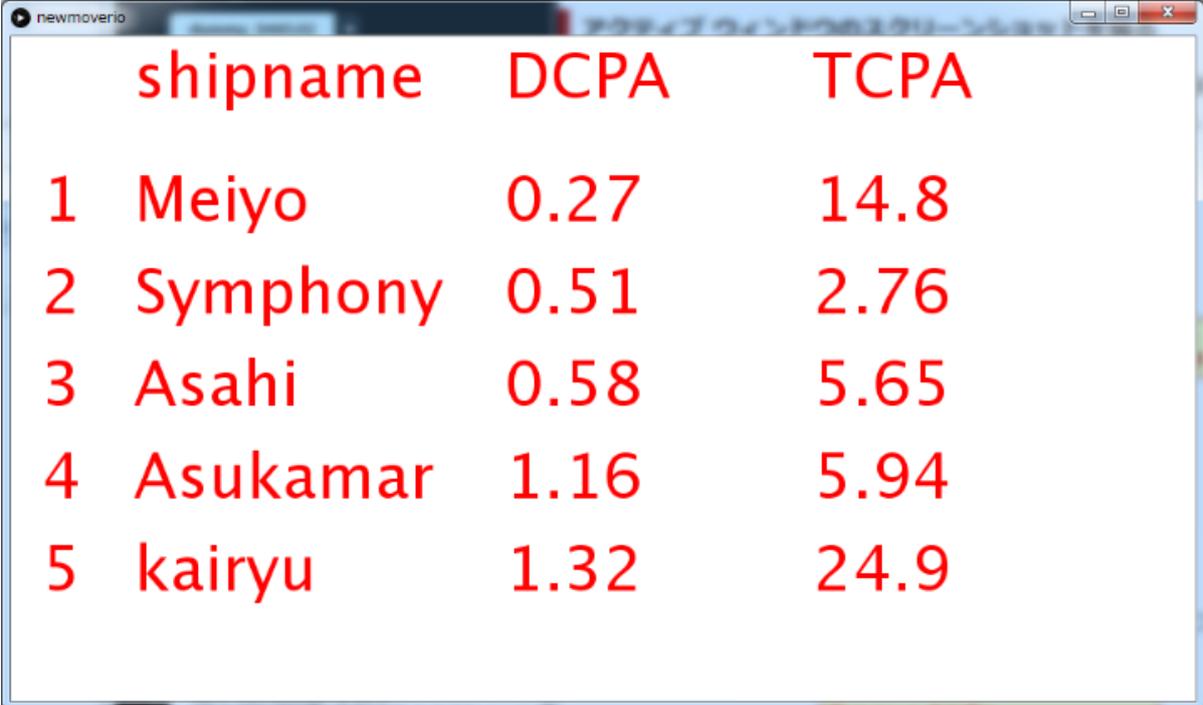


図 3-16 作成した見張りモードの画面

危険ランキングモードではDCPAの値の小さい順にランキング形式で船名とTCPAと共に表示している。図 3-17 に東京海洋大学の先端ナビゲートシステムに蓄積されていた AIS データから作成した画面を示す。現在は、DCPA の値の小さい順に表示しているが、ユーザーの任意で、変更することが可能である。図 3-17 で表示している数値の単位は、DCPA は NM、TCPA は分である。現在、船名は 8 文字目まで表示している。これは船名を全て表示しようとする文字の大きさが小さくなってしまい視認性が下がってしまうためである。



	shipname	DCPA	TCPA
1	Meiyo	0.27	14.8
2	Symphony	0.51	2.76
3	Asahi	0.58	5.65
4	Asukamar	1.16	5.94
5	kairyu	1.32	24.9

図 3-17 作成した危険ランキングモードの画面

気象モードでは、真風向と真風速を表示する true モードと相対風向と相対風速を表示する relative モードの 2 つを作成した。図 3-18 に 2016 年 5 月 17 日館山湾に停泊中の relative モードを示す。表示形式は、見張りモードと同じく、course up の状態である。船首方向は、右上に数値で表示されている。円の周りを矢印が風向によって動く表示となっている。風速は、右下に m/s の単位付きで表示される。

風向、風速は自船にとって低速時に大きく影響を与える。そのため、精度よく自船の移動速度が計測し、情報を加えることができれば、離着岸時に役立つと考えられる。

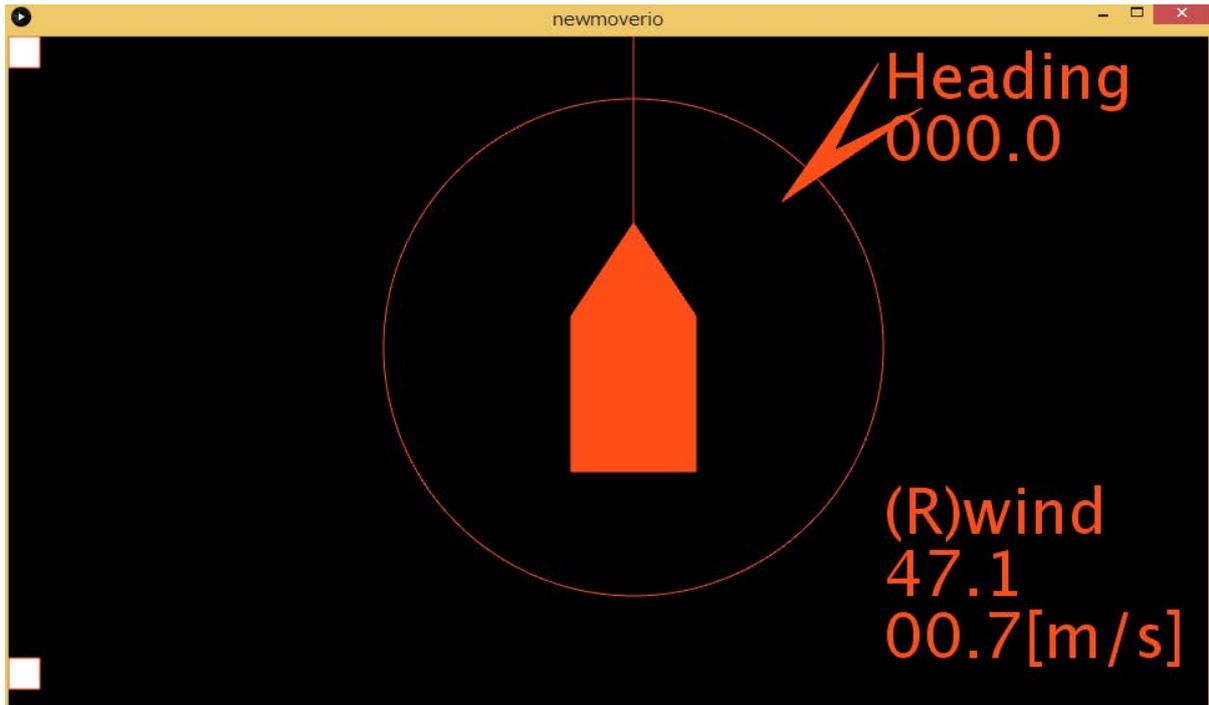


図 3-18 作成した気象モード(相対)の画面

3.7 実海域における実験

3.7.1 実海域実験の目的

本論文で製作したヘッドマウントディスプレイを周囲に船舶がある状況において使用し、(1)東京海洋大学練習船汐路丸の船橋で収集しているモニタリングデータをヘッドマウントディスプレイが受信し、表示していること、(2)視認性の高い色の組み合わせの表示画面を提案することを目的とした実海域実験を実施した。

3.7.2 実験状況

表 3-3 に実験時の状況を示す。ヘッドマウントディスプレイの情報の受信状態と表示画面の確認実験は、日中に行った。画面の視認性を確認するための実験は、周囲の風景を背景に画面が表示される特性を考慮し、日中と日没後の 2 つの条件で行った。日中の視程 2.4NM は、靄が発生していたためである。

表 3-3 実験実施条件

	日中	日没後
実験日	2016年3月8日	2016年3月8日
実験時刻	11:00 AM	18:00 PM
気象	晴れ	雨
視程	2.4NM	3NM
航海状態	航海中	錨泊中
航海海域	浦賀水道	館山湾

3.8 実験方法

3.8.1 ヘッドマウントディスプレイの情報の受信と表示情報の確認

汐路丸乗組員にヘッドマウントディスプレイを装着してもらい、情報の受信状態と表示情報の確認を行った。受信状態の確認では、装着者に見えている画面の数字に変化があるか、付属の小型端末を用いてモードの切り替えが行えるかについて実験を行った。

表示情報の確認では、ヘッドマウントディスプレイに表示されている数値と著者らが他の航海計器に表示されている数値を読み上げることで実験を行った。

具体的には、レーダおよび ECDIS(Electronic Chart Display and Information System)を用いて、表示情報の船名、速力、距離、DCPA、TCPA の情報が正しいことを確認した。

また、船橋内の風向風速計を用いて、相対風速、相対風向、真風速、真風向の確認を行った。図 3-19 に受信状態の確認を行った時の様子を示す。



図 3-19 日中でのヘッドマウントディスプレイ装着状況

3.8.2 画面の視認性の実験

3.6.2 項で述べたように、先行研究を参考に、海上において視認することが容易な配色を見つけるため、背景色と文字色の同じ組み合わせを作らずに画面を作成した。表 3-4 に使用した色とその組み合わせを示す。表 3-4 中の F-は、蛍光を意味する Fluorescence を省略表記したものである。

表 3-4 背景と文字の色を変更する前の設定

	背景	文字
モード選択	黒	白
見張りモード	白	紫
危険ランキングモード	白	赤
気象モード (relative)	黒	F-緑
気象モード (true)	黒	F-黄赤

表 3-3 に示した状況下でヘッドマウントディスプレイを装着し、画面に表示される文字や数値の見やすさを視認できた(A)、視認できたが読みにくい(B)、視認できなかった(C)の 3 段階で評価を行った。

3.9 実験結果

3.9.1 ヘッドマウントディスプレイの情報の受信と表示情報の確認

ヘッドマウントディスプレイの情報の受信・表示は目視でおよそ 30 分間にわたり、断続的に確認を行った。画面の切り替えや情報の更新に特に問題はみられなかった。船名、速力、距離、DCPA、TCPA、相対風速、相対風向、真風速、真風向の各表示項目の確認は、レーダや ECDIS を使用し、目視での確認を行った。

そのため、定量的な評価は行ってはいないが、リアルタイムで情報が表示され、変化していることが確認できた。

図 3-20 に、図 3-18 に示した気象モード(relative)のヘッドマウントディスプレイ上での表示画面を撮影した写真を示す。



図 3-20 ヘッドマウントディスプレイ(気象モード)の表示状態

3.9.2 画面の視認性の実験評価結果

著者がヘッドマウントディスプレイを装着し、表 3-4 に示した画面を用いて評価を行った結果を表 3-5 に示す。

背景に黒を使用した画面は、日中の実験ではすべて画面が透過してしまい、文字が見え難い結果となった。一方、背景に白を使用した画面は、すべて数字や文字を読むことができた。表 3-5 に示すように、日中において、背景を白、文字を赤にした組み合わせが最も視認性が高かった。一方で、背景を黒とし、文字を白または蛍光緑とした組み合わせは、視認性が低いことが明らかとなった。日没後の実験では、すべての画面において視認性が高く、文字をはっきりと読み取れることが確認できた。

表 3-5 画面の視認性の実験の評価

	画面の設定		視認性の評価	
	背景	文字	日中	日没後
モード選択	黒	白	C	A
見張りモード	白	紫	B	A
危険ランキングモード	白	赤	A	A
気象モード (relative)	黒	F-緑	C	A
気象モード (true)	黒	F-黄赤	B	A

3.10 視認性向上のためのシステム改良と再評価

3.9.2 項の結果から、実験航海中に RGB の数値を調整し、最も日中視認性が高かった色に変更することにした。RGB とは、色の表現法の 1 つで赤(Red)、緑(Green)、青(Blue)の光の三原色の頭文字をとったものである。3.6.3 項および 3.6.4 項に示した図 3-15～図 3-18 は変更後の画面である。

表 3-6(a)に変更後の背景および文字に使用した色を示す。見張りに関するモードは背景を白に統一し、気象モードは背景を黒に統一した。また、表示内容によって文字の色は異なる配色にした。

色の配色変更後、視認性の低かった日中のみ再度実験を行った。表 3-6 (b)に実験時の状況を、表 3-6 (c)に配色変更後の視認性の評価結果示す。表 3-6 (c)に示したように、変更後のすべての画面において視認性が高く、はっきりと読み取ることができた。

表 3-6(a) 再実験での背景と文字の色の設定

	背景	文字
モード選択	白	黒
見張りモード	白	濃紫
危険ランキングモード	白	赤
気象モード (relative)	黒	F-橙色
気象モード (true)	黒	F-ピンク

表 3-6(b) 再実験での実験の状況

	日中
実験日	2016年3月10日
実験時刻	11:00 AM
気象	晴れ
視程	5NM
航海状態	航海中
航海海域	浦賀水道

表 3-6(c) 画面の視認性の再実験での評価

	画面の設定		視認性の評価
	背景	文字	日中
モード選択	白	黒	A
見張りモード	白	濃紫	A
危険ランキングモード	白	赤	A
気象モード (relative)	黒	F-橙色	A
気象モード (true)	黒	F-ピンク	A

3.11 実海域実験の考察と今後の課題

ここでは、実海域実験の結果から考察を述べる。また、実海域実験で装着していただいた汐路丸乗組員と、実験終了後、現役三等航海士から寄せられた意見および、著者が端末を作成し、海上での実験で得た定性的な評価を述べる。

まず、ヘッドマウントディスプレイがワイヤレスで航海支援情報を受信し、装着した操船者にリアルタイムに情報を提供することが可能であった。このことはヘッドマウントディスプレイによる情報提供が、場所を選ばず情報を集約し提供する機能を十分に満たしていると考えられる。また、既存の機器の情報表示のみであればヘッドマウントディスプレイである必要性は小さいが、AIS データの活用については、視界制限状態や双眼鏡による目視では見えない部分の補完として有益であるとの意見を得られた。

現在、ヘッドマウントディスプレイの表示画面は、船首方向を画面の中央に固定した **course up** の状態である。見張りモードでは、レーダと同じ状況であるため、理解しやすいが、**ECIDS** と **RADAR** を併用する場合には、**North up** の方が理解しやすいとの意見があった。ヘッドマウントディスプレイの最大の利点は、外の風景との重畳表示ができることであることから、**course up** 表示で、かつ外の風景と情報重畳表示を望むとの意見があった。しかし、自船を中央に置いた現在の表示形式は、錨泊中に周囲の船舶の動静監視に役立てることができるとの評価もあった。

これらの意見から、操船者の動きと追従し、装着者が直感的に情報を得られるような複数の画面の切り替えができる仕様が望ましいと考える。

3.9.2 項で示したように、想定以上に日中に海面反射の影響が強く、海面が背景となる場合に、文字や図が見えにくかったことから、日中の視認性を上げるための色の調整と実験を行い、現在の表示画面である図 3-15～図 3-18 となった。実験結果で述べたように、日没後の画面の視認性が日中に比べて高いため、ヘッドマウントディスプレイの表示画面が灯火と重畳した場合に、灯火が見えにくくなる可能性が考えられる。日中と日没後に配色を切り替えられるようにする必要があると考える。

また、著者がヘッドマウントディスプレイを船内 LAN へ接続する設定を行った際、細かな数字や文字を入力し続けると軽い疲労感を覚えた。この体験から、ヘッドマウントディスプレイ装着時には、疲労を感じやすくなる可能性があると考えられる。疲労感の要因としては、ヘッドマウントディスプレイは、通常のディスプレイより画面が透過しやすいため、画面に集中しすぎることがあげられる。実用化にむけて疲労を感じにくくなるよう使用方法、使用時間などを検討していきたいと考えている。

今後は、さらに実務経験者による評価やヒアリングを行い、実用化に向けて改良を進めていく予定である。

3.12 第3章のまとめ

第3章では、船内において、情報の共有や発信が容易になった際、情報をどのような端末で表示するのがよいのかを検討する第一歩として、ヘッドマウントディスプレイを用いた情報提供システムの提案を行った。ヘッドマウントディスプレイを用いた情報提供システムは、入出港や輻輳海域において重要性の増す見張りの支援を行うことを目的とした。そして、航海支援端末の作成と東京海洋大学の練習船汐路丸にて実海域実験を行った。航海支援におけるヘッドマウントディスプレイの有用性として、航海計器のそばまで行くことなく情報を得られ、情報を自分の目でも確認でき、手に物を持つ必要がなく、他の機器と一緒に使うことができることである。

はじめに情報提供を行う端末の検討を行った。選定した端末の表示画面には、複数の配色について調査し、視認性の高い色を採用した。表示画面の大きさを考慮し、情報を1つの画面に集約表示するのではなく3つに分けて表示する形式とした。リアルタイムに取得できるAISデータと汐路丸のモニタリングデータを使用し、操船者が見張りを行いながら危険船を判別できるよう自船から6NM以内の船舶を対象としてDCPA、TCPAを計算し端末に表示させた。

作成した端末を用いた実海域実験では、データの受信と計算結果の確認から、リアルタイムに情報提供を可能にした。実務経験者からAISデータ活用などには有益であるとの意見を得た。

以上のことから、ウェアラブル端末による情報提供の可能性を示すことができたと考えられる。

第4章 IWARP を用いた各海域の潜在的リスクの検討

4.1 IWARP を用いた各海域の潜在的リスクの検討の目的

図 4-1 に本論文における第 4 章で述べる支援の位置づけを示す。本章での目的は、輻輳海域の情報を事前に提供することができれば、安全運航につながると考えたためである。本論文では、輻輳海域の情報として海域の衝突リスクの評価結果を用いることにした。船舶が目的地へ向かい荷役を行うまでの過程で、様々なリスクが考えられる。天候の急変による到着予定時刻への遅延ややむおえない事情による積荷の流出も様々なリスクに含まれる。考えられるリスクの中で、ヒューマンエラーを原因とすることが多く、船会社の経営を脅かす危険の高い衝突事故のリスクを事前に提供する。事前に危険な航行海域を知ることが、安全意識の向上につながると考え、国際的なリスク評価ツールである IWARP を用いて海域のリスク評価を行うことにした。

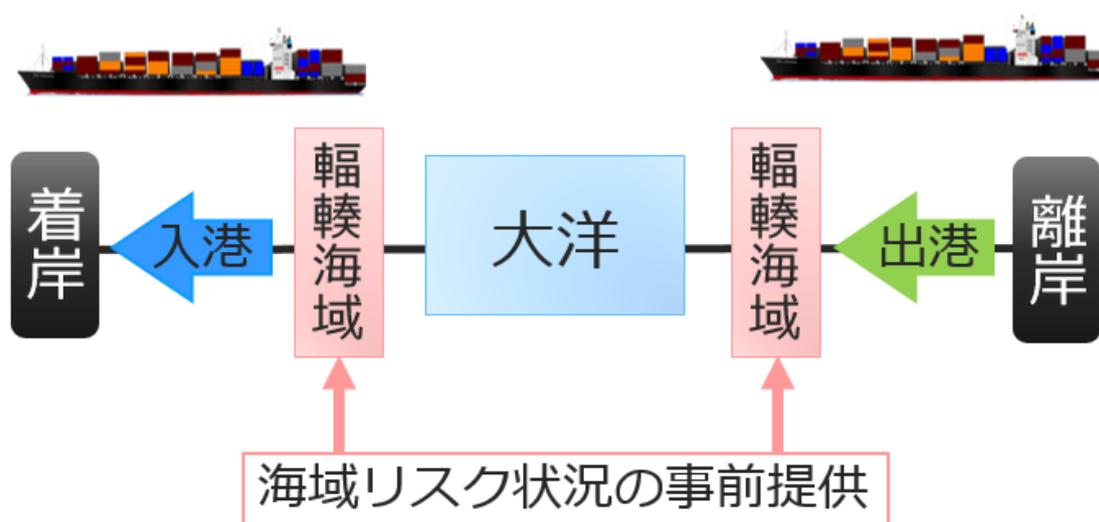


図 4-1 航行海域と IWARP を用いた各海域の潜在的リスクの検討

4.2 IWRAP の開発の目的と経緯

IWRAP (IALA Waterways Risk Assessment Program)の略称で、アイラップと呼ばれている交通実態の危険度評価ソフトである。以下 IWRAP と表記する。

IWRAP は、調査対象とした海域において通航船舶が遭遇する可能性のあるリスクを定量的に評価する目的で作られた。SOLAS'74 を締結した国の政府は、SOLAS'74 の V 章第 12 規則の船舶交通業務と同じく第 13 規則の航行援助施設の条文に基づき、交通量又は危険度を考えて所要の施設を設置することが求められている。IALA(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities : 国際航路標識協会)は、世界共通の指標を用いて危険度を評価することを推奨している。世界共通の統一指標で評価を行うことは、客観的な数値として、様々な海域を比較することができることを意味している。

世界共通の統一指標で評価を行うために、危険度（以後リスクと表記する）を定量的に評価するツールとして開発されたのが、IWRAP である。現在、IWRAP は、AIS データとロイズ社の船舶データを解析に使用することができる。

IWRAP のソフトウェアとしての正式名称は、IWRAP MARK II という。デンマーク工科大学で開発された BaSSy(Baltic Sea Safety : バルト海の安全)と呼ばれるプロジェクトで開発されたソフトウェアから船舶の衝突と座礁に関係する部分のみを抜き出したものが元となっている。デンマークでは、BaSSy を引き継いだ ISESO(Information Technology Safety Efficiency in Ship Design and Operation)プロジェクトがデンマーク海運局によって計画され、GRACAT(Grounding And Collision Analysis Toolbox)が別途開発された。GRACAT は、IMO(International Maritime Organization : 国際海事機関)で導入を決めた FSA(Formal Safety Assessment : 総合的安全評価法)も使用することができるソフトウェアとなっている。

IWRAP を IALA が導入するにあたり、精度の検証をデンマークのグレートベルト、イギリスのドーバーとフランスのカレーの間、スウェーデンのトゥルクとストックホルムの間、の 3 つの RORO 船とフェリーの航路で行った。既存の海難統計と比較した結果、よく一致していることから、世界共通のリスクの指標として IALA は使用していくこととした。

4.3 IWRAP の機能

IWRAP には、2つの機能がある。1つは、輻輳海域の見合い関係の可視化である。第4章の解析で使用する AIS データは、全て海上保安庁から提供を受けたものである。図 4-2(a) は、2011 年 10 月 11 日～25 日の 15 日間分の AIS データより、東京湾の交通流を描画したものである。交通量が多い順に青、赤、黄色、白で表示される。図 4-2(a)より、船舶が集中して航行している海域が視覚的に分かる。図 4-2(a)を次の図 4-2(b)のようにヒストグラムを用いて表現することができる。ヒストグラムで表示することで、航行する船舶の向きや交通量が理解しやすくなる。図 4-2(b)中の赤枠で浦賀航路のおおよその位置を示した。この部分のヒストグラムに着目すると、法律に従い、分離通航していることが分かる。

もう1つは、危険を数値化できることである。危険を定量的に示す事故発生確率を求めることができる。以降事故発生確率のことをリスクと表現する。リスクの計算方法は☆にて述べる。国土交通省海難審判所の海難の種類⁽¹⁾を次のページの表 4-1 に示す。表に示すように、海難の種類は、16 種類ある。この海難の内、IWRAP で解析できるのは、衝突、衝突(単)、乗揚の3つである。この3つの内、衝突を本論文では扱う。

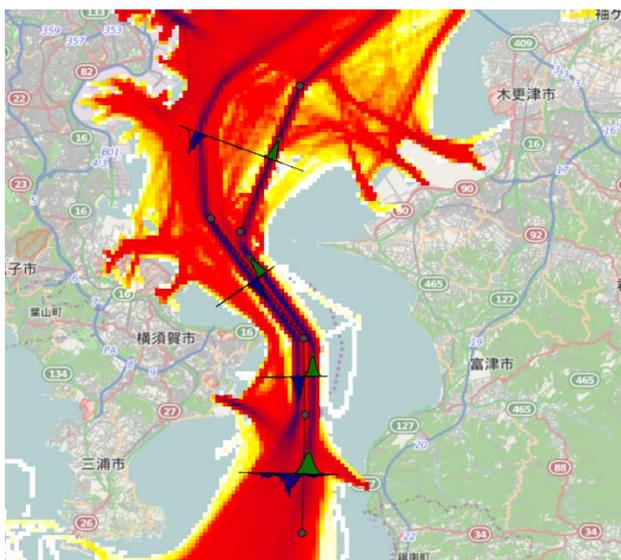


図 4-2(a) 東京湾の AIS データ描画

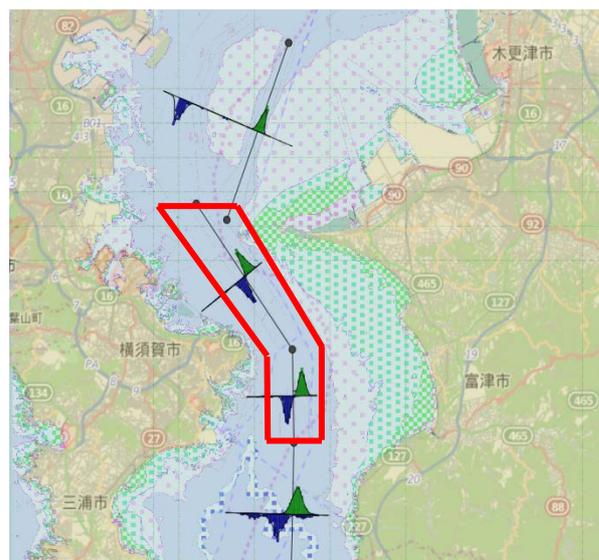


図 4-2(b) 東京湾の AIS データによる交通流のヒストグラム

表 4-1 海難の種類

海難の種類	
衝突	船舶が、航行中又は停泊中の他の船舶と衝突又は接触し、いずれかの船舶に損傷を生じた場合をいう。
衝突（単）	船舶が、岸壁、棧橋、灯浮標等の施設に衝突又は接触し、船舶又は船舶と施設の双方に損傷を生じた場合をいう。
乗揚	船舶が、水面下の浅瀬、岩礁、沈船等により乗り揚げ又は底触し、喫水線下の船体に損傷を生じた場合をいう。
沈没	船舶が海水等の浸入によって浮力を失い、船体が水面下に没した場合をいう。
浸水	船舶が海水の浸入などにより機関、積み荷などに濡れ損を生じたが、浮力を失うまでに至らなかった場合をいう。
転覆	荷崩れ、浸水、転舵等のため、船舶が復原力を失い、転覆又は横転して浮遊状態のままとなった場合をいう。
行方不明	船舶が行方不明になった場合をいう。
火災	船舶で火災が発生し、船舶に損傷を生じた場合をいう。ただし、他に分類する海難の種類に起因する場合は除く。
爆発	積荷等が引火、化学反応等によって爆発し、船舶に損傷を生じた場合をいう。
機関損傷	主機、補機が故障した場合、又は燃料、空気、電気等の各系統が損傷した場合をいう。
属具損傷	船体には損傷がなく、船舶の属具に損傷を生じた場合をいう。
施設損傷	船舶が船舶以外の施設と衝突又は接触し、船舶には損傷はないものの、当該施設に損傷を生じた場合をいう。
死傷等	船舶の構造、設備又は運用に関連し、乗組員、旅客等に死傷又は行方不明を生じた場合をいう。ただし、他に分類する海難の種類に起因する場合は除く。
安全阻害	船舶には損傷がなかったが、貨物の積み付け不良のため、船体が傾斜して転覆等の危険な状態が生じた場合のように、切迫した危険が具体的に発生した場合をいう。
運航阻害	船舶には損傷がなかったが、燃料・清水の積み込み不足のために運航不能におちいった場合のように、船舶の通常の運航を妨げ、時間的経過に従って危険性が増大することが予想される場合をいう。
遭難	海難の原因、態様が複合していて他の海難の種類の一に分類できない場合、又は他の海難の種類いずれにも該当しない場合をいう。

4.4 IWRAPの理論

4.4.1 IWRAPの理論の背景

IWRAPの基礎となっている海域における危険度の評価は、1970年代から藤井らが統計学的手法を用いて行ってきた。藤井らが行った研究成果^{(2)~(13)}が、IWRAPの理論のベースとなっている。

海上交通事故の統計解析には、海上交通実態を調査した資料が不可欠である。藤井らが理論を提唱した1970年代は、海上保安庁と日本海難防止協会が全国の主要海域で実施しているレーダや目視による通航船舶実態調査が頼りだった。通航船舶実態調査は、平成20年からは、調査結果のみの書籍発行は行なわれなくなり、海上保安庁が年1回発行する「海難の現況と対策について」に収録されている。AISの搭載船が増えたことで、船舶の運航実態がより簡便に、そして明確にすることができるようになった。それに伴い、藤井らの考え方は利用範囲が拡大し、交通流の解析に用いられるようになってきた。藤井らの考え方を利用した研究に、河島ら^{(14)~(16)}の研究がある。

4.4.2 理論の概要

基本的なリスク計算の考え方⁽¹⁷⁾は、航路の形状・船舶交通量をもとにした数学モデルによる衝突確率(以降 P_c と表記する)に幾何学的衝突回数(以降 N_g と表記する)を掛け算したものである。衝突、座礁の頻度(衝突回数ともいう。以降 λ_{col} と表記する)の計算式を示す。

$$\lambda_{col} = P_c \times N_g$$

P_c は、予め計算され設定された値である。 P_c の求め方については、4.5 節で述べる。一方、 N_g は、解析対象とする海域に存在する船舶数と船舶の分布の速力、幅、長さなどを元に計算を行うため、変動する値である。 N_g の求め方については、4.6 節で述べる。IWRAP では、 λ_{col} の値を何年に1度衝突するリスクがあるかを示す「Years between incidents」と1年に何回衝突リスクがあるかを示す「Incidents/Year」の2つで計算することができる。

4.5 Pc の値について

4.5.1 Pc 値の計算と使用値

Pc は、危険な状況下で避航操船をしない確率であると定義されている。なぜなら、藤井らの理論では、船舶がランダムに存在し、相手船に気づき避航操船を行なう以前の状態を前提としているためである。

IWRAP で使われている衝突確率の理論は、1970 年代に藤井らとマクダフによって考え出された。理論のベースとなっているのが、古典的な確率モデルの幾何学的確率(算術的確率)⁽¹⁸⁾である。幾何学的確率とは、ある試行により起こり得る全ての結果が N 個あり、どの根元事象の起こり方も同じ確からしさを持つものとする。この時、ある事象 A の起こる場合の数を N_A とすると、下記の式が定義できる。

$$P(A) = \frac{N_A}{N}$$

このことから、P(A)は、下記の式のように表すことができる。

$$P(A) = \frac{\text{A に含まれる標本点の数}}{\text{標本空間に含まれる標本点の数}}$$

この考え方を船舶に適応すると、下記の式のように表せる。

$$\text{対象とする海域の衝突発生確率} = \frac{\text{衝突事故が起こる件数}}{\text{海域に存在する船舶の隻数}}$$

上記の式を元にして、海域ごとの特性を求めたのが Pc である。現在は、藤井らが計算した値をもとに、IALA が定めた国際基準の値を使用している。表 4-2 に現在使用している Pc を示す。

Pc は、海域に存在する船舶数と衝突事故件数によって決められるため、藤井らが、1970 年～1980 年代の交通量を使用し計算した現在の値が、現在の交通実態を反映していない可能性を考慮し、検証を行うことにした。検証結果を 4.5.2 項に示す。

表 4-2 国際基準の Pc の値

衝突の種類		Pc
衝突	正面衝突(Head on Collision)	5.00E-05
	屈曲部衝突(Bend Collision)	1.30E-04
	交差衝突(Crossing Collision)	1.30E-04
	合流衝突(Merging Collision)	1.30E-04
	追い越し衝突(Overtaking Collision)	1.10E-04
	海洋構造物との衝突(Allison)	1.60E-06
	設定したエリアでの動力船との衝突(Area moving)	5.00E-05
	設定したエリアでの錨泊船との衝突(Area stationary)	5.00E-05
座礁	座礁(Grounding)	1.60E-04

4.5.2 Pc の値の検証

4.5.1 項で下記に示した式を元に Pc が計算されていると述べた。本項では、この式を用いて 1970 年～1980 年代と現在を比較することにした。衝突が起こる件数は、海難事故発生件数を用い、海域に存在する船舶の隻数は、船舶通航実態調査^{(19)～(29)}を用いることにした。海難事故発生件数は、内閣府が公表している平成 28 年版交通安全白書⁽³⁰⁾を用いた。

$$\text{対象とする海域の衝突発生確率} = \frac{\text{衝突事故が起こる件数}}{\text{海域に存在する船舶の隻数}}$$

船舶通航実態調査は、海上保安庁が、毎年各管区で実施している船舶の通航量を調査するものである。双眼鏡等を使用した目視による 48 時間連続観測で調査海域の任意の点を結んだ線上を横切った船舶数を積算することで調査する。本論文で扱う海域は、浦賀水道、伊良湖水道、明石海峡、来島海峡、備讃瀬戸東部、備讃瀬戸西部の 6 つである。海上保安庁で保管されていた最も古い船舶通航実態調査報告書は、昭和 51 年度(1976 年)であったため、昭和 51 年から昭和 56 年の 6 年間で平成 21 年から平成 26 年の 6 年間で比較することにした。次の頁の表 4-3 に昭和 51～56 年と平成 21～26 年の船種別通航量の表を示す。表 4-3 の数値から貨物船等とタンカーの項目を各年で合計し、貨物船とタンカーの海難件数を割り、対象とする海域の衝突発生確率を求めた。計算した衝突発生確率を表 4-4 に示す。衝突発生確率が最も高かったのは、昭和 52 年の 0.31 で、最も低かったのは、平成 23 年の 0.13 だった。表 4-4 より、昭和 50 年代より平成 20 年代の方が海難事故発生確率が小さいことが分かる。このことから、Pc は、変動する可能性があることが分かった。

しかし、国際基準の値であるからこそ、世界各国の海域のリスクと比較が可能であるため、藤井らの計算した Pc の値を本論文では使うことにした。

表 4-3 昭和 51～56 年と平成 21～26 年の船種別通航量

	船種	昭和51年	昭和52年	昭和53年	昭和54年	昭和55年	昭和56年	平成21年	平成22年	平成23年	平成24年	平成25年	平成26年
浦賀水道	貨物船等	464	469	563	468	407	468	356	334	279	328	328	355
	タンカー	152	155	174	168	149	171	107	126	101	138	132	146
	旅客船等	26	26	25	22	18	24	16	14	10	12	15	9
	漁船	78	112	104	62	80	76	0	8	10	50	45	44
伊良湖水道	貨物船等	145	168	190	179	209	211	241	212	217	198	196	171
	タンカー	49	65	78	67	66	79	63	44	59	63	71	73
	旅客船等	72	59	46	54	37	44	3	1	3	1	3	1
	漁船	853	997	807	804	983	905	302	374	214	333	155	102
明石海峡	貨物船等	791	664	813	842	693	712	316	402	381	360	375	353
	タンカー	207	140	145	168	155	155	100	79	69	74	80	81
	旅客船等	236	234	257	239	246	260	131	95	90	106	107	108
	漁船	640	433	714	744	656	470	293	252	188	221	289	241
備讃瀬戸東部	貨物船等	893	810	879	918	863	774	414	375	380	347	342	311
	タンカー	204	124	162	166	214	256	165	134	117	112	101	103
	旅客船等	401	371	410	403	394	402	108	113	108	73	71	58
	漁船	110	54	101	96	93	117	24	22	9	10	31	37
備讃瀬戸西部	貨物船等	495	446	477	465	466	458	341	261	354	281	306	362
	タンカー	164	146	190	203	213	180	109	127	113	140	96	120
	旅客船等	137	113	145	136	139	139	35	33	33	32	29	33
	漁船	127	110	214	125	152	83	30	10	33	45	42	68
来島海峡	貨物船等	364	342	365	384	344	322	273	291	247	278	266	276
	タンカー	130	116	124	134	125	149	70	65	72	58	68	85
	旅客船等	324	322	318	302	305	293	85	90	73	55	52	44
	漁船	321	292	355	298	245	213	171	90	120	19	123	47
合計	7383	6768	7656	7447	7252	6961	3753	3552	3280	3334	3323	3228	

表 4-4 海難件数と海難事故発生確率

	昭和51年	昭和52年	昭和53年	昭和54年	昭和55年	昭和56年	平成21年	平成22年	平成23年	平成24年	平成25年	平成26年
海難件数(貨物船)	985	929	789	789	828	740	343	341	240	314	263	275
海難件数(タンカー)	227	207	198	186	179	148	83	88	82	69	74	79
船舶数 (貨物船等・タンカー)	4058	3645	4160	4162	3904	3935	2555	2450	2389	2377	2361	2436
海難事故発生確率	0.30	0.31	0.24	0.23	0.26	0.23	0.17	0.18	0.13	0.16	0.14	0.15

4.6 Ng の値について

4.6.1 IWRAP での見合い関係の定義

Ng は、交通量から衝突または、座礁する可能性のある船舶数と定義されている。4.3 節で述べたように本論文では、衝突を扱う。衝突における Ng は見合い関係ごとに計算される。表 4-5 に海上衝突予防法などで使われている見合い関係との対応を示す。この分類は、航路の形状を優先している。4.6.2 項から 4.6.6 項に各衝突の形状と Ng の計算方法を示す。

表 4-5 IWRAP での衝突と海難における見合い関係

IWRAP	見合い関係
正面衝突	行き合い
追い越し衝突	追い越し衝突
交差衝突	横切り
屈曲部衝突	
合流衝突	

4.6.2 正面衝突の Ng の値

正面衝突は、図 4-3 が示すような見合い関係のことと定義されている。下の式に正面衝突における Ng 値の求め方を示す。

$$Ng = Lw \sum_{i,j} PG_{i,j} \frac{v_{ij}}{v_i v_j} (Q_i Q_j)$$

正面衝突の Ng 値は、この交通分布 $\delta_1 \cdot \delta_2$ と、船間距離 μ から求めた $PG_{i,j}$ 、水路の中心線の長さ Lw 、互いの船舶の相対船速 V_{ij} 、単位時間あたりの通過隻数である $Q_i \cdot Q_j$ から求められる。i と j は図 4-3 中に示す船舶を指す。

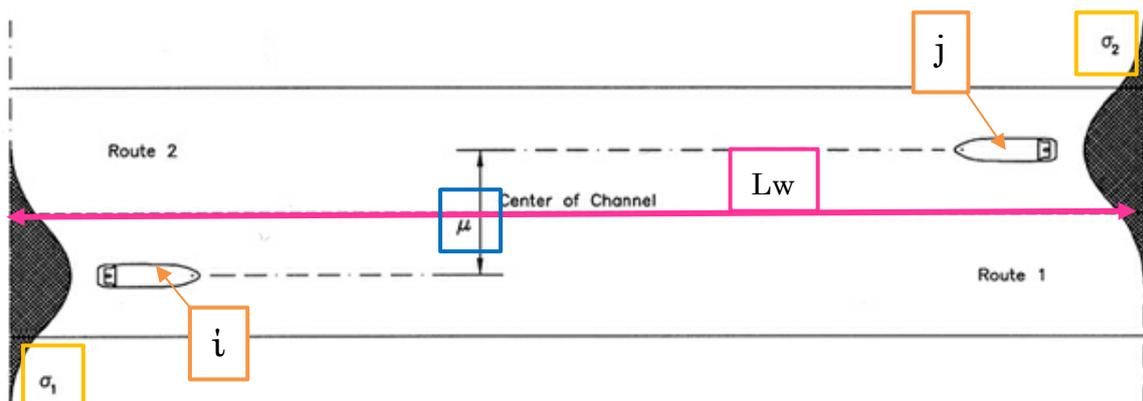


図 4-3 正面衝突の定義

図 4-4 は、IWRAP における正面衝突を簡易的にあらわしたものである。交通分布 $\delta_1 \cdot \delta_2$ は正規分布として考えられている。PG_{i,j} は、下記の式で求められる。

$$PG_{ij} = \phi\left(\frac{\overline{B}_{ij} - \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right) - \phi\left(-\frac{\overline{B}_{ij} + \mu_{ij}}{\delta_{ij}}\right)$$

$$\delta_{ij} = \sqrt{\delta_i^2 + \delta_j^2}$$

δ_i 、 δ_j : $\delta_1 \cdot \delta_2$ の分布の標準偏差 \overline{B}_{ij} : 船幅 μ_{ij} : 船間距離

\overline{B}_{ij} は、下記の式のように、2 船の平均値を用いる。

$$\overline{B}_{ij} = (B_i + B_j) / 2$$

相対船速 V_{ij} は、下記の式で求められる。

$$V_{ij} = V_i + V_j$$

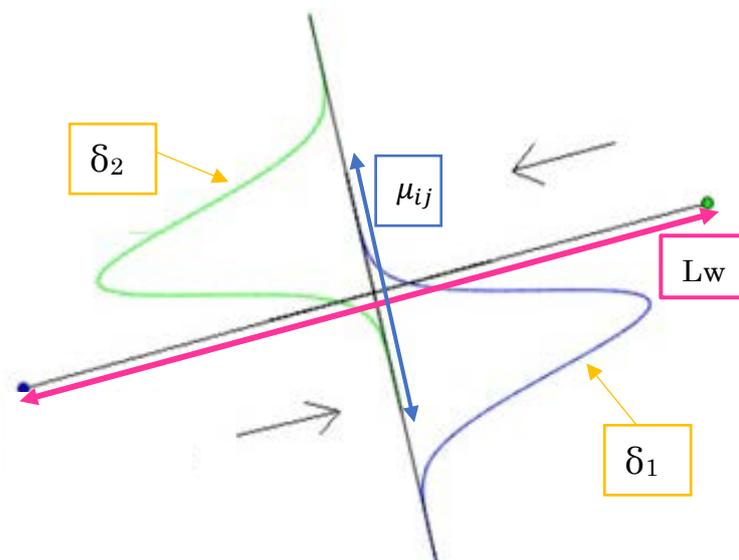


図 4-4 交通分布と正面衝突

4.6.3 追い越し衝突の Ng の値

追い越し衝突は、図 4-5 が示すような見合い関係のことと定義されている。追い越し衝突の Ng の値の算出に用いる計算式は、4.6.2 項の正面衝突の式と同じだが、PG_{i,j} における船間距離 μ_{ij} が 0 になる。そのため、PG_{i,j} は、下記の式で求められる。

$$PG_{ij} = \Phi\left(\frac{\overline{B}_{ij}}{\delta_{ij}}\right) - \Phi\left(-\frac{\overline{B}_{ij}}{\delta_{ij}}\right)$$

δ_i, δ_j : $\delta_1 \cdot \delta_2$ の分布の標準偏差 \overline{B}_{ij} : 船幅

また、相対船速 V_{ij} は、下記の式で求められる。

$$V_{ij} = V_i - V_j$$

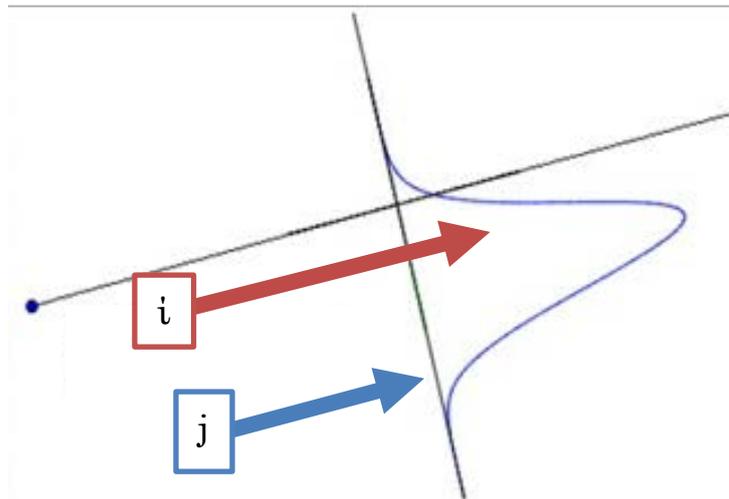


図 4-5 交通分布と追い越し衝突

4.6.4 交差衝突の Ng の値

交差衝突は、図 4-6 が示すような見合い関係のことと定義されている。追い越し衝突の Ng の値の算出に用いる計算式を下記に示す。図 4-6 は、交差角(θ)が 90 度の時を示している。この時、横切り衝突は、図 4-6 の紫の点線で囲ったエリアで起こると考えられている。

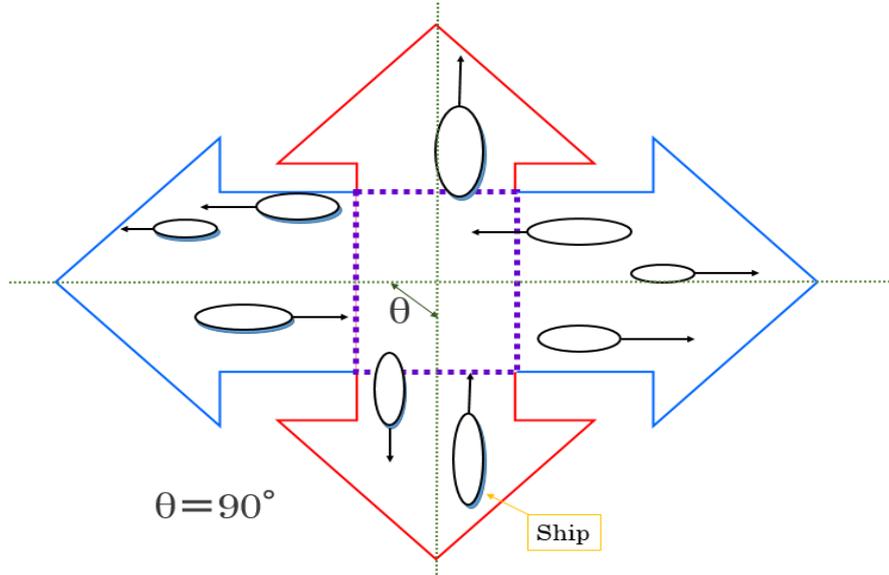


図 4-6 横切り衝突の定義

$$Ng = \sum_{i,j} \frac{Q_i Q_j}{v_i v_j} D_{ij} V_{ij} \frac{1}{\sin \theta}$$

$Q_i \cdot Q_j$ は単位時間あたりの通過隻数である。 θ は航路の交差角($10^\circ < |\theta| < 170^\circ$)である。 D_{ij} は幾何学的な衝突直径である。幾何学的な衝突直径は、図 4-7 のように定義され、下記の式で求める。

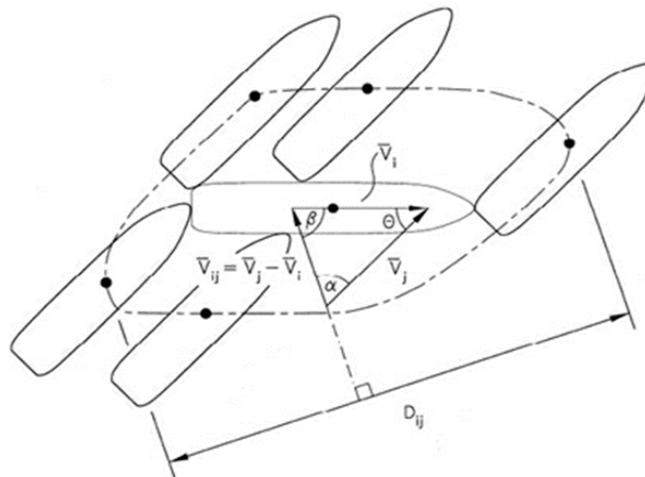


図 4-7 幾何学的な衝突直径

$$D_{ij} = \frac{L_i \cdot V_j + L_j \cdot V_i}{V_{ij}} \sin \theta + B_j \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_i}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{1/2} + B_i \left\{ 1 - \left(\sin \theta \cdot \frac{V_j}{V_{ij}} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

L_i, L_j :船舶の長さ、 B_i, B_j :船幅、 V_i, V_j :船速

相対船速 V_{ij} は図 4-8 のように定義され、下記の式で求める。

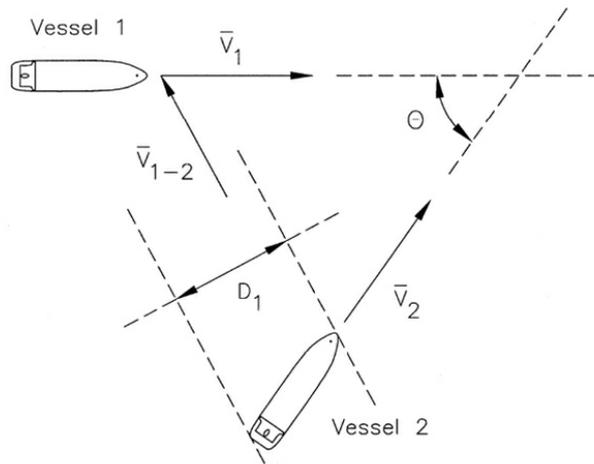


図 4-8 横切り衝突での V_{ij} の定義

$$V_{ij} = \sqrt{V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta}$$

4.6.5 屈曲部衝突の N_g の値

屈曲部衝突は、図 4-9 が示すような見合い関係のことと定義されている。この屈曲部衝突は、航路に沿ったリスクを計算する IWRAP 特有の衝突定義の 1 つである。2 つの直線航路を合わせたものとあるが、公表されている理論に明確な式の記載はない。行き合いの生じない一方通航であることから、追い越しの N_g 値算出の式を 2 つ合計して計算されていると推測している。

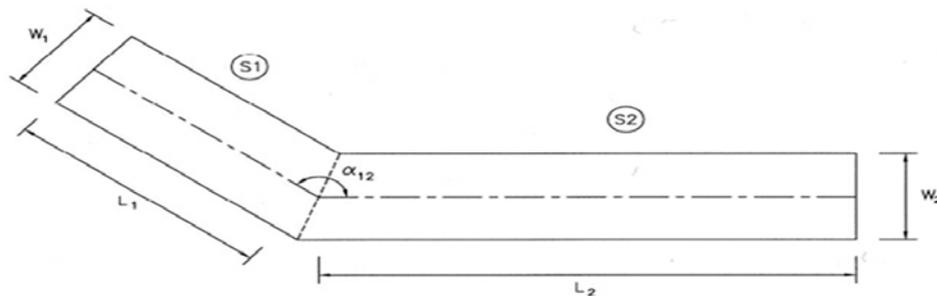


図 4-9 屈曲部衝突の定義

4.6.6 合流衝突の Ng の値

合流衝突は、図 4-10 が示すような見合い関係のことと定義されている。この合流衝突は、航路に沿ったリスクを計算する IWRAP 特有の衝突定義の 1 つである。合流衝突と 4.6.4 項で述べた交差衝突との違いは、図 4-10 中の赤の矢印が示す部分があるかないかの違いである。合流衝突の Ng の計算式は、4.6.4 項と同じ式を用いて計算される。

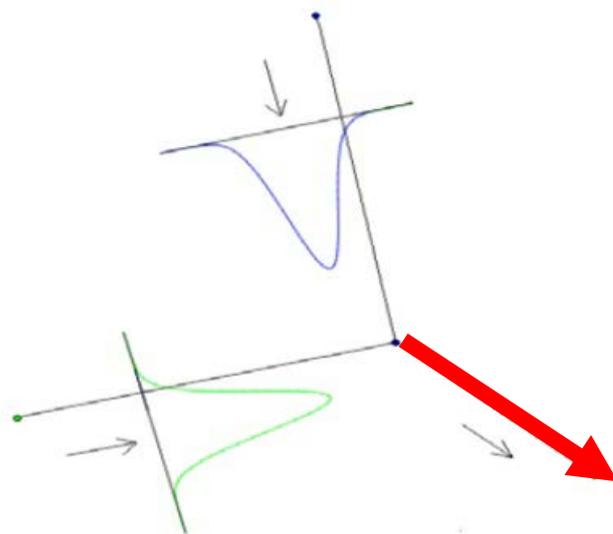


図 4-10 合流衝突の定義

4.7 IWRAPに必要なデータ量の検討

4.7.1 検討した海域(東京湾)について

東京湾は、図 4-11 の平成 26 年度の主要な海域における船舶通航実態調査の結果より、3 番目の通航隻数をほこる日本有数の輻輳海域であることが分かる。

また、現在、東京湾を航行する際に長さが 50 メートル以上の船舶は、海上交通安全法に基づき、「浦賀航路」と「中ノ瀬航路」の 2 つの設定された航路を航行する義務が生じる。浦賀航路および、中ノ瀬航路の位置は、次ページの図 4-12 に示す。

東京湾の航路の航法として、浦賀水道航路は、右側通航と定められており、航路の中央より右側を航行しなければならない。中ノ瀬航路は、北の方向への一方通航と定められており、北の方向に航行しなければならない。ただし、中ノ瀬航路については、水深が 23 メートルと浅いため、喫水 20 メートル以上の船舶については、航路航行義務が免除されている。長さが 50 メートル未満の船舶には、航路航行義務はないが、航路を航行する場合には、以下に示す避航における交通ルール⁽³¹⁾を 50 メートル以上の船舶と同じく、守らなければならないとされている。

- ① 航路外から航路に入り、航路から航路外に出、もしくは航路を横断しようとし、又は航路をこれに沿わないで航行している船舶（漁ろう船等を除く。）は、航路をこれに沿って航行している他の船舶と衝突するおそれがあるときは、当該他の船舶の進路を避けなければなりません。（この場合において、海上衝突予防法第 9 条第 2 項、第 12 条第 1 項、第 13 条第 1 項、第 14 条第 1 項、第 15 条第 1 項前段及び第 18 条第 1 項（第 1 号に係る部分に限る。）の規定は、当該他の船舶について適用されません。）

- ② 航路外から航路に入り、航路から航路外に出、もしくは航路を横断しようとし、もしくは航路をこれに沿わないで航行している漁ろう船等又は航路で停留している船舶は航路をこれに沿って航行している巨大船（長さ 200m 以上の船舶をいう。）と衝突するおそれがあるときは、当該巨大船の進路を避けなければなりません。（この場合において、海上衝突予防法第 9 条第 2 項及び第 3 項、第 13 条第 1 項、第 14 条第 1 項、第 15 条第 1 項前段並びに第 18 条第 1 項（第 3 号及び第 4 号に係る部分に限る。）の規定は、当該巨大船について適用されません。）

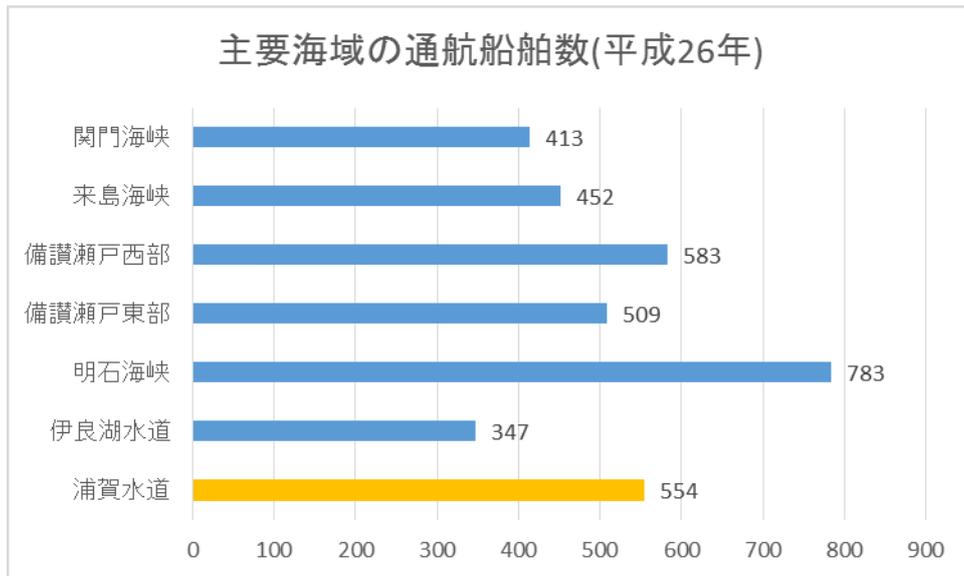


図 4-11 平成 26 年主要海域の通航船舶数

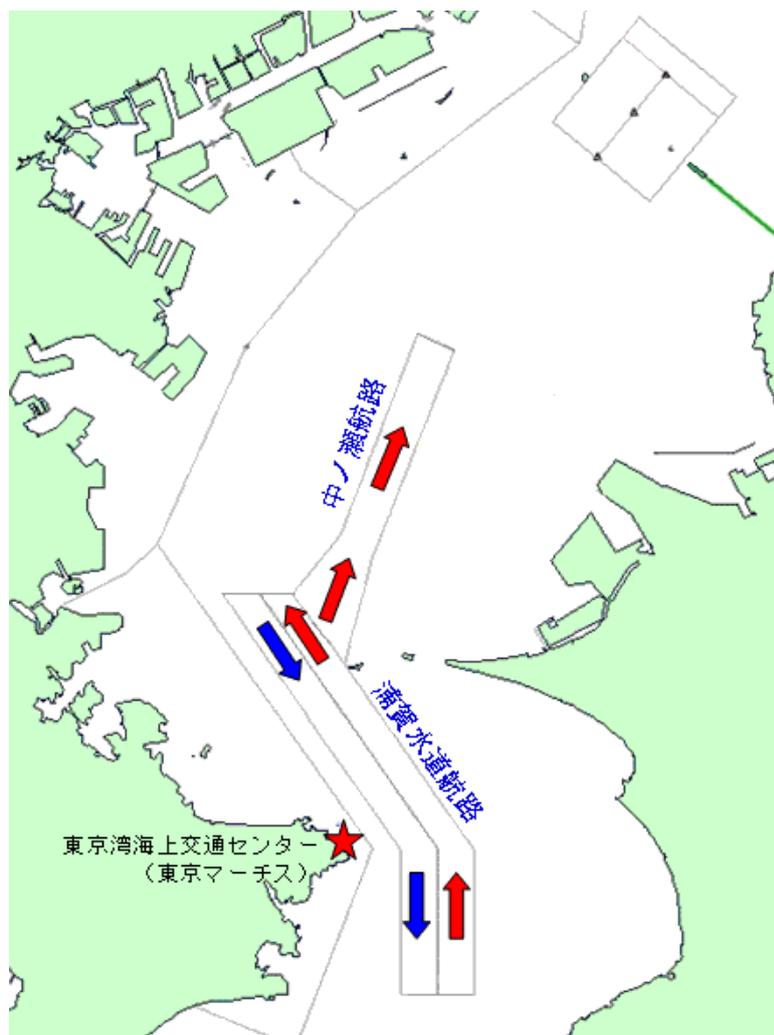


図 4-12 東京湾の航路

4.7.2 IWRAP 内でのデータの取り扱いと解析目的

IWRAP におけるリスクの数値は、何年に1度(Years between incident)または、1年に何回(Incidents / Year)の形式⁽³²⁾で出力される。本ソフトでは、読み込んだデータが1年分でない場合に、得られたデータから1年分に換算する。精度よく解析するために、データ量(標本数)は多い方がよいと本ソフトのトレーニングを行なっているIALAの担当者が述べている。IALAでは、リスクを評価する場合、3ヶ月間のデータを使って解析することを推奨している。

しかし、3ヶ月分のデータをいつでも確保できるわけではない上に、データを読み込み、解析に至るまでの時間がかかる。データの読み込みと読み込んだデータの船舶位置を地図上に描画(以下プロットと表記)する。データの読み込みとプロットにかかる時間を表4-6に示す。表4-6より、データ量が増えるほど、解析に至るまでに必要となる時間が増えていくことが分かる。

そのため、IWRAPの解析に必要なデータ量を検討するために、東京湾のAISデータを用いて、1日、3日、1週間、2週間、3週間、1ヶ月、2ヶ月、3ヶ月、12ヶ月のデータ量で見合い関係ごとと海域全体のリスクの計算を行い、比較することにした。そして、IALAの推奨している3ヶ月のデータ量で算出された値と、12ヶ月のデータ量で算出された値を基準値として比較することにした。3ヶ月だけでなく12ヶ月も基準値としたのは、IWRAPのリスク計算では、読み込んだデータ量を1年間に換算して使用しているためである。使用したデータの期間を表4-7に示す。

表 4-6 IWRAP のデータ量と読み込み時間および描画時間

データ量	読み込み時間	プロット時間
1日(約230MB)	3分	5分
1週間(約1.6GB)	22分	30分
1ヶ月(約7.4GB)	1時間半	1時間40分

表 4-7 使用したデータの期間

データ量	データ期間
1日	2014/1/26
3日	2014/1/24~1/26
1週間	2014/1/25~1/31
2週間	2014/1/18~1/31
3週間	2014/1/11~1/31
1ヶ月	2014/1/1~1/31
2ヶ月	2014/1/1~2/28
3ヶ月	2014/1/1~3/31
12ヶ月	2014/1/1~12/31

4.7.3 解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスク値の変化

表 4-8 では、海域全体のリスクの値から、基準値との数値の差と、差を割合(%)の 2 つを求め示した表である。各見合い関係ごとの表は、Appendix.3 に示す。表 4-8 より、基準値 3 ヶ月との差が最も小さいのは、2 ヶ月となり、基準値 12 ヶ月との差が最も小さいのは、1 ヶ月となった。統計学における許容される誤差の区間は、±5%とされている。このことから、3 ヶ月と 12 ヶ月ともに±5%以内であることが望ましいと考えた。

表 4-8 より、3 ヶ月との差が 4.6%で、12 ヶ月との差が-1.1%である 1 ヶ月がこの範囲に該当する。海域全体のリスクの解析に使用するデータ量として、3 ヶ月を用いるのが難しい場合に用いて問題ないのではないかと考える。

表 4-8 解析対象日数に対する海域全体のリスク

	リスクの値	3 ヶ月との差		12 ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1 日	1.133	0.094	7.7%	0.025	2.2%
3 日	1.285	-0.058	-4.7%	-0.127	-11.0%
1 週間	1.093	0.134	10.9%	0.065	5.6%
2 週間	1.098	0.129	10.5%	0.06	5.2%
3 週間	1.136	0.091	7.4%	0.022	1.9%
1 ヶ月	1.171	0.056	4.6%	-0.013	-1.1%
2 ヶ月	1.255	-0.028	-2.3%	-0.097	-8.4%
3 ヶ月	1.227	-	-	-0.069	-6.0%
12 ヶ月	1.158	0.069	5.6%	-	-

表 4-8 で示した 1 ヶ月分のデータは、1 月である。月を変えても誤差が少ないのかを検証するため、1 月、4 月、7 月、10 月の 4 か月分のデータにおいても基準値との比較を行った。結果を表 4-9(a)から表 4-9(f)に示す。表 4-9(a)では、海域全体のリスクを示した。表 4-9(a)より、1 月が最も基準値との差が小さかった。表 4-9(b)から(f)では、見合い関係ごとのリスクの値の基準値との差を示した。表 4-9(b)より、正面衝突のリスクでは、10 月が最も基準値との差が小さかった。表 4-9(c)より、追い越し衝突のリスクでは、3 ヶ月とは 7 月が最も基準値との差が小さく、12 ヶ月とは、1 月が最も基準値との差が小さかった。表 4-9(d)より、追い越し衝突のリスクでは、3 ヶ月とは 10 月が最も基準値との差が小さく、12 ヶ月とは、1 月が最も基準値との差が小さかった。表 4-9(e)より、屈曲部衝突のリスクでは、3 ヶ月とは 7 月が最も基準値との差が小さく、12 ヶ月とは、1 月が最も基準値との差が小さかった。表 4-9(f)より、合流衝突のリスクでは、3 ヶ月とは 10 月が最も基準値との差が小さく、12 ヶ月とは、7 月が最も基準値との差が小さかった。

以上の結果から、月ごとにリスクの値は変化しており、1 ヶ月分のデータであっても基準値との値の差は大きいものもあったことが分かった。そのため、できる限り基準値である 3 ヶ月分のデータを用いるのが望ましいと考える。

表 4-9(a) 月別の海域全体のリスク

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	1.171	0.056	4.6%	-0.013	-1.1%
4月	1.066	0.161	13.1%	0.092	7.9%
7月	1.09	0.137	11.2%	0.068	5.9%
10月	1.313	-0.086	-7.0%	-0.155	-13.4%

表 4-9(b) 月別の見合い関係ごとのリスク(正面衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	17.64	2.86	14.0%	2.28	11.4%
4月	16.64	3.86	18.8%	3.28	16.5%
7月	16.12	4.38	21.4%	3.8	19.1%
10月	19.47	1.03	5.0%	0.45	2.3%

表 4-9(c) 月別の見合い関係ごとのリスク(追い越し衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	8.495	-1.5	-21.4%	0.137	1.6%
4月	5.819	1.176	16.8%	2.813	32.6%
7月	6.61	0.385	5.5%	2.022	23.4%
10月	8.003	-1.008	-14.4%	0.629	7.3%

表 4-9(d) 月別の見合い関係ごとのリスク(交差衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	9.361	24.159	72.1%	-0.91	-10.8%
4月	26.71	6.81	20.3%	-18.259	-216.1%
7月	10.06	23.46	70.0%	-1.609	-19.0%
10月	28.06	5.46	16.3%	-19.609	-232.0%

表 4-9(e) 月別の見合い関係ごとのリスク(屈曲部衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	1.758	-0.066	-3.9%	-0.025	-1.4%
4月	1.511	0.181	10.7%	0.222	12.8%
7月	1.661	0.031	1.8%	0.072	4.2%
10月	1.827	-0.135	-8.0%	-0.094	-5.4%

表 4-9(f) 月別の見合い関係ごとのリスク(合流衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1月	257.8	118.7	31.5%	208	44.7%
4月	149.2	227.3	60.4%	316.6	68.0%
7月	467.9	-91.4	-24.3%	-2.1	-0.5%
10月	374.5	2.0	0.5%	91.3	19.6%

4.7.4 解析対象日数に対する航路筋におけるリスクの変化

図 4-13(a)から図 4-13(h)は、計算した海域全体のリスクの値を航路筋に沿って表示した図である。リスクが高い部分は順に赤、オレンジ、低い部分は青や白となっている。図 4-13(b)から図 4-13(h)を(図中の点線黒丸の部分)比較すると、3日以上のデータ量の図に示される海域の浦賀水道の航路筋のリスクの高い部分が一致していることが分かる。しかし、図 4-13(b)から図 4-13(h)の中ノ瀬航路の沖の部分(図中の実線黒四角の部分)は異なっている。

以上のことから、多少の違いはあるが、高いリスクを持つ海域は、ほぼ適切な値が求められ、図示できることが分かった。

しかし、データ量が、IALA が基準値としている 3ヶ月に満たない場合には、海域のリスクの値には、表 4-8 に示すような誤差が存在することを考慮し、結果を提示することが必要と考える。



図 4-13(a) 解析対象日数(1日)



図 4-13(b) 解析対象日数(3日)

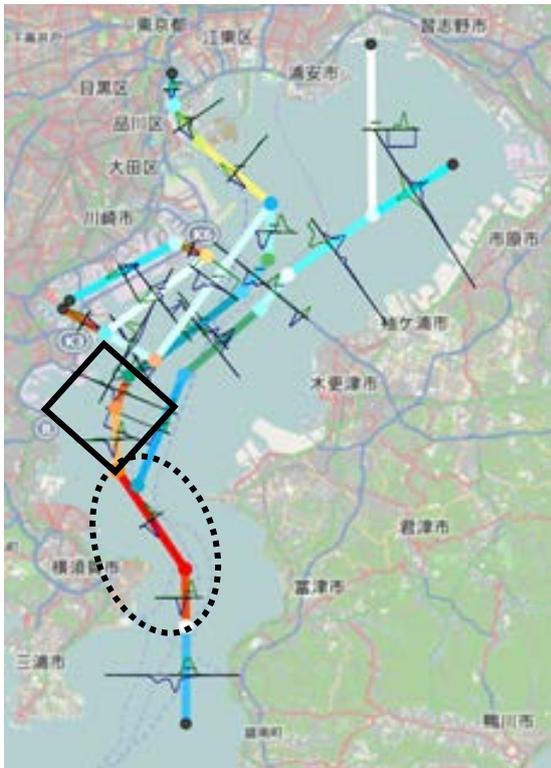


図 4-13(c) 解析対象日数(1週間)

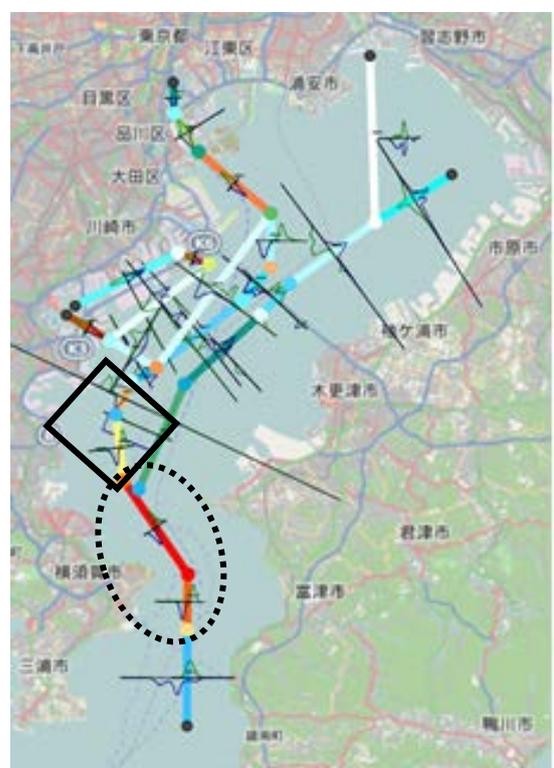


図 4-13(d) 解析対象日数(2週間)



図 4-13(e) 解析対象日数(3週間)

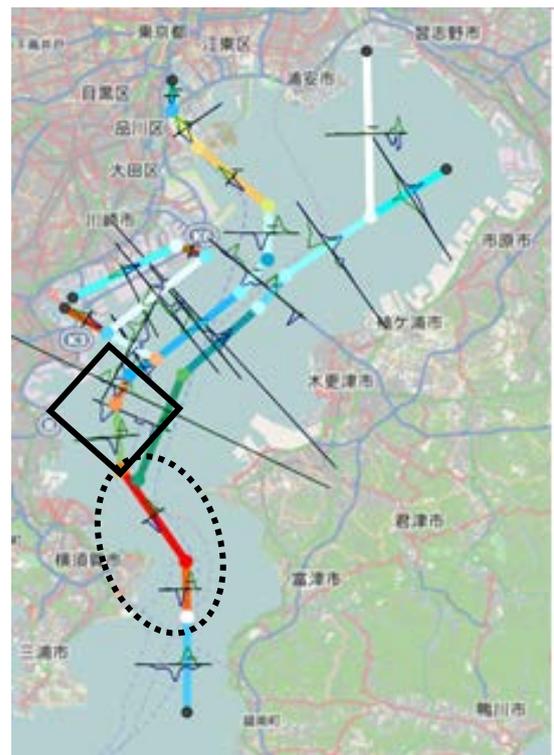


図 4-13(f) 解析対象日数(1ヶ月)



図 4-13(g) 解析対象日数(3ヶ月)

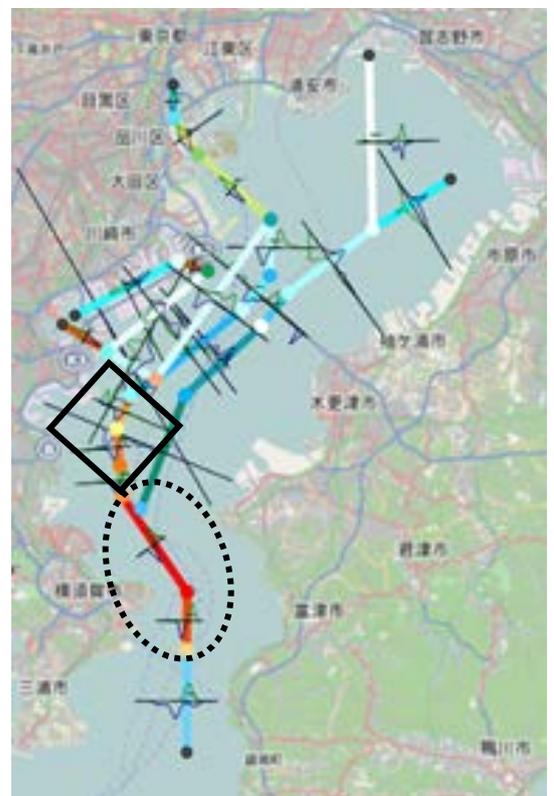


図 4-13(h) 解析対象日数(12ヶ月)

4.7.5 IWRAP に必要なデータ量の検討のまとめ

IWRAP を用いて解析を行う際、精度よく解析するために、データ量（標本数）は多い方がよい。IALA では、リスクを評価する場合、3 ヶ月間のデータを使って解析することを推奨しているが、3 ヶ月分のデータをいつでも確保できるわけではない上に、データを読み込み、解析に至るまでの時間がかかる。そのため、データ量をいくつか変えて検証を東京湾で行った。

その結果、リスクの計算結果を図示した図から、3 日以上データ量があれば、海域の航路筋のリスクの高い部分が一致していた。しかし、中ノ瀬の沖部分などに違いはある。多少の違いは、あるが、ほぼ適切な値が求められることが分かった。

一方で、個々の見合い関係のリスクの値は、解析対象期間によってばらつきが大きい結果となった。そのため、IALA が基準値としている 3 ヶ月に満たないデータ量によって求めた海域のリスクの値には、表 4-8 に示すような誤差が存在することを考慮する必要があると考える。

4.8 東日本大震災におけるリスク計算

4.8.1 東日本大震災の概要と解析目的

東日本大震災とは、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、三陸沖で発生したマグニチュード (M)9.0 の地震とそれに伴い発生した津波及び余震によって引き起こされた大規模災害のことである。この震災は、国内観測史上最大規模の地震であり、宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の 4 県 34 市町村で震度 6 強を観測した。また、東日本を中心に震度 6 弱から 1 を観測した。

この地震に伴い、福島県相馬で高さ 9.3m 以上、岩手県宮古で高さ 8.5m 以上の非常に高い津波を観測したほか、東北地方から関東地方北部の太平洋側を中心に、北海道から沖縄にかけての広い範囲で津波を観測した。甚大な被害が生じ、死者 14,786 人、行方不明 9,982 人、全壊家屋 83,586 棟などとなっている⁽³³⁾。

政府は、地震による震災の名称を「東日本大震災」とし、気象庁は、震災の原因となった巨大地震を「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」と命名している。

本論文では、震災のような通常と異なる状況についてリスクの検討が必要と考えた。東京湾における地震とそれに伴う影響をリスク計算することで明らかにするため、解析を行うことにした。一連の災害に対する名称は、以後「東日本大震災」と表記することにする。

4.8.2 東京湾における東日本大震災

東京湾に面したエリア(東京湾沿岸)では、震度 5 強から 4 が観測された。この地震の後、津波警報が発令されている。この文章中での東京湾沿岸は、気象庁の津波予報区の東京湾内湾と千葉県内房を指す。津波警報には、津波警報(大津波)、津波警報(津波)、津波注意報の 3 つがある。東京湾内湾は、地震発生から約 30 分後の 15 時 14 分に津波注意報が発令され、その 16 分後の 15 時 30 分に津波警報(津波)が発令され、津波警報(津波)が津波注意報に切り替わったのは、翌 12 日 3 時 20 分であり、津波注意報が解除されたのは、13 日 7 時 30 分であった。このことから、津波に対して気象庁が大いに警戒していたことが分かる。観測地点でばらつきがあるが、最終的に 0.94m から 1.72m の最大高さの津波が東京湾内で観測されている。

津波における直接の被害はなかったが、東日本大震災が東京湾沿岸にもたらした被害は 2 つある。1 つ目は、液状化現象である。液状化現象とは、地震が発生した際に地盤が液体状になる現象のことである⁽³⁴⁾。液状化の状態になると、水より重い比重を持つ建物が沈むまたは傾く。逆に水より軽い比重を持つ下水道のマンホールなどは、浮き上がる。東京都内の臨海部では江東区の 13 ヶ所、千葉県北部の埋立地にある千葉市や浦安市の住宅街に大きな被害を出した。浦安市などでは、排水溝や下水管を詰まらせ、地下の埋設管の破損など、地表付近に作られた上下水道、ガス、電気などの施設に影響が出ることにより、生活に支障が出た。2 つ目は、コンビナート火災である。千葉県市原市の石油コンビナートで発生した火災は、11 日後まで続いた⁽³⁵⁾。

4.8.3 船種別の交通流比較

通常と異なる状況下においての変化を調べるため、東日本大震災が発生した3月11日において、船種ごとの航跡に変化があるかを1週間前の3月4日と比較することにした。IWRAPに読み込んだAISデータより、東京湾に存在する船種は、General cargo ship、Oil products tanker、Support ship、Passenger shipと分かった。この4種類の船種ごとに航跡図を出力し、交通流の変化を比較する。図4-14(a)から図4-17(b)の図中の赤い線が航跡を表している。General cargo shipの航跡図を図4-14(a)、図4-14(b)、Oil products tankerの航跡図を図4-15(a)、図4-15(b)、Support shipの航跡図を図4-16(a)、図4-16(b)、Passenger shipの航跡図を図4-17(a)、図4-17(b)に示す。(a)は、3月4日の航跡図、(b)は、3月11日の航跡図を示す。

図4-14(a)、図4-14(b)の図中黒色の点線の丸の部分に注目すると、3月11日は、赤の丸い点が3月4日と比べて目立つのが分かる。赤い航跡の先端の丸い点は、避泊船を示している。このことから、General cargo shipは、3月11日において避泊船が多くなったことが分かる。

図4-15(a)、図4-15(b)の図中黒色の点線の丸の部分に注目すると、3月11日は、航跡が3月4日と比べて密集している。また、浦安や習志野付近の船舶は、離岸後錨泊しているのが航跡の線の先端が赤く丸になっていることから分かる。これは、Oil products tankerが、市原の石油コンビナート火災を受けて、離岸し、出港または、錨泊しているのではないかと考えられる。

図4-16(a)、図4-16(b)の図中黒色の点線の丸の部分を含め、全体的に航跡が3月4日と比較しても3月11日は多いことが分かる。これは、Support shipが、震災時に津波などの影響に備えて緊急に離岸する船舶へのエスコートやサポートを行ったためと考えられる。

図4-17(a)、図4-17(b)の図中黒色の点線の丸の部分に注目すると、3月11日は航跡が途中で途切れているものがある。Passenger shipに含まれる東京湾のクルーズを行なう観光船が航行を途中で中断したか、航行しなかったためと考える。一方で、神奈川県の高里浜と千葉県の上総を往復する東京湾フェリーの航跡は、3月4日と比較して航跡の乱れはある。これは、震災の影響によるものと考えられるが、具体的な理由について調査は行っていない。

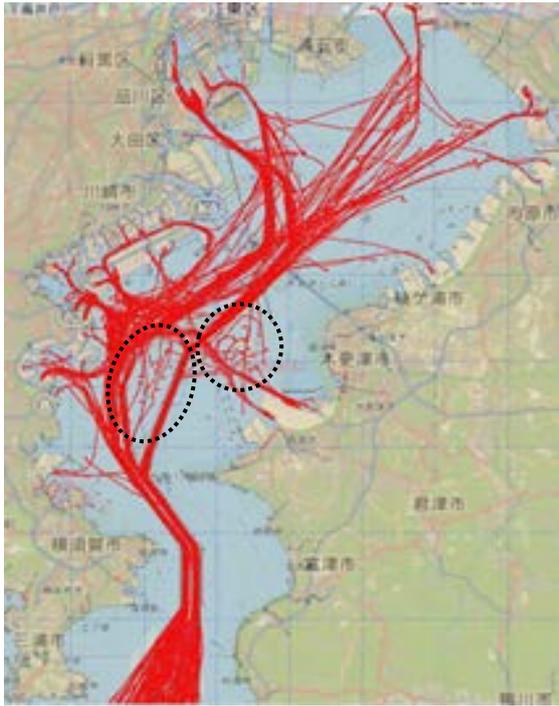


図 4-14(a)

General cargo ship(3月4日)

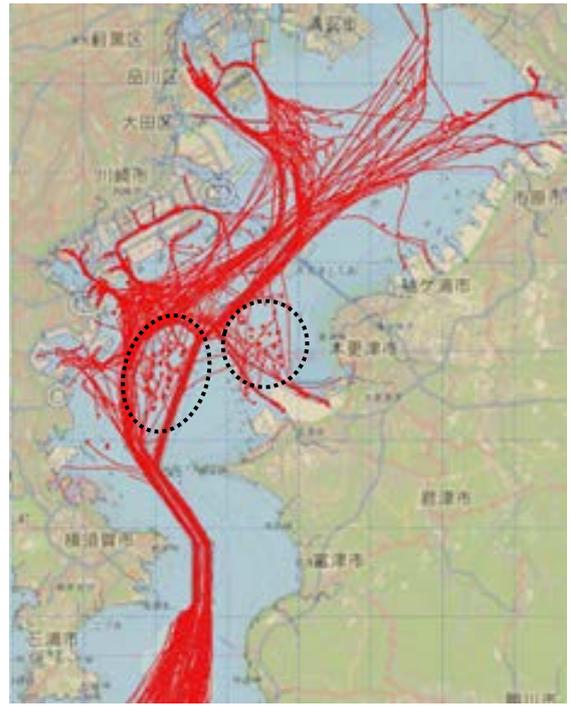


図 4-14(b)

General cargo ship(3月11日)

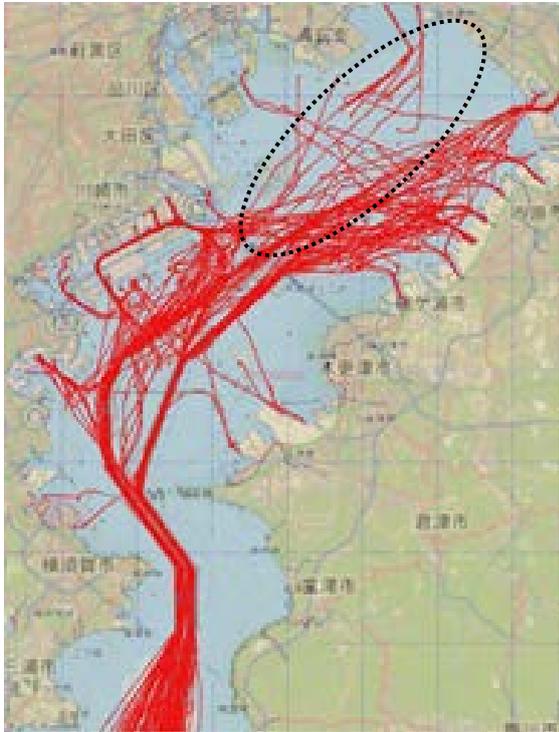


図 4-15(a)

Oil products tanker(3月4日)



図 4-15(b)

Oil products tanker(3月11日)

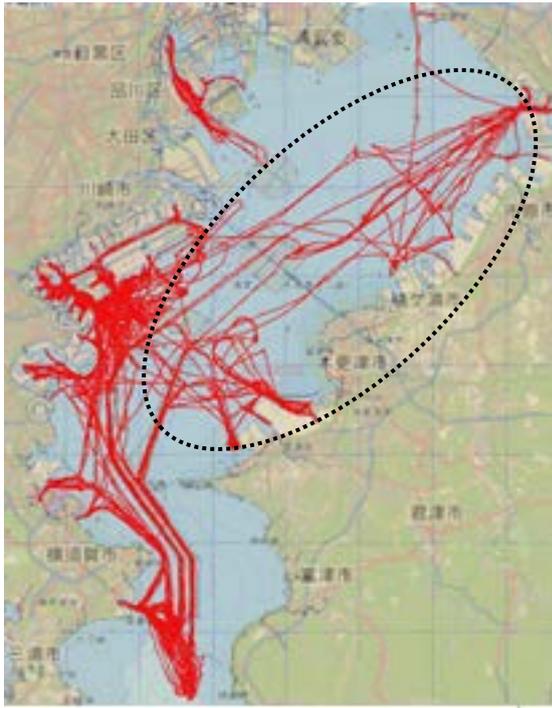


図 4-16(a)
Support ship(3月4日)

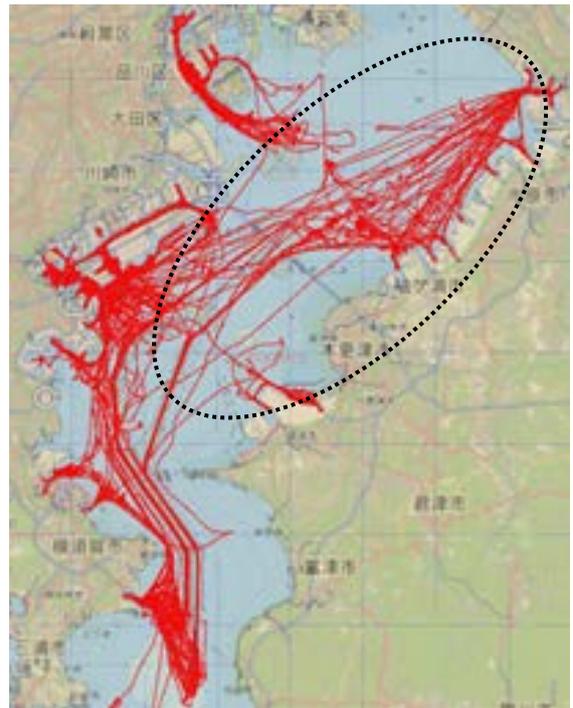


図 4-16(b)
Support ship(3月11日)

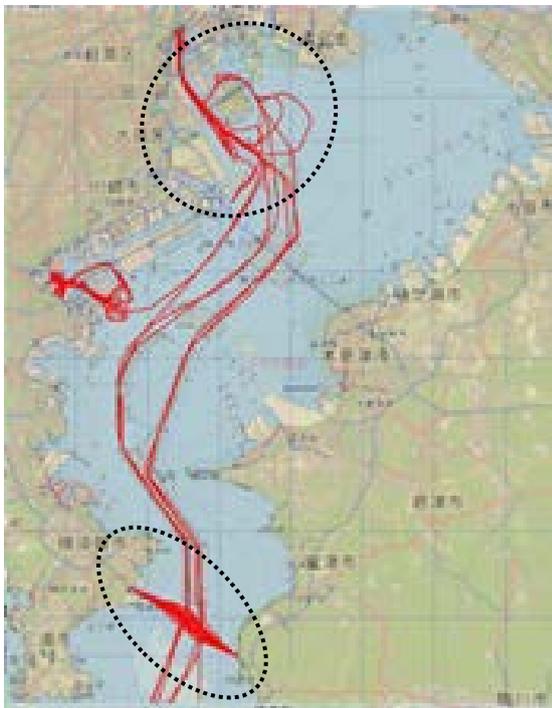


図 4-17(a)
Passenger ship(3月4日)

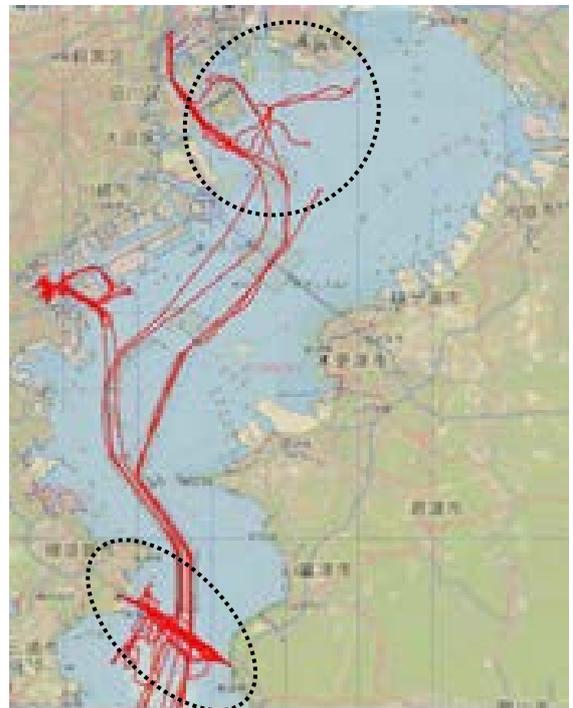


図 4-17(b)
Passenger ship(3月11日)

4.8.4 震災時におけるリスク変化

4.7節で示したように、IWRAPでは、日ごとのばらつきを抑え、より他の海域との比較を行いやすくするためにデータ量を増やして解析を行うことが推奨されている。本項では、3月11日という特定の日のリスクの変化を明確にするために短いデータ期間にあえて区切って解析を行うことにした。1日ごとの海域全体のリスクを計算した結果を折れ線グラフにしたものを図4-18に示す。図4-18は、縦軸に海域全体のリスクを years between incidents の形式で示し、横軸に日付を示している。図中の矢印で示すように、リスクが高い場合は数値が小さくなり、リスクが低い場合は、数値が大きくなる。

1日ごとのリスク評価を行なう際、日にちごとのばらつきを考慮し、3月11日と曜日が同じ2月25日、3月4日と、3月11日以前の3日分で比較した。図4-18より、3月11日以外の5日は、1~0.8の間に数値があるのに対し、3月11日は、1.4の近くに数値があることが分かる。これは、東京湾の船舶が震災の影響で、錨泊を選択していることなどの影響で、船舶の動きが通常より、鈍いと考えられる。そのため、3月11日のみリスクが低い結果と考える。

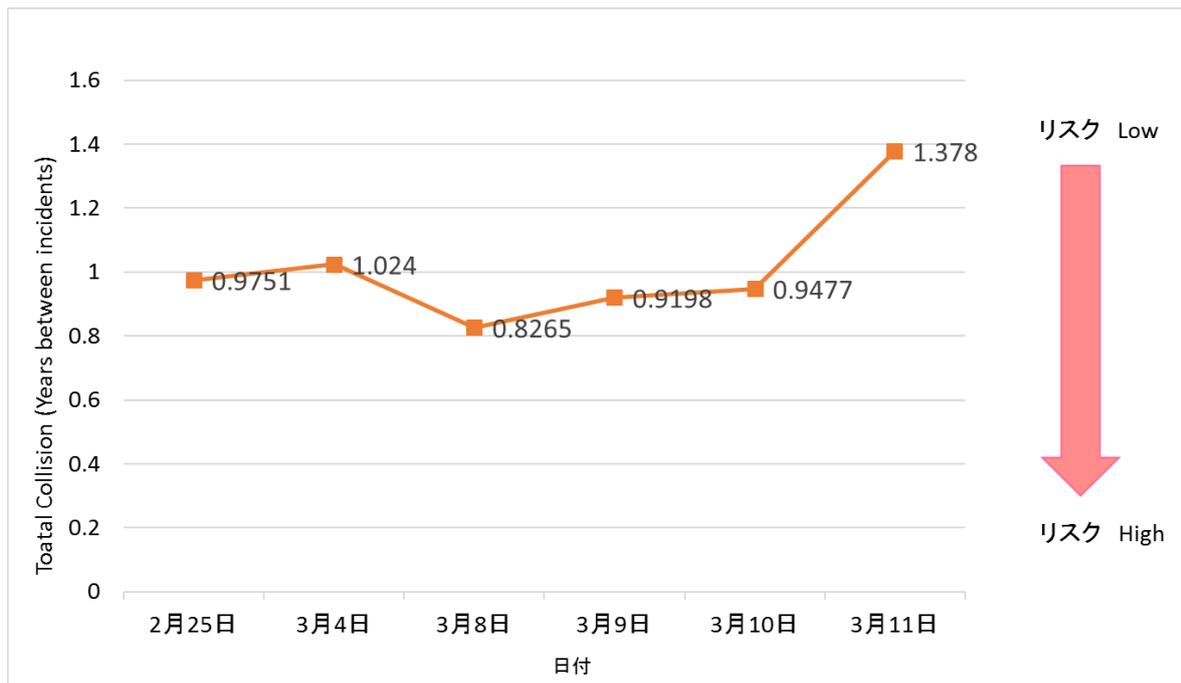


図4-18 1日ごとの海域のリスク変化(3.11以外の日との比較)

内藤の3月11日の船舶の動静を調査した研究⁽³⁶⁾があり、図4-19(a)と図4-19(b)に示す。地震前後の船舶動静を比較すると、係岸していた船舶は、42%減少し、錨泊船が42%増加している。また図4-19(b)から、震災前に係岸していた船舶の52%、錨泊船の96%、航行していた船舶の57%が錨泊していることが分かっている。これらの結果から、錨泊船が増加したことが分かる。

内藤の研究における船舶の動静変化とIWRAPで行った解析の結果が一致していることが分かる。これにより、IWRAPによって導いた震災時の傾向の裏付けとなると考える。

図4-19(a) 震災前後の船舶動静

震災前				震災後		
係岸	148隻	61%	減少	係岸	45隻	19%
錨泊	46隻	19%	増加	錨泊	149隻	61%
航行中	49隻	20%	変わらず	航行中 (出湾)	49隻	20%

図4-19(b) 震災前後の状況別船舶動静

震災前				震災後		
係岸	148隻	61%		係岸	44隻	30%
				錨泊	77隻	52%
				出湾	27隻	18%
錨泊	46隻	19%		係岸	0隻	0%
				錨泊	44隻	96%
				出湾	2隻	4%
航行中	49隻	20%		係岸	1隻	2%
				錨泊	28隻	57%
				出湾	20隻	41%

4.8.5 震災時のリスク評価のまとめ

東日本大震災のような通常と異なる状況についてリスクの検討が必要と考えIWRAPを用いて評価を行った。震災による変化を評価するために、船種別の交通流の状態の可視化とリスク計算を行った。震災の発生した3月11日は、リスクが低い結果を得た。これは、東京湾の船舶が震災の影響で、錨泊を選択していることなどの影響で、船舶の動きが通常より、鈍いためと考えられる。この結果は、3月11日の船舶の動静を調査した内藤の結果とも一致している。

以上により、IWRAPによって震災のような通常と異なる状況下でもリスク評価を行うことができると思う。

4.9 台風襲来時の船舶のリスク計算

4.9.1 台風とは

日本は、毎年夏の終わりから秋にかけて台風に見舞われる。近年は地球温暖化の影響による海水温の上昇の影響もあり、勢力の強い台風が日本列島に接近または上陸し、各地で大きな被害をもたらしている。

台風とは、大西洋または南シナ海に存在する熱帯の海上で発生した熱帯低気圧で、低気圧内での最大平均風速が 17m/s（風力 8）以上のもののことである。台風は上空の風に流されて移動する性質のため、低緯度帯では西に流されながら北上し、中・高緯度帯では偏西風の影響を受けて北東へ移動する。台風は、熱帯低気圧または、温帯低気圧に変化し、消滅していく⁽³⁷⁾。次ページの表 4-10(a)および表 4-10(b)中の項目の1つである中心気圧は、通常時の日本の気圧が 1013hPa であるのに対し、低いほど強い台風ではあることを示している。しかし、気象庁では、台風の強さを決める際には、大きさと、風の強さで決めているため、参考値として考えておくのがよいようだ。

4.9.2 台風時の船舶への影響と目的

船舶にとって台風は、判断を誤れば座礁や船体の破損をもたらし、人命をも奪う脅威を秘めた存在である。海上は、山や構造物など遮るものによる波や風、雨の影響の減衰がないため、影響を大きく受ける。通常、台風接近時に船舶は、港長の勧告や命令、気象情報を参考にし、荷役のスケジュールなどを加味して船長の判断で湾内での錨泊や出港などの判断を行っている。水路誌によると、東京湾では台風が接近した場合、大型船は港外避泊を原則としている。京浜港（横浜・川崎区）では、底質があまり良くなく、錨かきが悪いいため、走錨注意報を強風が予測される場合には発表している。錨泊をする場合でも守錨当直を行い、注意を怠らないことが求められている。以下の4つが水路誌⁽³⁸⁾に記された留意基準である。

1. 錨泊中の船舶は、走錨防止対策をとること
2. VHF 無線電話 ch16 の継続聴取をすること
3. 機関を「スタンバイ」とすること
4. 常時適切なアンカーワッチを行うとともに、最新の気象情報の入手に努め、天候の変化に備えること。

本論文では、通常とは違う気象条件下でのリスクの検討が必要と考えた。2011年と2014年の東京湾のAISデータを用いて、台風接近時の東京湾における船舶のリスク計算を行い、影響を明らかにすることにした。

4.9.3 解析する台風を選択

気象庁が発表した報道発表資料^{(39),(40)}より、2011年に上陸した台風を以下の表 4-10(a)に、2014年に上陸した台風は表 4-10(b)に示した。

表 4-10(a) 2011 年の上陸台風一覧

台風番号	上陸日時	上陸場所	上陸時(直前)の強さ	
			中心気圧	最大風速
6	7月19日 23時頃	徳島県	960hPa	40m/s
12	9月3日 10時頃	高知県	984hPa	25m/s
15	9月21日 14時頃	静岡県	950hPa	40m/s

表 4-10(b) 2014 年の上陸台風一覧

台風番号	上陸日時	上陸場所	上陸時(直前)の強さ	
			中心気圧	最大風速
8	7月10日 7時前	鹿児島県	980hPa	25m/s
11	8月10日 6時過ぎ	高知県	965hPa	35m/s
18	10月6日 8時頃	静岡県	965hPa	35m/s
19	10月13日 8時半頃	鹿児島県	970hPa	35m/s

東京湾に影響がある台風は、静岡県に上陸した 2011 年では台風 15 号、2014 年では台風 18 号と考え、襲来した際の船舶のリスクを計算することにした。

気象庁の報道発表資料では、上陸日時や台風の強さは分かるが、東京湾周辺の具体的な雨風の強い期間が分からない。そのため、リスク計算を行う具体的な期間を選定するため、日本気象協会のホームページ⁽⁴¹⁾の過去天気の日データ、気象庁の過去の気象データ検索⁽⁴²⁾、Yahoo Japan!の天気・災害の日データ検索⁽⁴³⁾を利用し、台風の影響を受けて天気が悪化し、回復するまでの期間を調べた。

2011 年の台風 15 号により天候が悪化したのは、9 月 21 日 1 時から 18 時であることが分かった。

2014 年の台風 18 号により天候が悪化したのは、10 月 5 日 1 時から 10 月 6 日 12 時であることが分かった。

台風の影響によるリスクの変化をとらえるため、台風接近前、台風襲来中、台風通過後、2011 年 9 月(1 ヶ月分)、2014 年 10 月(1 ヶ月分)の日データで数値と危険性のある海域を比較することにした。1 ヶ月分のデータと比較するのは、海域の持つ平均的なリスクと比較するためである。IWRAP において短い時間のデータは、1 ヶ月分のデータと比べて、サンプル数が少なく、値のばらつきが大きい。しかし、短い時間のデータは、その日 1 日の特徴を顕著に示しているともいえる。そのため、台風のように長くても数日しか影響を与えない気象・海象の影響を数値化するのに適していると考えられる。

4.9.4 2011年の台風襲来時の交通流の変化

台風襲来時に交通流の変化があるかを、交通流を描画した図で比較した。図 4-20(a)は、台風襲来前、図 4-20(b)は、台風襲来日当日、図 4-20(c)は、台風通過後の図である。図 4-20(a)から図 4-20(c)は、交通量が多い順に紺、赤、黄、白で描画されている。図 4-20(a)から図 4-20(c)を比較すると、明らかに襲来前日の交通量が多く、次いで去った直後の日となっており、台風襲来時が赤い色の部分が少ないため、3日のうち最も少ないことが分かる。

また、来る前日の図である図 4-20(a)の点線黒丸に注目すると、中ノ瀬航路の部分に紺色であることが分かる。直後の図である図 4-20(c)の点線黒丸に注目すると、東京湾から出る浦賀航路へ入る部分が紺色であることが分かる。

このことから、台風襲来前は入港船が多く、襲来後は避泊した船舶の出港船が多いと考えられる。

台風が静岡県に上陸したのは、2011年9月21日14時頃となっており、4.9.3項で述べたように21日1時から18時に台風による雨風の影響を受けたと考えた。図 4-20(d)は、21日1時から18時の交通流を描画した図である。図 4-20(d)から通常より少ないが船舶の動きがあり、浦賀、中ノ瀬航路を通行していた船舶がいることが分かる。図 4-20(e)は、台風の影響がなくなったと考えられる21日18時から23時の交通流を描画した図である。図 4-20(e)の点線黒丸に注目すると、横須賀付近で交通量が多いこと、浦賀航路を通行し、東京湾を出た船舶が一定数いたことが分かる。

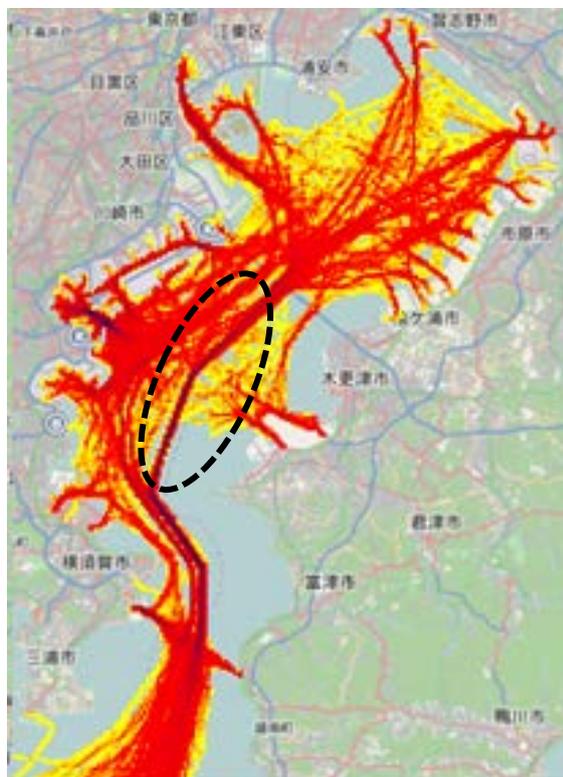


図 4-20(a) 台風襲来前日



図 4-20(b) 台風襲来日

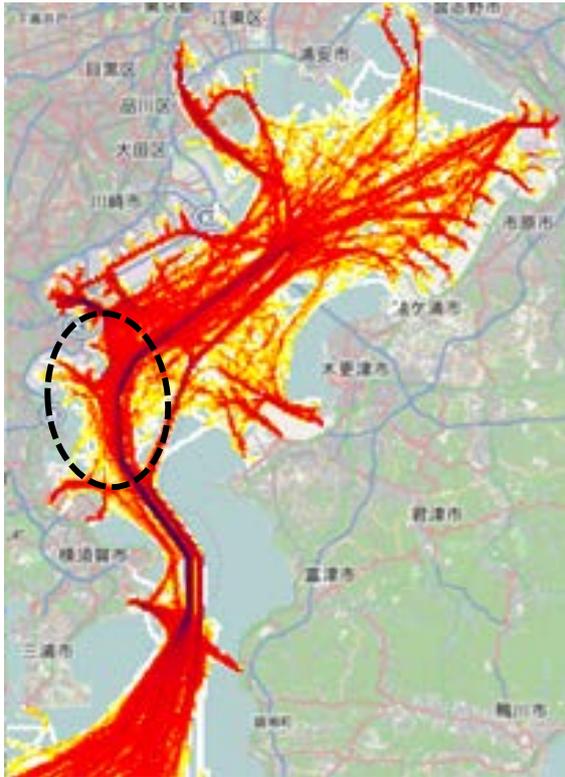


図 4-20(c) 台風襲来後



図 4-20(d) 台風襲来日(1:00~18:00)



図 4-20(e) 台風襲来日(18:00~24:00)

4.9.5 2011年の台風襲来時のリスクの変化

台風襲来時の海域のリスクの変化を調べるため、襲来前の9月20日、襲来中の9月21日の1時から18時と18時から23時、襲来後の9月22日、そして、台風襲来時ではない状況下の海域のリスクとの比較を行うために9月1か月分のリスクを算出した。台風襲来の海域のリスク変化に注目するために、海域全体のリスクを算出し、値を下の表4-11に示す。海域全体のリスクの値は、Years between incidentsで表示している。

表4-11より、リスクの値は、通常状態と比べて台風襲来前からリスクの値が減り続け、襲来直後の9月21日18時から23時が最も低くなった。そして、台風襲来後の9月22日に9月1か月分のデータで算出したリスクの値とほぼ同じになった。このことから、台風襲来中は、船舶が湾内で避泊または、襲来前に出港することから、リスクが低くなるといえる。

表 4-11 2011年台風襲来時の海域のリスク

状況	解析対象期間	リスクの値
通常状態	9月	1.227
台風襲来前	9月20日	2.296
台風襲来中	9月21日	34.21
	9月21日1～18時	95.92
	9月21日18～23時	444.3
台風襲来後	9月22日	1.267

図 4-21(a)から図 4-21(f)は、計算した海域全体のリスクの値を航路筋に沿って表示した図である。リスクが高い部分は順に赤、オレンジ、青、白となっている。9月の図 4-21(a)より、黒の点線丸で示したように浦賀航路が海域においてリスクが最も高い部分であると分かる。この9月の図 4-21(a)を基準として、台風襲来によってどのように変化するかを図 4-21(b)以降比較していく。図 4-21(b)の台風襲来前では、図 4-21(a)中で最もリスクが高かった浦賀航路の部分のリスクが減り、赤からオレンジに変わったことが分かる。図 4-21(c)より、台風襲来中では図 4-21(b)中にオレンジだった通常状態でリスクが高かった浦賀航路の部分が黄色へと変化し、さらにリスクが減っていることが分かる。図 4-21(c)では台風が襲来した1日分のデータを解析対象としたが、時間帯ごとの変化を調べるため、さらに2つの時間帯で図示することにした。4.9.3項で述べた荒天の影響下にある9月21日1時から18時、そして台風通過直後と考えられる9月21日18時から24時の2つである。図 4-21(d)の9月21日1時から18時には、黒の点線丸で示した部分のリスクが高いことが分かる。図 4-21(d)中に表示されているヒストグラムの向きに注目すると、東京湾の奥を向いているものが図中に赤丸で示すように存在する。そのため、図中の赤の矢印で示すようにこの時間帯に東京湾に入港し、湾の奥へ移動する船舶が一定数いたのではないかと考える。図 4-21(e)の9月21日18時から24時は、黒点線丸で示した部分が、赤とオレンジであることから通常状態より広範囲でリスクが高いことが分かる。これより、台風通過直後から浦賀航路を航行していた船舶がいたことが分かる。図 4-21(f)は、9月22日は台風が通過した翌日である。この日のリスク分布を見ると、9月のリスク分布とほぼ一致していることが分かる。このことから、図 4-21(b)～図 4-21(e)の特徴は台風によるものと考えられる。

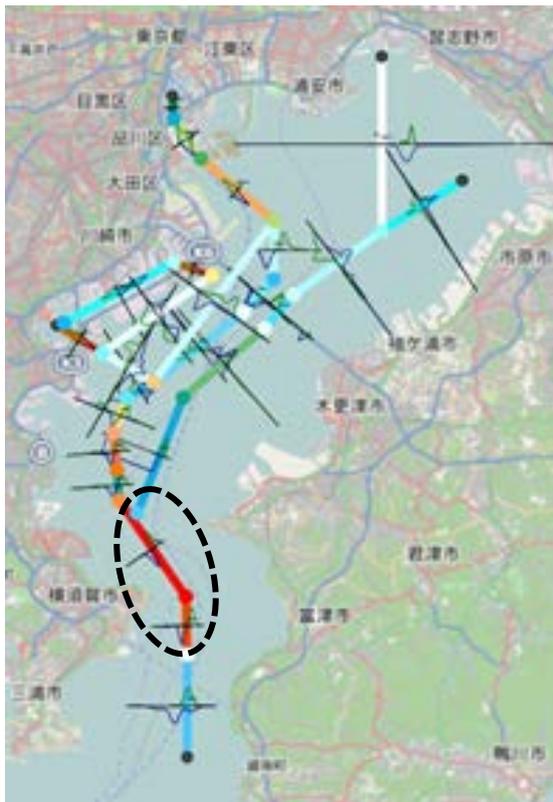


図 4-21(a) 9月(1ヶ月)

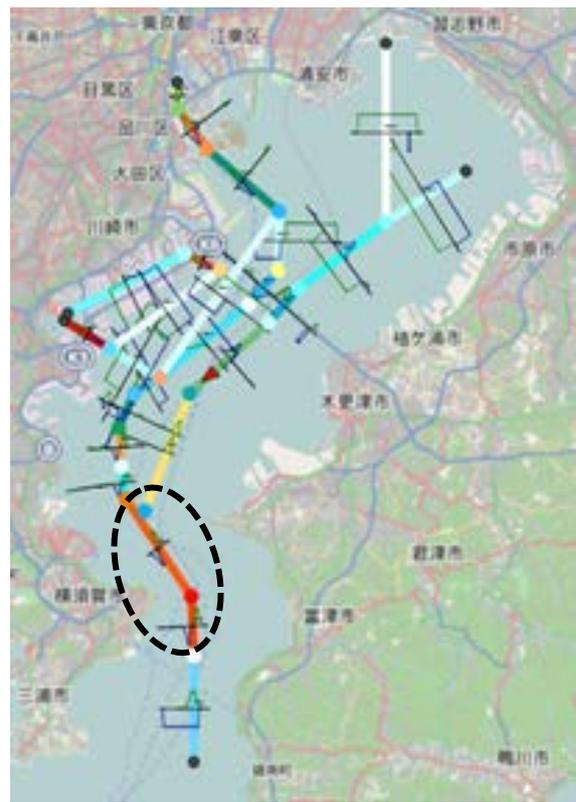


図 4-21(b) 台風襲来前(9月20日)



図 4-21(c) 台風襲来中(9月21日)



図 4-21(d) 台風襲来中(9月21日)
(1:00~18:00)



図 4-21(e) 台風襲来中(9月 21 日)
(18 : 00~24 : 00)



図 4-21(f) 台風襲来後(9月 22 日)

4.9.6 2014 年の台風襲来時の交通流の変化

2011 年と同じく、2014 年の台風襲来時に交通流の変化があるかを交通流を描画した図で比較した。図 4-22(a)は、台風襲来前、図 4-22(b)は、台風襲来日 1 日目、図 4-22(c)は、台風襲来日 2 日目、図 4-22(d)は、台風通過後の図である。図 4-22(a)から図 4-22(d)は、交通量が多い順に紺、赤、黄、白で描画されている。図 4-22(a)から図 4-22(d)を比較すると、図 4-22(a)の台風襲来前と図 4-22(b)の台風襲来日 1 日目の交通量は同じ位に見えるが、図 4-22(c)の台風襲来日 2 日目は少なくなっていることが分かる。

次いで去った直後の日となっており、台風襲来時が赤い色の部分が少ないため、3 日のうち最も少ないことが分かる。図 4-22(a)と図 4-22(d)の点線黒丸に注目すると、台風襲来前は、浦賀航路の部分に 2 本の紺色の線が確認できるが、台風襲来直後では 1 本の線となっている。この 1 本の線は、浦賀航路の左側となっていることから、東京湾から出る船舶と分かる。このことから、台風通過直後、出港船が多いと考えられる。

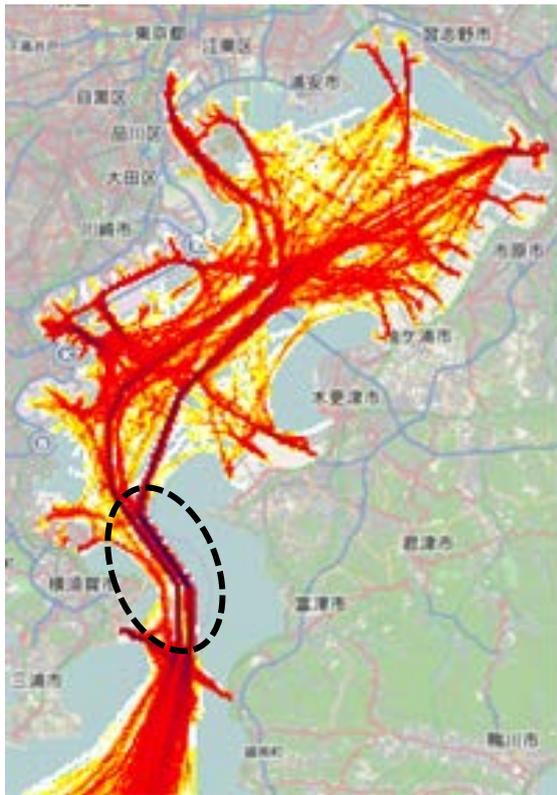


図 4-22(a) 台風襲来前(10月4日)

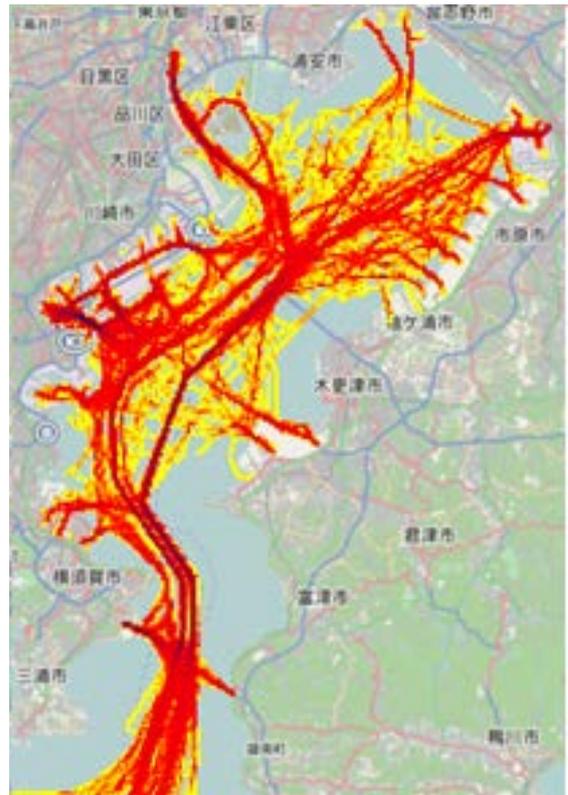


図 4-22(b) 台風襲来日1日目(10月5日)

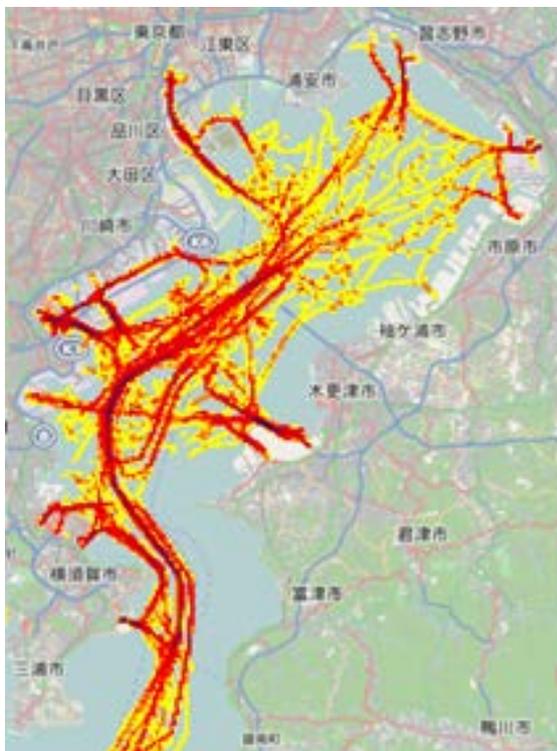


図 4-22(c) 台風襲来日2日目(10月6日)

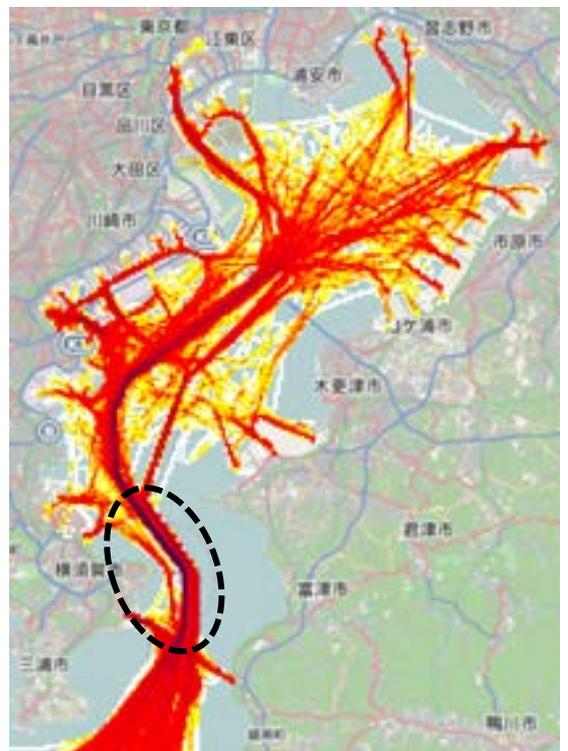


図 4-22(d) 台風襲来後(10月7日)

台風が静岡県に上陸したのは、2014年10月6日8時頃となっており、4.9.3項で述べたように5日1時から6日12時に台風による雨風の影響を受けたと考えた。船舶に与えた影響をより詳しく解析するため、図4-22(e)に10月5日1時から12時、図4-22(f)に10月5日12時から23時、図4-22(g)に10月6日1時から12時、図4-22(h)に10月6日12時から23時の交通流を描画した。図4-22(e)の点線黒丸より、10月5日1時から12時は、全体的に交通量は少ないが、東京湾に入港してくる船舶が浦賀航路、中ノ瀬航路に集中し、混雑していたことが分かる。図4-22(f)より、10月5日12時から23時は、1時から12時と比較し、圧倒的に交通量が多く、湾内を多くの船舶が動いていたと考えられる。図4-22(g)より、10月6日1時から12時は、非常に船舶が少なく、黒の点線丸に注目すると、赤の点がある。これは、通常状態での描画では、海域の混雑した航跡に埋もれてしまい、見られることはないが、錨泊船と考えられる。図4-22(h)より、10月6日12時から23時は、湾内に赤い線があることから、湾外にでる船舶が少なく、湾内で移動した船舶が多かったと考えられる。

また、図4-22(g)と図4-22(h)の黒丸の部分に注目すると、相模湾に縦にギザギザとした線がある。船種別に解析したところ、**Other ship** であることしか分からなかったため、MMSI 番号で検索したところ、海上自衛隊の艦船3隻と海上保安庁の巡視船1隻と分かった。東京湾で船舶の動きが無い中縦に航行し続けるのは大変珍しく、台風で船舶の動きもないため、通常できない観艦式の練習をしているのではないかとの意見があった。



図 4-22(e) 台風襲来中(10月5日)
(1:00~12:00)



図 4-22(f) 台風襲来中(10月5日)
(12:00~23:00)

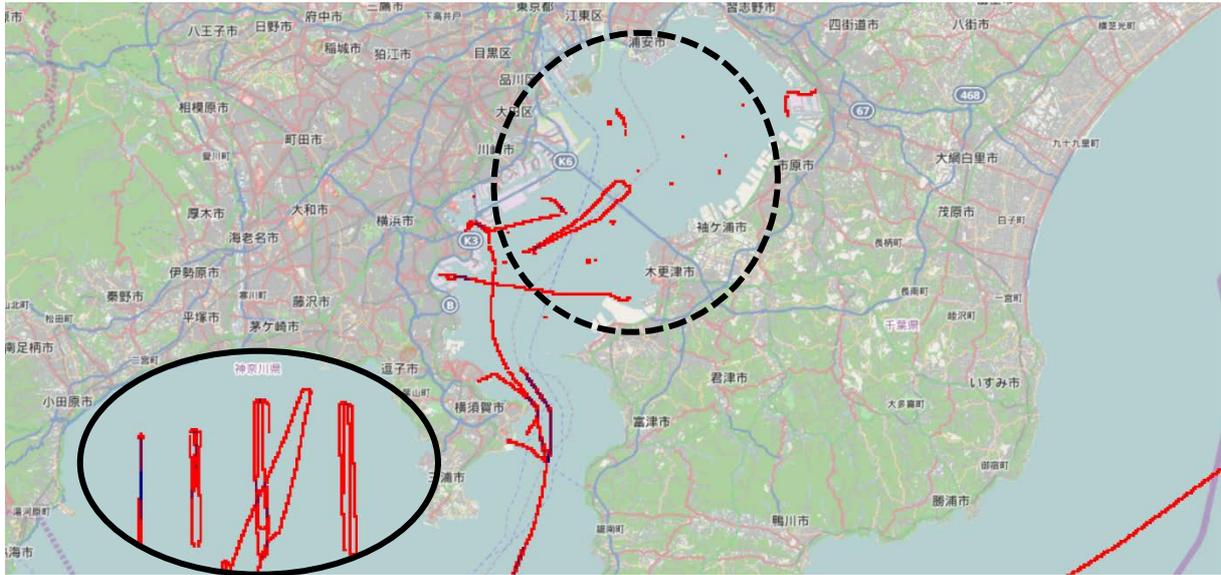


図 4-22(g) 台風襲来中(10月6日)
(1 : 00 ~ 12 : 00)

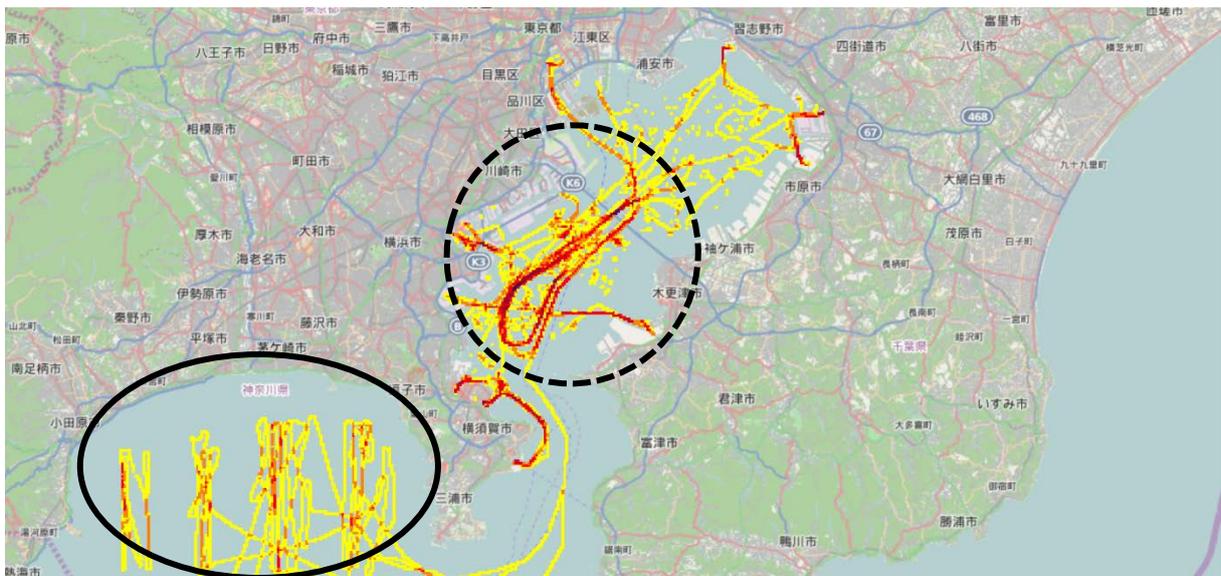


図 4-22(h) 台風襲来中(10月6日)
(12 : 00 ~ 23 : 00)

4.9.7 2014年の台風襲来時のリスクの変化

台風襲来時の海域のリスクの変化を調べるため、襲来前の10月4日、襲来中の10月5日の1時から18時と18時から23時、10月6日の1時から12時、12時から23時、襲来後の10月7日、そして、台風襲来時ではない状況下の海域のリスクとの比較を行うために10月1か月分のリスクを算出した。台風襲来の海域のリスク変化に注目するために、海域全体のリスクを算出し、値を下の表4-12に示す。海域全体のリスクの値は、Years between incidentsで表示している。

表4-12より、リスクの値は、通常状態と比べて1日単位では、台風襲来前からリスクが減り続け、台風襲来後の10月7日に10月1か月分のデータで算出したリスクの値とほぼ同じになった。4.9.6項で台風襲来中に船舶の動きがあった10月5日12時から23時は、リスクの値は10月5日1時から12時の値から上昇した。交通流の描画だけでなく、数値でも変化を示すことができた。台風襲来中の10月6日1時から12時が最もリスクの値が低くなった。

このことから、2011年と同じく台風襲来中は、船舶が湾内で避泊または、襲来前に出港することから、リスクが低くなるといえる。

表4-12 2014年の台風襲来時のリスクの変化

状況	解析対象期間	リスクの値
通常状態	10月	1.31
台風襲来前	10月4日	1.70
台風襲来中	10月5日	7.16
	10月5日1~12時	453.10
	10月5日12~23時	20.91
	10月6日	8.26
	10月6日1~12時	476900.00
10月6日12~23時	13.24	
台風襲来後	10月7日	1.30

図4-23(a)から図4-23(i)は、計算した海域全体のリスクの値を航路筋に沿って表示した図である。リスクが高い部分は順に赤、オレンジ、青、白となっている。10月の図4-23(a)より、黒の点線丸で示したように浦賀航路が海域においてリスクが最も高い部分であると分かる。この10月の図4-23(a)を基準として、台風襲来によってどのように変化するかを図4-23(b)以降比較していく。図4-23(b)の台風襲来前では、図4-23(a)中で最もリスクが高かった浦賀航路の部分のリスクが減り、赤からオレンジに変わったことが分かる。図4-23(c)より、台風襲来中1日目では図4-23(b)中にオレンジだった通常状態でリスクが高かった浦賀航路の部分が薄いオレンジへと変化し、図4-23(f)の台風襲来中2日目では、黄緑色に変化した。同じ傾向が2011年でもみられ、台風が近づくにつれ船舶の動きが鈍くなることからリスクが減っていると考えられる。

台風による雨風の影響をより詳しく解析するため、図 4-23(d)に 10 月 5 日 1 時から 12 時、図 4-23(e)に 10 月 5 日 12 時から 23 時、図 4-23(g)に 10 月 6 日 1 時から 12 時、図 4-23(h)に 10 月 6 日 12 時から 23 時の時間帯別のリスク計算結果を示す。図 4-23(d)と図 4-23(e)の黒丸の浦賀航路の部分に注目すると、1 時から 12 時では、赤になっているが、12 時から 23 時では、薄いオレンジとなり、赤の丸で示した部分である中ノ瀬航路と中ノ瀬航路の奥の海域がオレンジとなっていることが分かる。このことから、10 月 5 日では、時間が経過するにつれて湾の奥のリスクが高くなることが分かる。図 4-23(g)の 10 月 6 日 1 時から 12 時は、航路筋に沿ってオレンジになっている。図 4-22(g)でも明らかだったが、大型台風を警戒した船舶が多く、船舶の動きがないことから、船舶が避泊していると考えられる航路中心部に船舶が密集していることから、航路筋のリスクが高くなっていると考えられる。図 4-23(h)の 10 月 6 日 12 時から 23 時は、図 4-22(h)の点線黒丸で示した部分のリスクが高いことを示す赤やオレンジになっている。交通流の描画による結果とリスクの値結果の図示が同じ変化の傾向を示すことができると考えられる。

また、図 4-23(i)は、台風が通過した翌日である。この日のリスク分布を見ると、10 月のリスク分布とほぼ一致していることが分かる。このことから、図 4-23(b)～図 4-23(h)の特徴は台風によるものと考えられる。



図 4-23(a) 10 月(1 ヶ月)

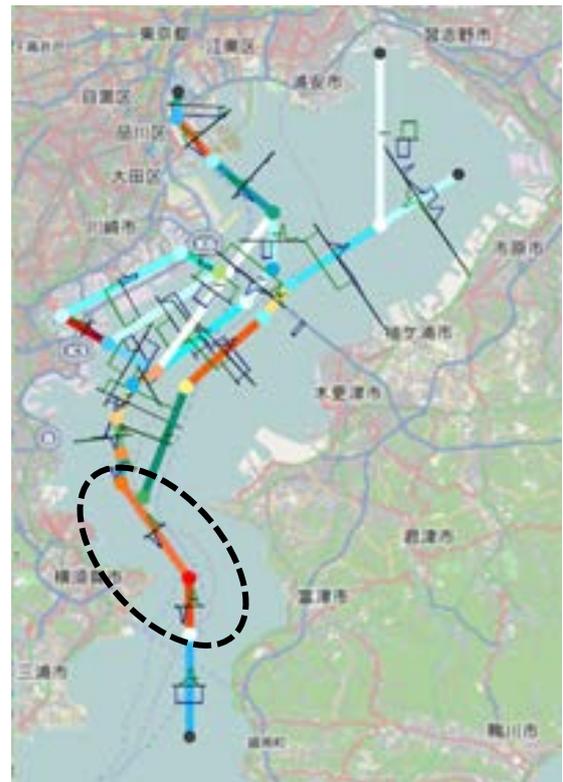


図 4-23(b) 台風襲来前(10 月 4 日)

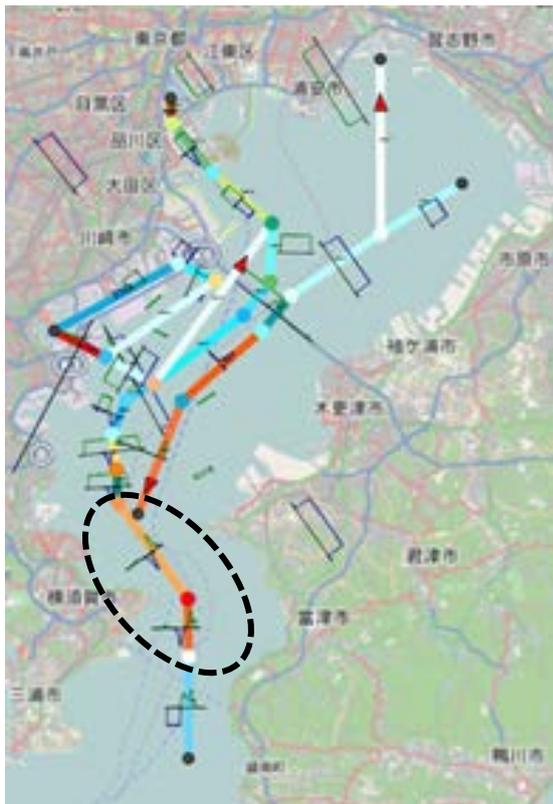


図 4-23(c) 台風襲来中(10月5日)



図 4-23(d) 台風襲来中(10月5日)
(1:00~12:00)



図 4-23(e) 台風襲来中(10月5日)
(12:00~23:00)

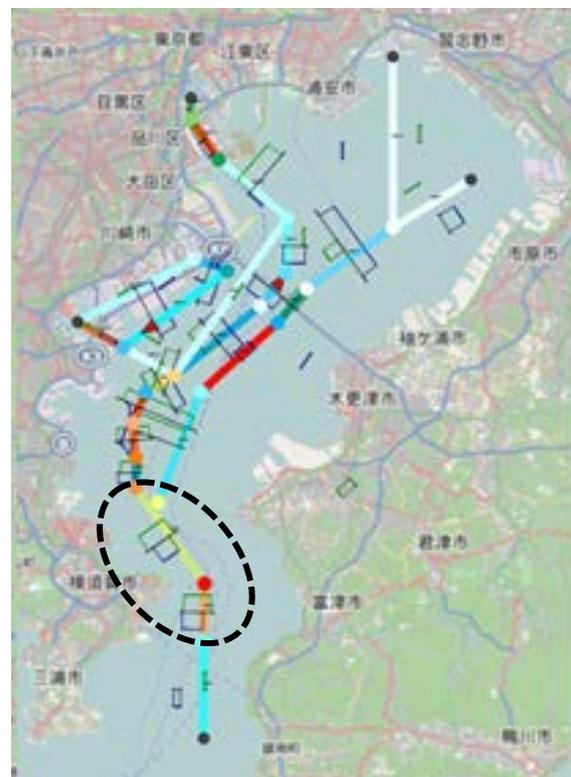


図 4-23(f) 台風襲来中(10月6日)



図 4-23(g) 台風襲来中(10月6日)
(1:00~12:00)



図 4-23(h) 台風襲来中(10月6日)
(12:00~23:00)

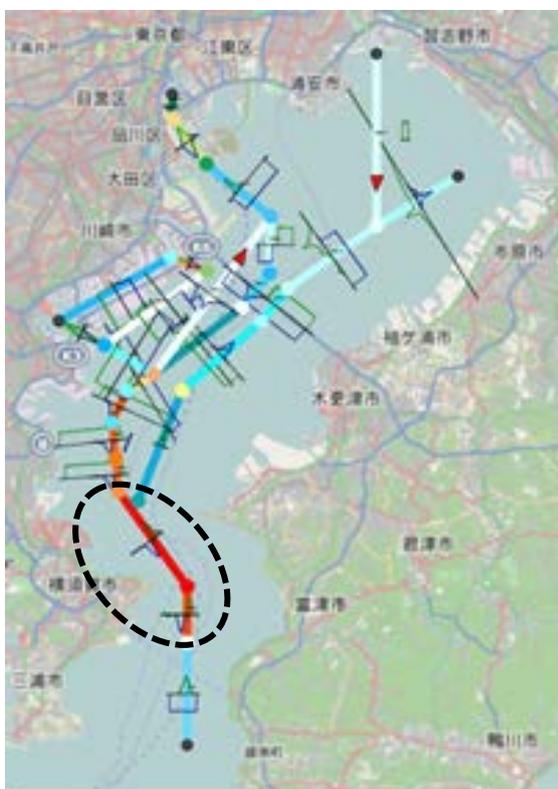


図 4-23(i) 台風襲来後(10月7日)

4.9.8 台風襲来時のリスク評価のまとめ

通常とは違う気象条件下でのリスクの検討が必要と考え、2011年と2014年における東京湾に影響がある台風を調べ、IWRAPを用いて評価を行った。台風による変化を評価するために、交通流の状態の可視化とリスク計算を行った。

2011年、2014年ともに、台風襲来前からリスクの値が減り続け、台風襲来後に通常状態のリスクの値に戻ることが分かった。このリスクの値の減少は、台風に備え、事前に出港または、湾内で避泊しているため、海域に存在する船舶数が少ないこと、船舶の動きが通常より鈍いためと考えられる。また、交通流の描画による結果とリスクの値結果の図示が同じ変化の傾向を示すことが分かった。

以上のことから、IWRAPを用いて台風襲来時のような通常とは異なる状況下でもリスク評価を行うことができると考える。

4.10 整流の有効性の評価(バーチャル AIS の有効性の評価)

4.10.1 バーチャル AIS 航路標識とは

バーチャル AIS 航路標識⁽⁴⁴⁾は、AIS 航路標識の 1 つで、AIS 上に表示される実在しない仮想ブイである。以後バーチャル AIS と表記する。AIS 航路標識は、船舶側の AIS 表示器、または AIS 信号が表示可能なレーダ画面上に表示される。

航路標識法において航路標識とは、灯光、形象、彩色、音響、電波等の手段により港、湾、海峡その他の日本国の沿岸水域を航行する船舶の指標とするための灯台、灯標、立標、浮標、霧信号所、無線方位信号所その他の施設と定義されている。AIS 航路標識は、航路標識法に明確な定義がない。そのため、平成 26 年 5 月 IMO の海上安全委員会(MSC)において承認された航路標識 AIS の使用に関する基本方針で、AIS によって送信され、船舶に搭載された機器等に表示されるデジタル航路標識と定義された。AIS 航路標識は、海上交通の安全性の向上のために海上保安庁が設置している。AIS 航路標識は、表 4-13 に示すように 3 つの種類が存在する。

リアル AIS 航路標識は、実在する航路標識を標識自身の場所から表示するものである。シンセ AIS 航路標識は、実在する航路標識を他の場所から表示するものである。バーチャル AIS は、実在しない航路標識を他の場所から表示するものである。表中に現在日本国内で使用されている AIS 航路標識の表示海域を示した。

シンセ AIS 航路標識は、海難の発生確率の高い主要航路や変針点、障害物等の明示、緊急時の灯台、灯標又は灯浮標の消灯等の緊急明示に使うと海上保安庁は、発表している。バーチャル AIS は、水深が深く、灯浮標の設置が難しい場合や、海域利用者の承諾が得られない場合、灯浮標や灯標等の移動、流失、漂流、沈没事故、緊急確保航路、避難泊地、沈船、船舶の交通制限または、静止区域の緊急明示使うと、海上保安庁は、発表している。

特に、物理的に存在しないバーチャル AIS のメリットは、陸上局からの電波によって AIS の表示装置上に表示されるため、実物のブイと異なり、破損した際の復旧までにかかる手間が少ないことや、設置費用がかからないこと、視界不良時でもブイの位置が分かること、沈船などが生じた際も速やかに表示対応ができることが考えられる。バーチャル AIS は、日本国内で平成 27 年 11 月 1 日から正式に運用が開始され、現在も表示されている。

表 4-13 AIS 航路標識の種類

種類		表示海域
物理的に存在する (Physical)	リアル (Real)	関門海峡西口、浦賀水道航路、伊予灘航路、明石海峡航路、洲本沖、伊勢湾の計 7 基の灯浮標に設置、表示中
	シンセ (Synthetic)	利用を検討中
物理的に存在しない (Virtual)	バーチャル (Virtual)	由良瀬戸(友ヶ島水道)、伊良湖水道航路、明石海峡航路に表示中

4.10.2 解析する海域①(友ヶ島水道(由良瀬戸))

友ヶ島水道は、淡路島と、和歌山県の間位置する大阪湾へ太平洋側から入港する船舶の入り口となっている水路である。

ダイヤのマークがバーチャル AIS である。経路の指定の基点となる 2 つの位置に表示されている。通航船舶は、このバーチャル AIS を左に見て右側通航する。図 4-24 中の Dn と Ds をつないだ線上は、横切ってはならず、線から 150m は離れて航行するようにとしている。さらに、洲本沖灯浮標の設置されている赤丸の地点を左舷に見て、航行することとしている。このバーチャル AIS が初めて表示されたのは、平成 25 年 3 月 19 日である。第五管区海上保安本部⁽⁴⁵⁾が実施している。

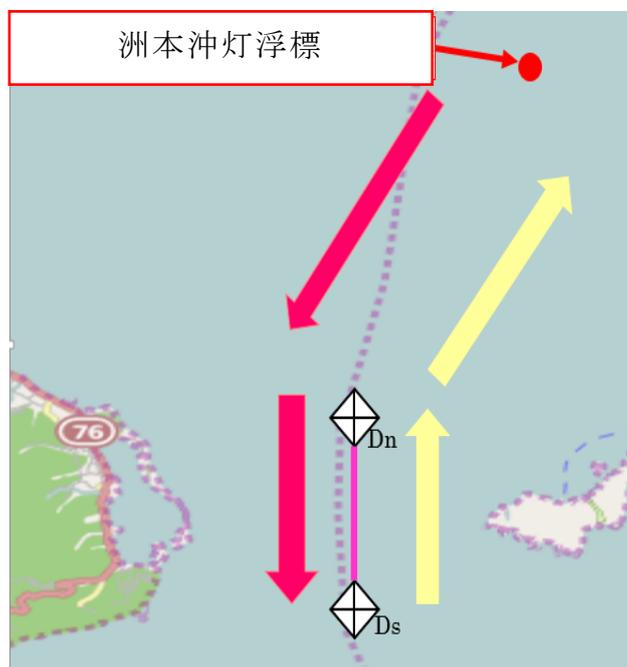


図 4-24 友ヶ島水道におけるこのバーチャル AIS 表示位置

4.10.3 解析する海域②(明石海峡航路)

明石海峡航路は、瀬戸内海から大阪湾に出入港する船舶が通航する航路である。明石海峡航路の東口付近にバーチャル AIS は設置されている。図 4-25 中のダイヤのマークがバーチャル AIS である。大阪湾から航路に入る船舶は、このバーチャル AIS を左に見て右側通航する。図 4-25 中の A 線の北側を航行し(図中の黄色の矢印)、明石海峡航路東方灯浮標(図中の赤丸)を 200m 離れ、B 線を横切って航行することとしている。航路に出て大阪湾に入る船舶は、A 線の南側を航行し(図中の灰色の矢印)、明石海峡航路東方灯浮標を 200m 離れて航行することとしている。明石海峡航路にバーチャル AIS が初めて表示されたのは、平成 24 年 4 月 17 日である。4.10.2 項の友ヶ島水道と同じく、第五管区海上保安本部が実施した。

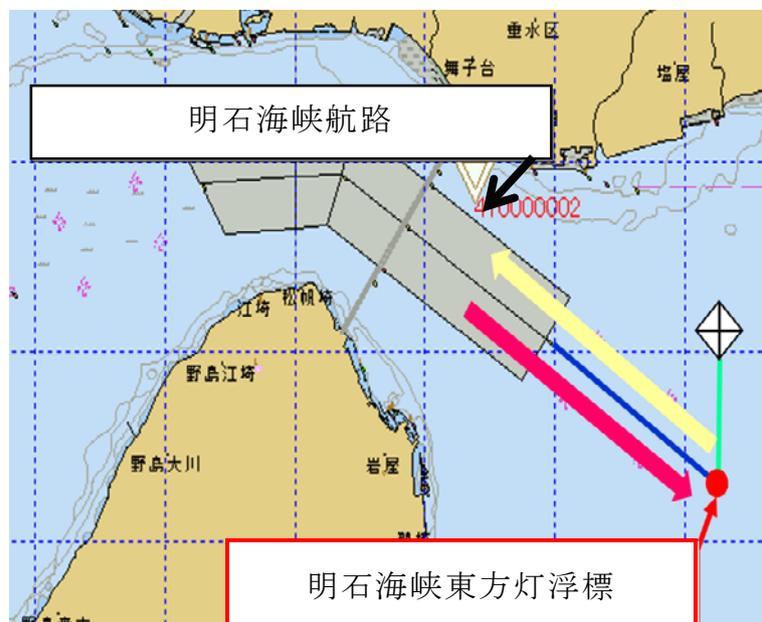


図 4-25 明石海峡におけるこのバーチャル AIS 表示位置

4.10.4 友ヶ島水道の解析結果①(交通流の変化)

バーチャル AIS に整流効果があるのを検証するため、設置前と設置後の AIS データを用いて解析を行うことにした。設置前は、平成 23 年(2011 年)8 月の 1 ヶ月分のデータを使用し、設置後は、平成 26 年(2014 年)8 月の 1 カ月分のデータを使用した。図 4-26(a)は設置前、図 4-26(b)は設置後である。図中において◇はバーチャル AIS、○は現実に存在する洲本沖灯浮標を示している。設置前後で比較すると、目立って色の変化はなく、交通量では変わらない。交通流のみの描画では、変化を見ることはできないが、この交通流から抽出したヒストグラムを重ねて表示すると、以下のような結果が現れた。

設置前後をヒストグラムで比較すると、表示されている図 4-26(b)中の B の部分である由良瀬戸を通過する段階では設置前より分離通航が進んでいるのは分かるが、あまりはっきりとした分離は見られない。しかし、図 4-26(b)中の A の部分である洲本沖灯浮標の時点で比較すると、設置後でははっきりと分離通航しているのが図 4-26(b)中の青の四角部分で確認できる。

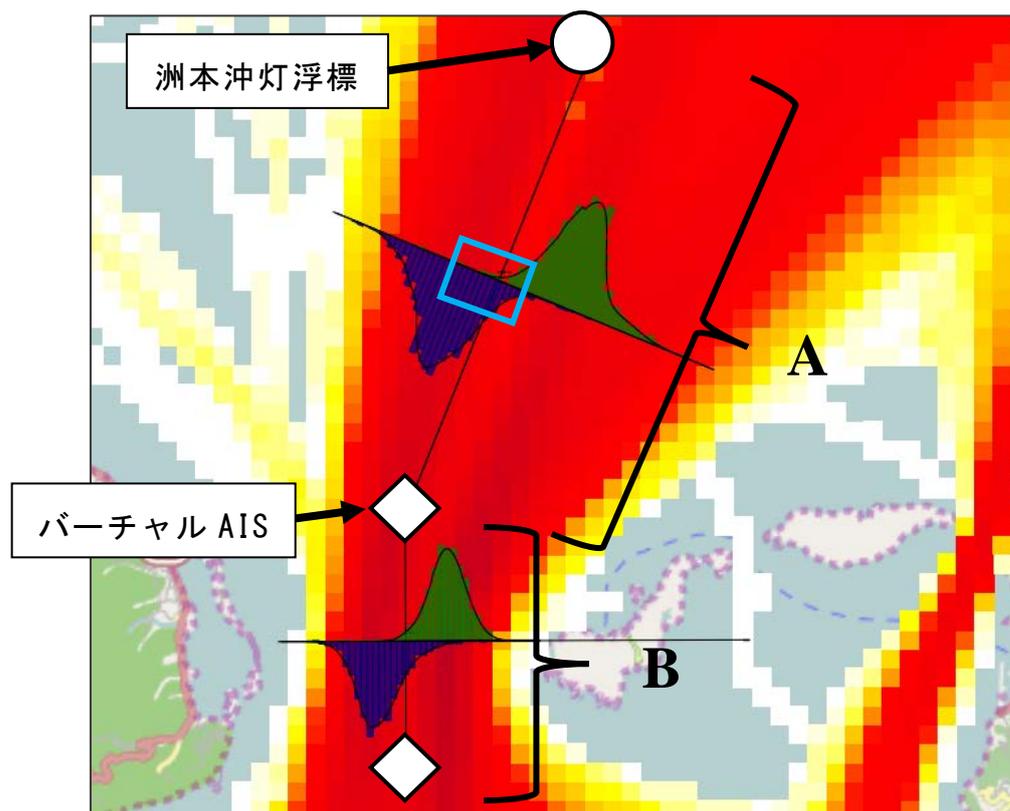


図 4-26(a) バーチャル AIS 設置前の友ヶ島水道

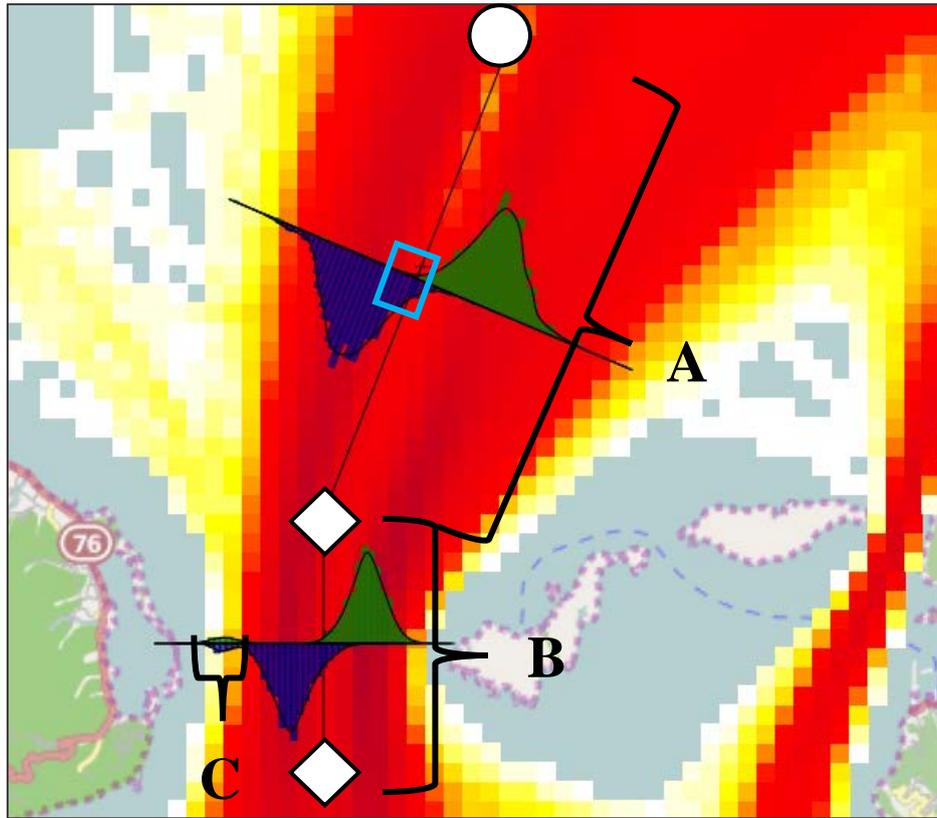


図 4-26(b) バーチャル AIS 設置後の友ヶ島水道

4.10.5 友ヶ島水道の解析結果②(リスクの変化)

整流の効果を定量的に評価するために、友ヶ島水道においてリスクの値の算出を行った。算出する際、バーチャル AIS の表示されている友ヶ島付近(図 4-26(a)と図 4-26(b)中の B 部分)と現実存在する洲本沖灯浮標付近(図 4-26(a)と図 4-26(b)中の A 部分)の 2 つに分けて行った。

洲本沖灯浮標付近(図 4-26(a)と図 4-26(b)中の A 部分)の結果を下記の表 4-14 に示す。設置前後を比較すると、追い越し衝突は 5.792%減少し、正面衝突は 42.438%減少した。海域全体のリスクは、8.84%の減少となり、リスクの減少が見られた。これは、バーチャル AIS 同士だけでなく、バーチャル AIS と現実のブイをリンクし、使用することで、交通流の整流が進んだことを示していると考えられる。このことから、バーチャル AIS は、表示されている部分の交通流のみならず、周辺のブイとリンクし、効果を上げているのではないかと考えられる。この結果から、バーチャル AIS はこの海域において有用な効果があることが分かった。

表 4-14 洲本沖灯浮標付近(A)バーチャル AIS 設置前後のリスク

	2011.8(設置前)		2014.8(設置後)	
	Incidents/Year	Years between incidents	Incidents/Year	Years between incidents
追い越し衝突	0.003119	320.7	0.002938	340.4
正面衝突	0.0002829	3535	0.0001628	6141
海域全体	0.003401	294	0.003101	322.5

以下の表 4-15 に B の部分の結果を示す。

表 4-15 より、設置前後を比較すると、追い越し衝突は 29.73%増加し、正面衝突は 29.75%減少し、海域全体のリスクは、10.319%の増加となった。

リスク増加の原因と考えられる要因が 2 つある。1 つ目は、分離通航の目標となるバーチャル AIS が表示されることで、右側にせり出していた通行船舶が左側に寄り、船間距離が短くなったことである。2 つ目は、設置後に見られる左側に出現した新たな交通流(図 4-26(b)の C 部分)である。船種別の解析を行ったところ、洲本港とパイロットステーションを行き来する Support ship と分かった。図 4-27 に Support ship のヒストグラムと航跡図を示す。左側の行き合いと、右側にせりだしている交通流が確認できる。この Support ship の存在が、リスクをあげていると考えられる。

表 4-15 友ヶ島付近(B)バーチャル AIS 設置前後のリスク

	2011.8(設置前)		2014.8(設置後)	
	Incidents/Year	Years between incidents	Incidents/Year	Years between incidents
追い越し衝突	0.002247	445.1	0.002914	343.1
正面衝突	0.001088	918.8	0.0007646	1308
海域全体	0.003335	299.9	0.003679	271.8

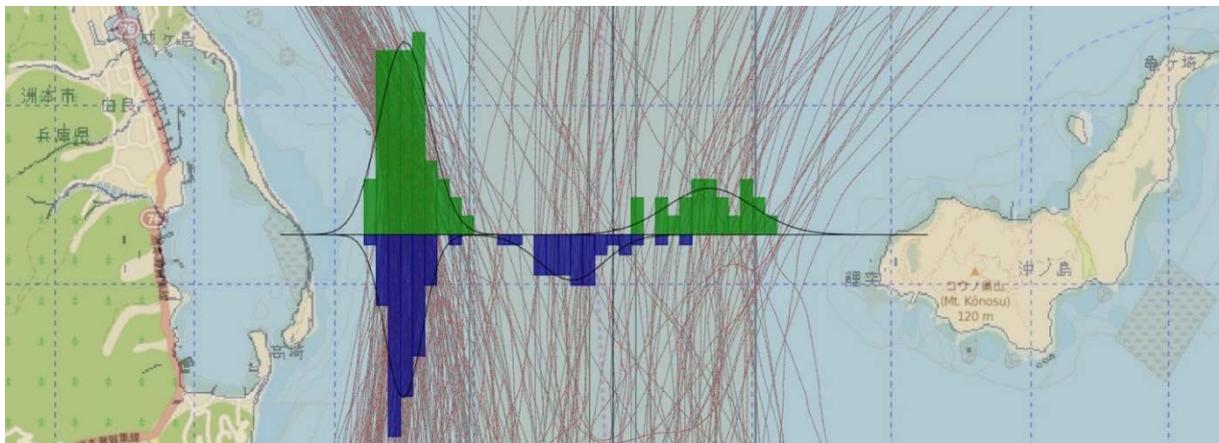


図 4-27 友ヶ島付近を航行する Support ship

この海域を航行している船種の中でも最も多い General Cargo Ship の航跡を出力した。図 4-28(a)は設置前、図 4-28(b)は設置後である。2つの図の D 部分に注目すると、Support ship ばかりでなく、AIS を搭載している船舶の中にもバーチャル AIS が表示される前と変わらず航行している船舶もまだいることが分かった。

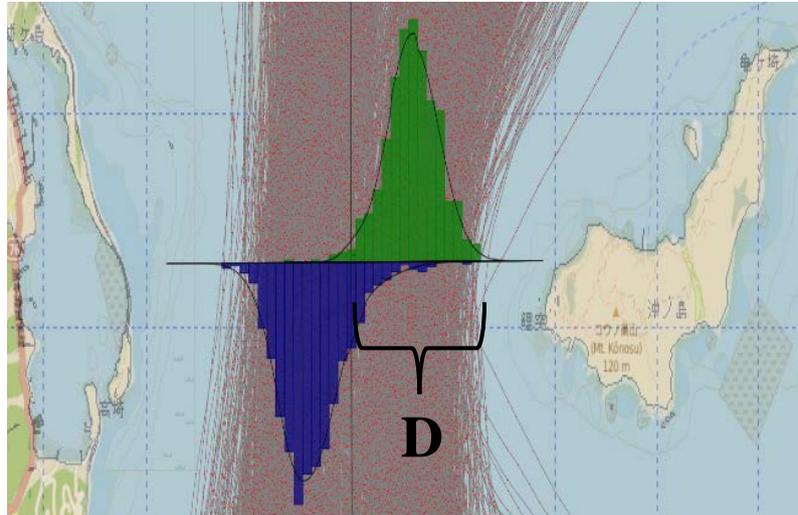


図 4-28(a) バーチャル AIS 設置前の友ヶ島付近を航行する General Cargo Ship

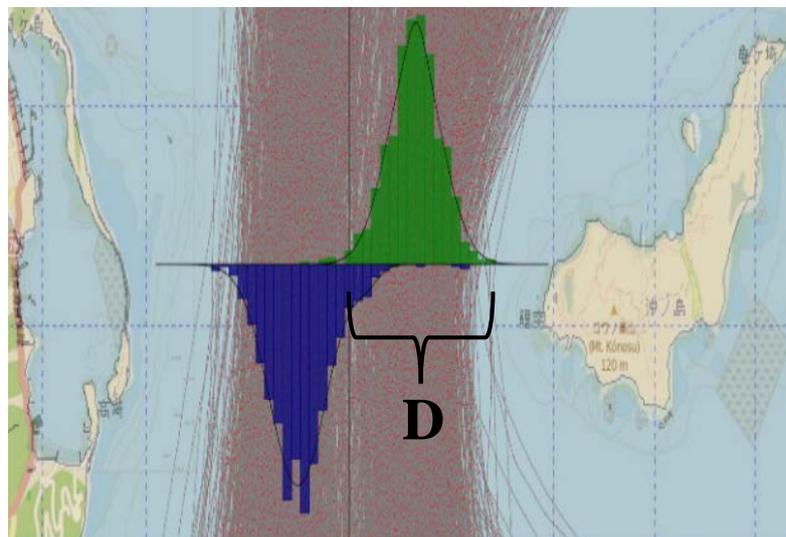


図 4-28(b) バーチャル AIS 設置後の友ヶ島付近を航行する General Cargo Ship

4.10.6 明石海峡航路の解析結果①(交通流の変化)

バーチャル AIS に整流効果があるのを検証するため、設置前と設置後の AIS データを用いて解析を行うことにした。明石海峡航路での比較は、設置前は、平成 23 年(2011 年)2 月の 1 カ月分のデータを使用し、設置後は、平成 26 年(2014 年)8 月の 1 カ月分のデータを使用した。図 4-29(a)と図 4-29(b)は、交通流にヒストグラムを重ねた図である。図 4-29(a)は設置前、図 4-29(b)は設置後である。

特に、図中の A(図 4-29(a))と B(図 4-29(b))の部分に着目し比較する。すると、設置前ではわずかではあるが行き合いが生じていたのが、設置後にはほぼなくなっていることが示された。

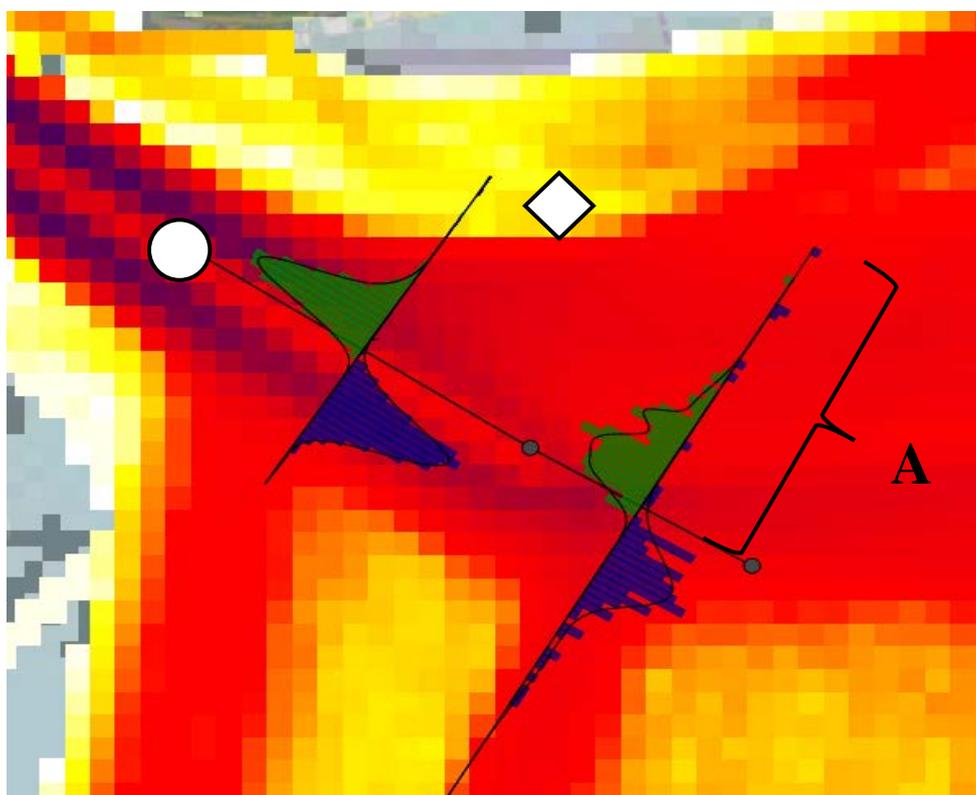


図 4-29(a) バーチャル AIS 設置前の明石海峡

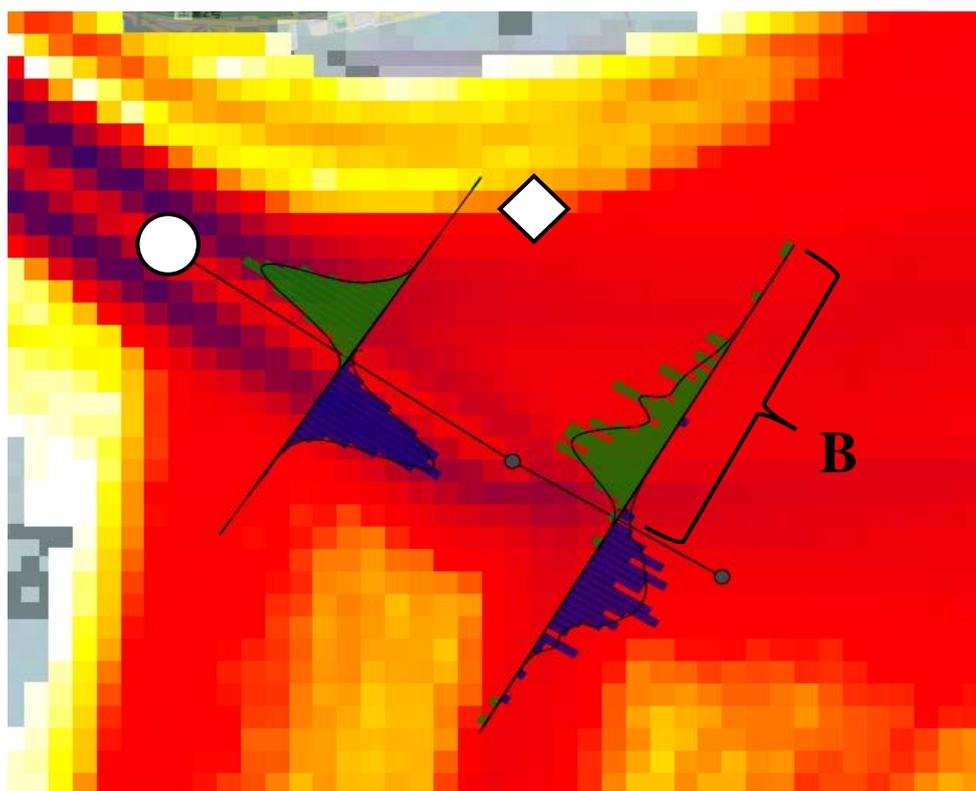


図 4-29(b) バーチャル AIS 設置後の明石海峡

4.10.7 明石海峡航路の解析結果②(リスクの変化)

整流の効果を定量的に評価するために、明石海峡航路においてリスクの値の算出を行った。リスク計算を行った結果を下の表 4-16 に示す。正面衝突は、33.487%とリスクは減り、追い越し衝突は 0.148%と微増したものの、海域全体のリスクは 1.23%下がる結果が出た。このことから、バーチャル AIS を表示することで、分離通航は進むが、船間距離が短くなる傾向がみられると考えられる。

表 4-16 明石海峡のバーチャル AIS 設置前後のリスク

	2011.8(設置前)		2014.8(設置後)	
	Incidents/Year	Years between incidents	Incidents/Year	Years between incidents
追い越し衝突	0.003219	310.7	0.003224	310.2
正面衝突	0.0001378	7256	0.0000917	10910
海域全体	0.003357	297.9	0.003315	301.6

4.10.8 バーチャル AIS の有効性に関するアンケート

第五管区海上保安本部は、明石海峡航路東口付近に表示させたバーチャル AIS の効果を調べるため、AIS データを用いた航跡の分析と、船舶運航者へのアンケート調査、大阪湾海上交通センター管制官への聞き取り調査⁽⁴⁶⁾を実施した。ここでは、船舶運航者へのアンケート調査、大阪湾海上交通センター管制官への聞き取り調査結果を示す。

アンケート調査は、バーチャル AIS が表示された平成 24 年 4 月 17 日から 10 月 31 日に行なわれた。回答者は、152 名(水先人 81 名、操船者 71 名)であった。図 4-30 に示すように、152 名の回答者の 56%が視認している。図 4-31 より、視認した運航者のうち、82%が有効と回答している。

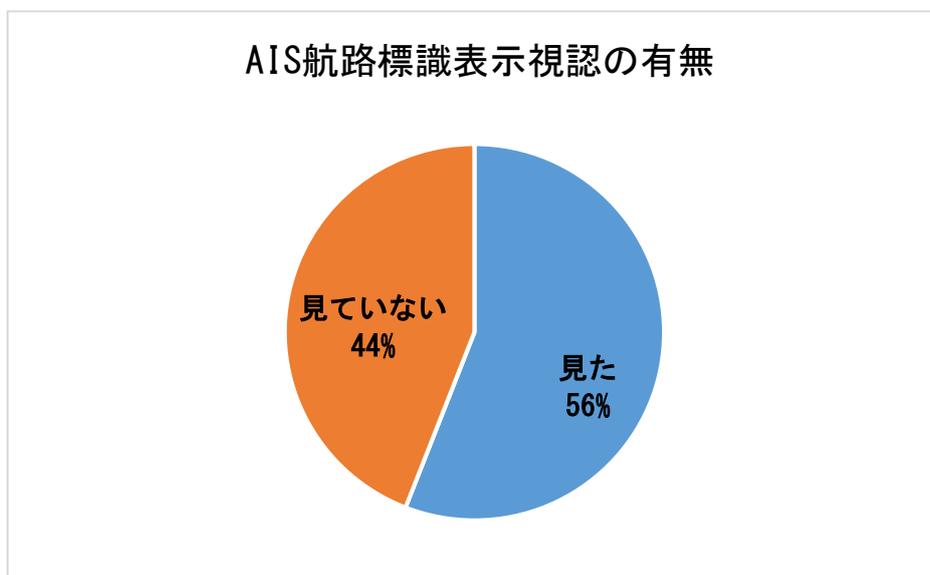


図 4-30 表示された AIS 航路標識の視認の有無

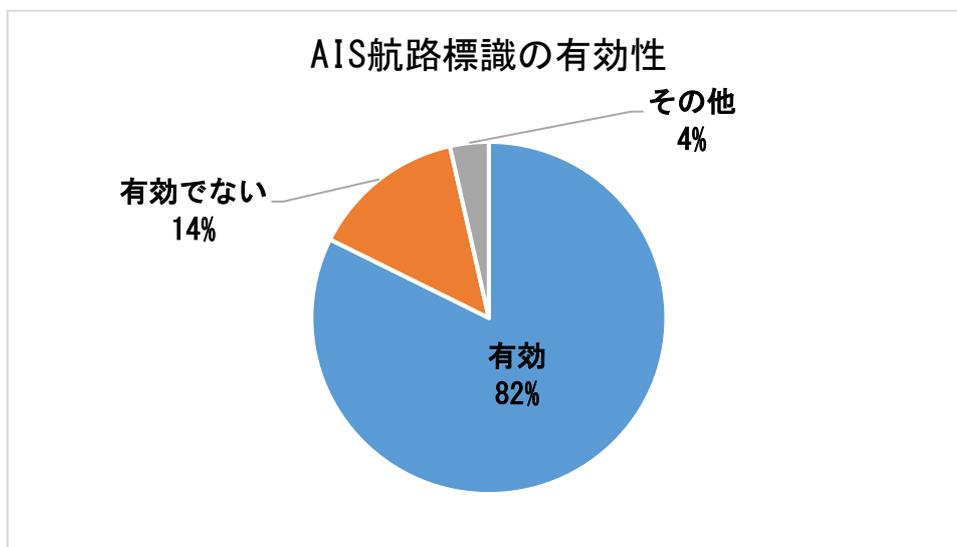


図 4-31 AIS 航路標識の有効性

有効と回答した運航者に有効な点を複数、項目を選択または、記述してもらったところ、下記の図 4-32 に示す結果となった。有効の理由の主な 2 つは、路指定ポイントの把握が容易であること、経路指定の遵守率向上であった。

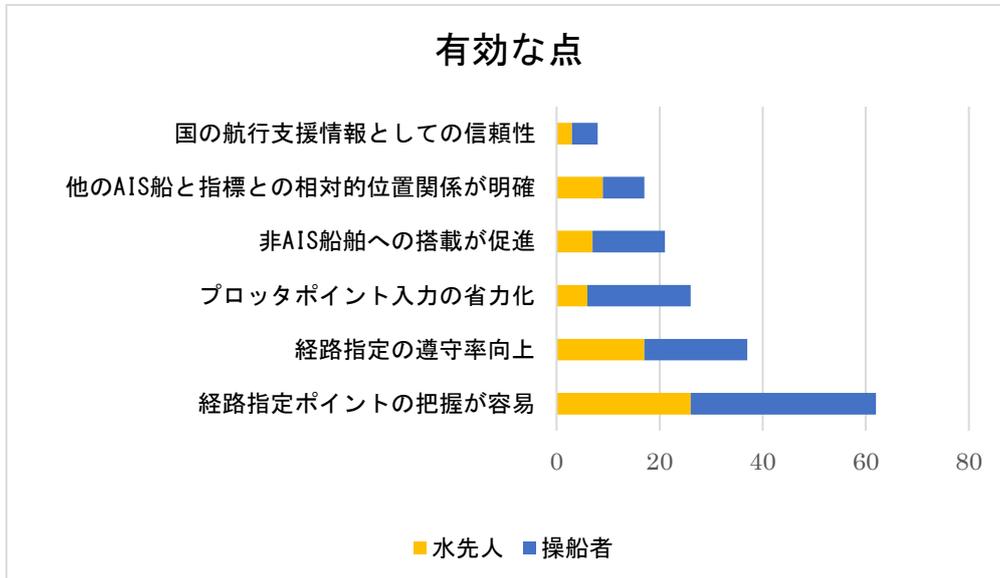


図 4-32 AIS 航路標識の有効な点

一方で、視認した運航者で、有効でないと回答した理由を複数、項目を選択または、記述してもらったところ、下記の図 4-33 に示す結果となった。有効で無い理由の主な 2 つは、他の計器で確認できることと紛らわしい・誤認するとのことであった。

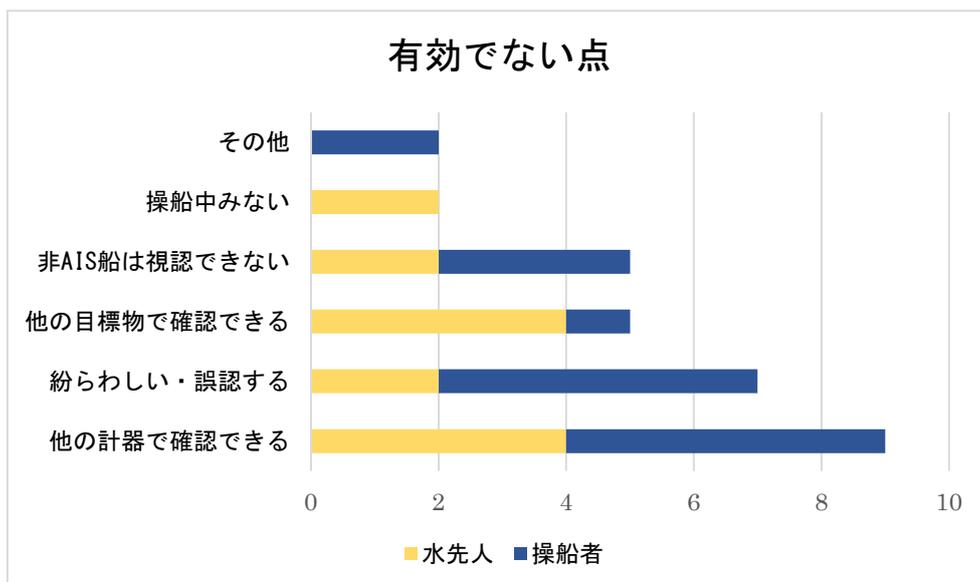


図 4-33 AIS 航路標識の有効でない点

大阪湾海上交通センター管制官への聞き取り調査を行なったところ、経路指定に関する指導を行なう際、バーチャル AIS が表示される船舶に対して、円滑な指導が可能だったとの意見があった。これらの意見と調査から、海上保安庁は、バーチャル AIS は、海上交通の安全性向上に有効と判断した。

以上のアンケート結果は、バーチャル AIS が整流効果を持つことを示しており、IWRAP による効果の評価の裏付けになると考える。

4.10.9 整流の有効性の評価のまとめ

バーチャル AIS による整流の効果を IWRAP を用いて評価するために、交通流の状態の可視化とリスク計算による定量的な評価を行った。評価は、バーチャル AIS が表示されている友ヶ島水道と明石海峡で行った。

友ヶ島水道での解析結果から、バーチャル AIS が表示されるエリアでの追い越し衝突のリスクの減少と、バーチャル AIS が表示された海域の後の現実に存在する洲本沖灯浮標のエリアでリスクの減少が確認できた。

明石海峡での解析結果から、追い越し衝突のリスクは微増したが、正面衝突や海域全体のリスクの減少が確認できた。

また、4.10.8 項で示したアンケート結果からバーチャル AIS が整流効果を持つことが示され、IWRAP による効果の評価の裏付けになると考えられる。以上のことより、IWRAP により整流の効果を確認できたと考える。

4.11 第4章のまとめ

第4章では、安全運航実現のために交通情報の事前提供が必要と考え、IWRAPによる海域のリスク評価を実施した。

東京湾のAISデータを用いて解析対象日数を変更してリスク評価を行った。そして、IWRAPで使用するデータ量は、3日以上必要ということが分かった。

通常と異なる状況下においてもリスクを評価できるかを検証するために、東京湾のAISデータを用いて東日本大震災と2011年、2014年の台風襲来時のリスク評価を行った。そして、交通流の描画や先行研究との傾向の一致が見られたため、通常と異なる状況下においてもリスクを評価できると考える。

友ヶ島水道と明石海峡のリスク計算結果から、バーチャルAISによる整流の効果をIWRAPで確認することができた。ただし、整流により船間距離が短くなることにより、リスクが高くなる場合もあった。

以上の結果から、IWRAPの評価を情報として輻輳海域を航行する船舶に提供することは、安全運航に有効と考える。

第 5 章 モニタリングデータの有効活用について

5.1 モニタリングデータの有効活用の目的

図 5-1 に本論文における第 5 章で述べる支援の位置づけを示す。本章での目的は、大洋航行中、環境に配慮した運航を行えるよう支援を行うことである。環境に配慮し、航路選定や速力調整による最適な運航を実現するためには、個々の船舶の性能を精度よく把握し、実海域における船舶の性能を推定することが求められる。

近年、モニタリング装置の開発と搭載が進み、モニタリングデータの収集が可能になった。モニタリングデータとは、海上における船舶の船体運動や機関運動を監視(モニタリング)したデータのことである。表 5-1 に解析目的に応じたデータの必要項目と想定される利用者をまとめた表⁽¹⁾を示す。目的に応じて様々なデータが必要となる。

しかし、計測したままの生のモニタリングデータには、欠損データを含む明らかな異常値が含まれており、解析目的に応じたデータの排除やデータの補完を行うクリーニングが必要となる。本章では、船舶の性能推定に欠かせない対水速力の検討と、船舶の定常状態の解析を行うためのデータクリーニングの検討を行った。

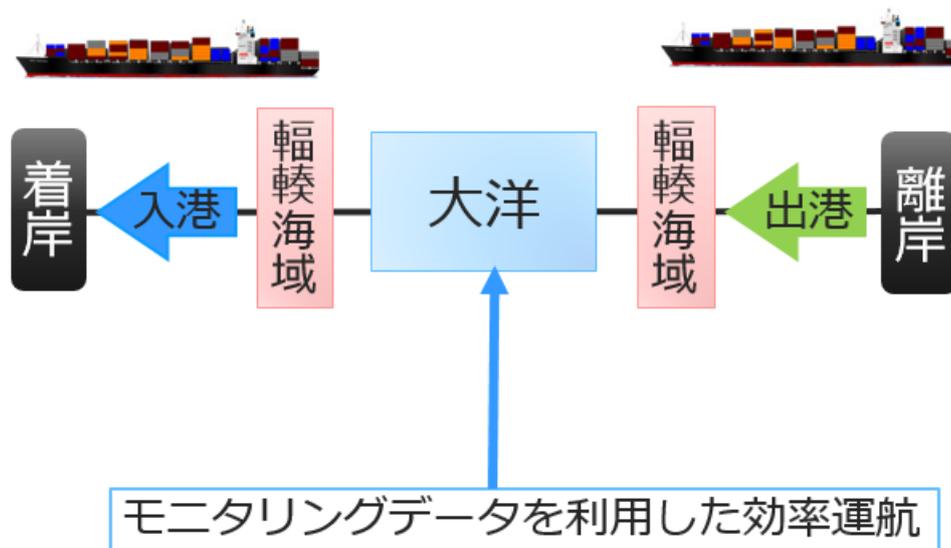


図 5-1 航行海域とモニタリングデータの有効活用

表 5-1 船舶のモニタリングデータの項目と想定される利用者

目的		解析に必要なデータ項目	想定される利用者
動静管理		位置、時刻	荷主、船社
運航管理	エネルギー効率 運航分析	航海距離、燃費	荷主、船社
航海管理	エネルギー効率 航海分析	燃料消費量、馬力、船速、 外力、排水量	船社
航海支援		燃料消費量、馬力、船速、 外力、排水量	船社、船舶
船舶性能評価	船舶性能解析	馬力、船速、外力	船社、造船所

5.2 モニタリングデータの対水速力の欠損部分の補完方法の検討と適用結果

5.2.1 解析対象船舶の対水速力データの異常

計測データの中で、特に対水速力は運航解析上不可欠な項目であり、可能な範囲で異常値補正や補完が必要となる。しかし、計測されたモニタリングデータの項目のうち、対水速力の計測値を使うことのできない船舶が性能推定を行う 42 隻の船舶のうち 13 隻いることが判明した。使うことができない理由は、2 つあった。1 つ目は、対水速力計が船舶にない、または故障しているため、計測値がない船舶である。2 つ目は、計測値はあるが、対地速力と対水速力の差(以降、海流速度と表記する。)が大きいことである。航海中の定常運航時の対地・対水速力、プロペラ回転数、ピッチ角の 4 つの項目を縦軸に、横軸を時刻とした折れ線グラフを図 5-2(a)と図 5-2(b)に示す。図 5-2(a)は、海流速度が小さなケース、図 5-2(b)は、海流速度が大きなケースである。図 5-2(b)の海流速度が大きい状態は、海域によるものの可能性を考え、同時期に付近海域航行の計測値のある船でも同様のグラフを作成したが、海流速度が大きい状態はなかった。そのため、海流速度が大きい状態は、計測値が正常状態ではないと考えられる。

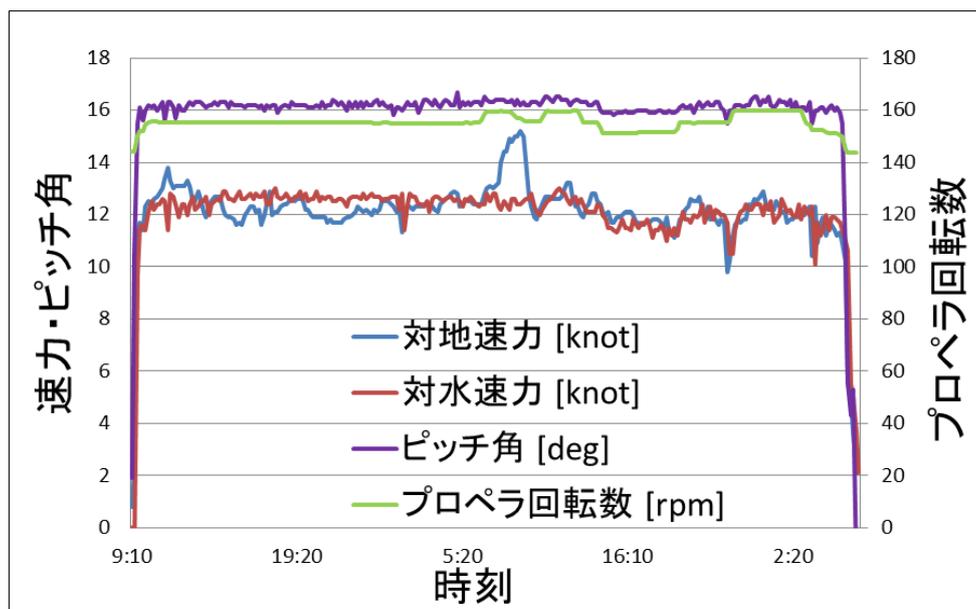


図 5-2(a) 航海中の時系列データ(海流速度が小さい)

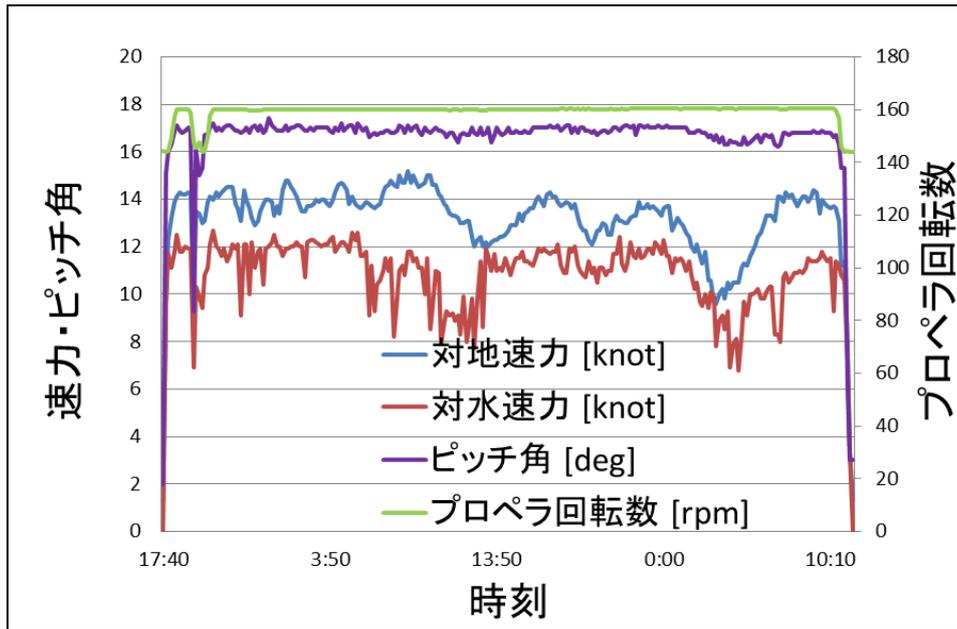


図 5-2(b) 航海中の時系列データ(海流速度が大きい)

正常データと異常データの状態を調べるため、縦軸に海流速度、横軸に対水速力の見かけスリップ比を取った図 5-3 を作成した。対水速力が正常な船のデータでは、海流速度 1knot 以下のケースが大部分を占めた。そのため、対水速力の比較検討を行う際の正常状態と異常状態の判断基準として、海流速度 1 knot 以下を用いることにした。

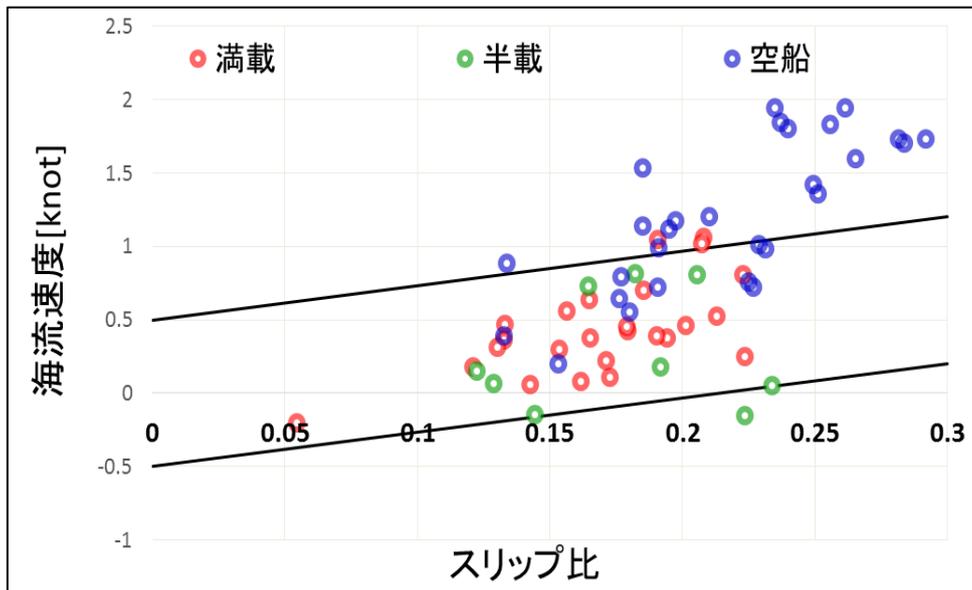


図 5-3 海流速度と対水速力の見かけスリップ比

5.2.2 対水速力推定法の条件

性能解析の対象となるモニタリングデータは、各対象船舶ごとに2年間分あり、喫水、排水量等の航海状態を表す数値、10分毎の日時、位置、方位、対地速力、対水速力、主機馬力、プロペラ回転数、プロペラピッチ角、燃料消費量、相対風向・風速等の計測値と気象・海象及び海流予測値により構成されている。データの復旧、修復は難しいため、他の計測値からの推定が必要となった。

基本的な対水速力の推定手法は、既に、速力試験解析法⁽²⁾として確立されており、航海時の対水速力推定法⁽³⁾も実験的検証により、精度、有用性共に確認されている。いずれも、プロペラ理論を基に、対象船の推進性能情報やプロペラの特徴を用いる精緻な方法であるが、2つの理論とも2年間のモニタリングデータ処理に難がある。また、主機馬力が計測されていない船舶も含まれており、代わりに燃料消費量が解析対象となっている。これらの事情を考慮した対水速力推定法が必要と判断された。

本論文では、プロペラ理論を基に計算プロセスの簡素化と、対象船主要目及び性能が類似で、特定航路の往復航海が大半を占める船舶のモニタリングデータの特徴や速力等の計測データの実態を考慮して、5種の対水速力推定法を比較検討し、選定した手法を対象船の欠損データ補完に適用することにした。5.2.4項から5.2.8項に5種の対水速力推定法を比較検討した結果を示す。

5.2.3 スリップ比について

本項では、第5章で用いるスリップ比について述べる。スリップ比⁽⁴⁾とは、下の式に示すように、ピッチと回転数を掛け合わせた船舶が理論上進んだ距離を船が実際に進んだ距離で割った値のことである。

$$\text{スリップ比} = \frac{\text{船舶が理論上進んだ距離(ピッチ} \times \text{回転数)}}{\text{船が実際に進んだ距離}}$$

プロペラ特性に注目すると、前進率(J)は、以下の式で表すことができる。

$$J = \frac{30.87 \times Va}{N \times D}$$
$$J = p \times (1 - S)$$

前進率: J、プロペラ回転数: N(rpm)、プロペラ直径: D(m)、プロペラへの流入速度: Va(knot)
ピッチ比: p、スリップ比: S

この前進率の式での係数 Va(プロペラへの流入速度)を船の速度としたときに求められるのが、見かけのスリップ比である。見かけのスリップ比は、以下の式で表すことができる。見かけのスリップ比が、大きい場合は、プロペラは逆転状態を示し、小さい場合は、空転状態を示す。

$$\text{見かけのスリップ比} = 1 - \frac{\text{速度}}{N \times D \times p} \times 30.87$$

5.2.4 対水速力推定法の検討①風浪中航行推進性能方程式による方法

風浪中航行推進性能は平水中推進性能と風浪中抵抗増加起因の性能損失の和で表せる。すなわち、合計馬力(BHPt)は、平水状態馬力($A \cdot V_s^3$)、風抵抗馬力計算値(BHPa0)、波抵抗馬力計算値(BHPw0)、風抵抗修正係数(aa)、波抵抗修正係数(aw)により(1)式で表せる。 V_s は対水速力(knot)、Aは基本性能係数を示す。

$$A \cdot V_s^3 + aa \cdot (BHPa0) + aw \cdot (BHPw0) = BHPt \quad (1)$$

上の(1)式は、風速 V_w 、風向 θ 、波高 H_w 、波方向 ϕ 及び風抵抗特性や波抵抗特性をまとめた $B(\theta)$ 、 $C(\phi)$ 等により構成される対水速力 V_s の3次方程式⁽⁵⁾となる。

$$\begin{aligned} & (A + B(\theta)) \cdot V_s^3 + 2 \cdot V_w \cdot \cos \theta \cdot B(\theta) \cdot V_s^2 \\ & + (B(\theta) \cdot V_w^2 + C(\phi) \cdot H_w^2) \cdot V_s - BHPt = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

基本性能係数、風、波抵抗修正係数及び風、波抵抗特性を既知とし、各データの馬力計測値、風、波予測値(又は計測値)を与え、(2)式の解として対水速力が求められるが、解析済のデータの局所的欠陥補正以外は適用出来ない。

そのため、この手法は用いることができなかった。

5.2.5 対水速力推定法の検討②計測データとプロペラ推定特性による方法

この方法では、計測データより、主機馬力、プロペラ回転数、ピッチ比を用いる。そして、MAU シリーズを適用し、プロペラ推定特性を求めるプロセスを使う。

トルク係数 Kq 及び前進率 J は、伝達馬力 $DHP(ps)$ 、プロペラ回転数 $N(rpm)$ 、プロペラ直径 $D(m)$ 、プロペラへの流入速力 $Va(knot)$ により式(3)、(4)で表せる。推進効率比 η_r 、伝達効率 η_t 、主機馬力 $BHP(ps)$ 、対水速力 $Vs(knot)$ 、伴流率 $(1-ws)$ より、式(5)、(6)で表せる。

$$Kq = \frac{24670 \cdot DHP}{N^3 \cdot D^5} \quad (3)$$

$$J = \frac{30.87 \cdot Va}{N \cdot D} \quad (4)$$

$$DHP = BHP \cdot \eta_r \cdot \eta_t \quad (5)$$

$$Va = Vs \cdot (1 - ws) \quad (6)$$

MAU シリーズデータから推定・整備したピッチ比 p の Kq と J の関係から、伴流率 $(1-ws)$ を求めるプロセスを1航海のモニタリングデータ中の対水速力変化が少ないケースに適用して標準伴流率を設定し、他のケースに適用し、馬力、回転数計測値から対水速力を推定し補正・補完値とする方法を検討した。本項以降の検討において、対水速度の推定法の評価は、正常な海流速度であった船舶のデータを用い計算した推定値と計測値の頻度分布と散布図による相関、計測値と推定値の平均値を用いる事とする。図 5-4(a)に計測値、図 5-4(b)に推定値の頻度分布を示す。図 5-4(c)に縦軸が推定値、横軸が計測値の散布図を示す。

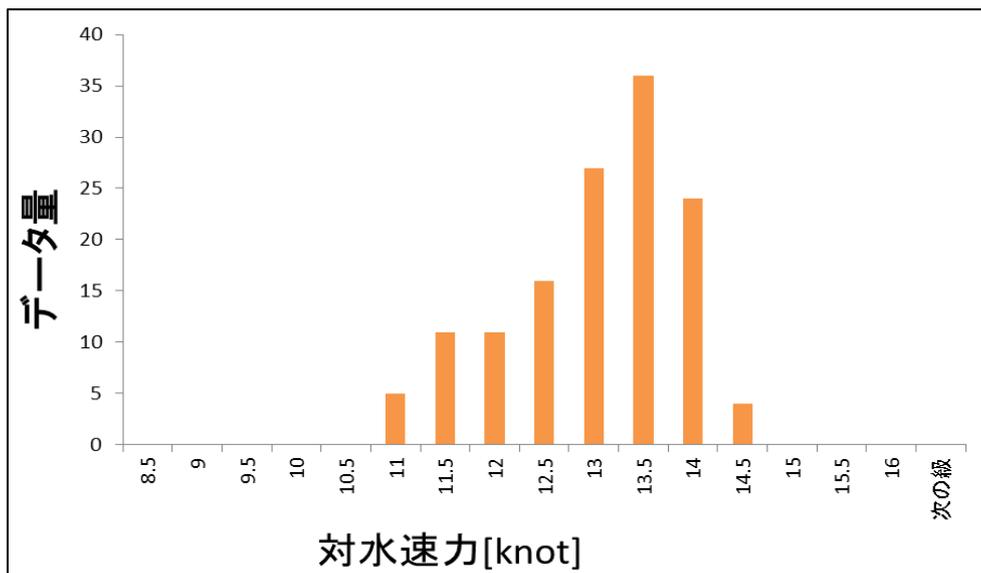


図 5-4(a) 計測値頻度分布

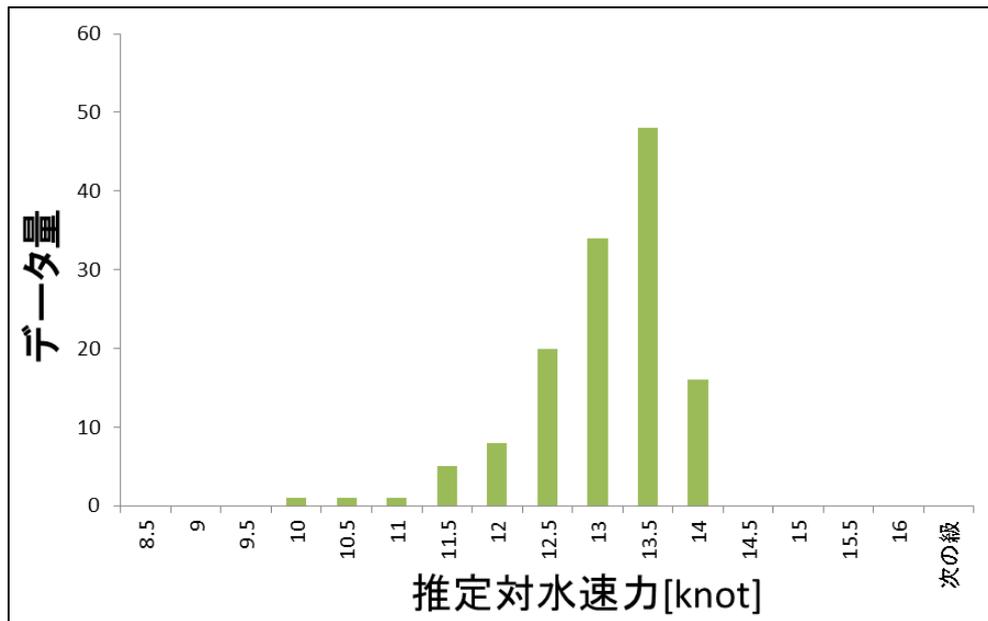


図 5-4(b) 推定値頻度分布

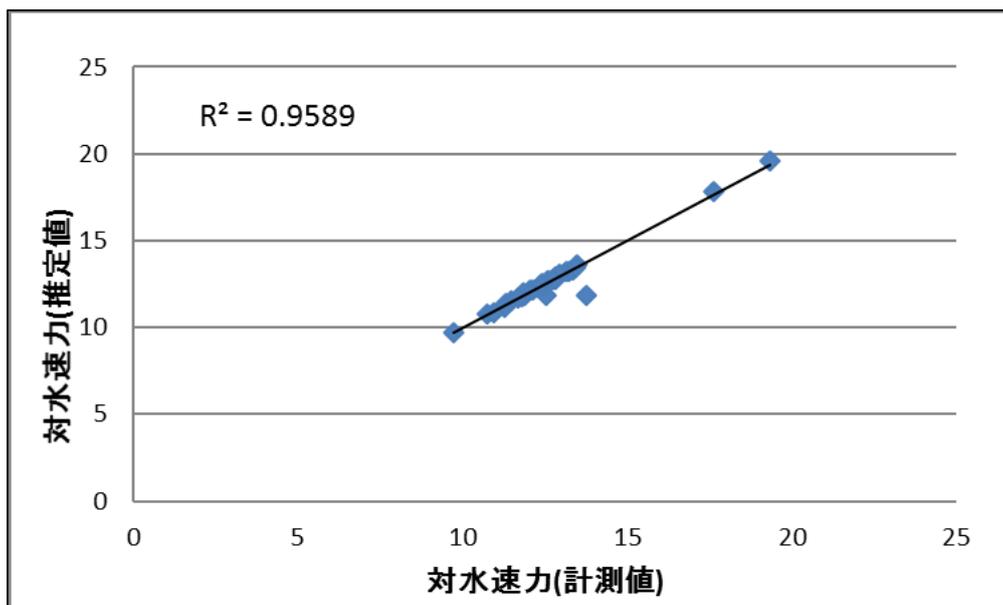


図 5-4(c) 推定法②の計測値と推定値の相関

相関も 0.9589 と高く、推定精度は良好であるが、1 航海約 30 時間程度の結果であり、長期間の膨大なデータ処理には、標準値設定や演算等プロセス上難がある。また、主機馬力を用いるため、主機馬力と燃料消費量の関係が課題となる。そのため、この手法は用いることができなかった。

5.2.6 対水速力推定法の検討③海流予測値による方法

モニタリングデータではないが、10分ごとに計算された船舶の航行海域の海流予測値と対地速力計測値の和を対水速力とする方法を検討する。この方法は、主機馬力データが不要で、簡素な計算式であることから、多量のデータ処理に適していると考えられる。推定結果を図5-5に示す。図5-5は、縦軸が推定値、横軸が計測値の散布図である。

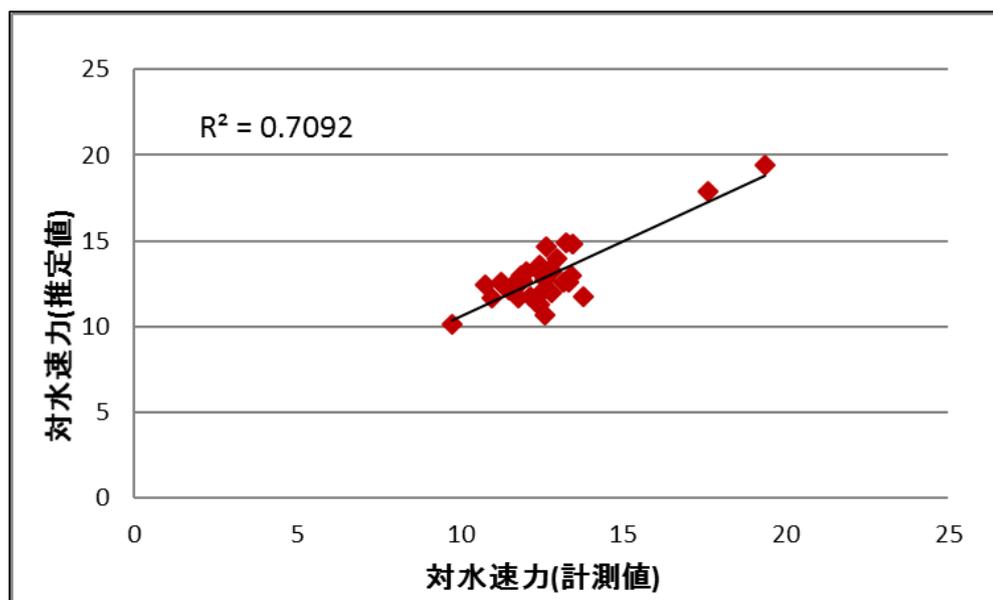


図 5-5 推定法③の計測値と推定値の相関

図5-5に示す様に5.2.5項の方法に比べて相関が0.7092と低く、精度上課題が残る。そのため、この手法は用いることができなかった。

5.2.7 対水速力推定法の検討④計測データから設定したプロペラ荷重度と前進率の関係式を用いる方法(合理化案-1)

本論文で対象とした船舶のモニタリングデータには、定常状態でない異常値を含む可能性を考慮し、プロペラ理論を応用する方法を検討した。プロペラ荷重度は、ピッチ比 p 、スリップ比 S により式(7)で表せる。(7)式は、馬力、プロペラ回転数による以下の式(8)となる。(8)式より、基本性能係数対応パラメータ K_{np} を設定し、見掛け前進率 J_o の関係を調査した。基本性能係数対応パラメータは、式(9)で表せる。見掛け前進率は、式(10)で表せる。

$$\frac{Kq}{J^3} = \frac{Kq}{(p \cdot (1-S))^3} \quad (7)$$

$$\frac{Kq}{J^3} = \frac{24670 \cdot DHP}{(p \cdot N \cdot D)^3 \cdot D^2 \cdot (1-S)^3} \quad (8)$$

$$K_{np} = \frac{BHP}{(p \cdot N \cdot D)^3} \quad (9)$$

$$J_o = \frac{30.877 \cdot V_s}{N \cdot D} \quad (10)$$

基本性能係数対応パラメータと見掛け前進率の相関を調査した結果を図 5-6(a)に示す。図 5-6(a)は、縦軸に基本性能係数対応パラメータ、横軸に見掛け前進率の散布図である。基本性能係数対応パラメータと見掛け前進率のデータ全体の相関は、低いですが、図 5-6(a)中示した青の点線丸部分に注目すると、一定の相関が認められる。そのため、この図から得られた近似式を用いてプロペラ荷重度と前進率の関係から対水速力を推定した。

図 5-6(b)に本手法を用いた対水速力の推定値と計測値の散布図を示す。図 5-6(b)は、縦軸に推定値、横軸に計測値の散布図である。データの性質上バラツキは目立つが、図 5-6(c)に示す計測値の頻度分布図と、図 5-6(d)に示す推定値の頻度分布の対応は良く、妥当な推定法と判断した。しかし、5.2.5 項で示した手法と同じく、主機馬力を用いるため、主機馬力と燃料消費量の関係が課題となる。そのため、この手法は用いることができなかった。

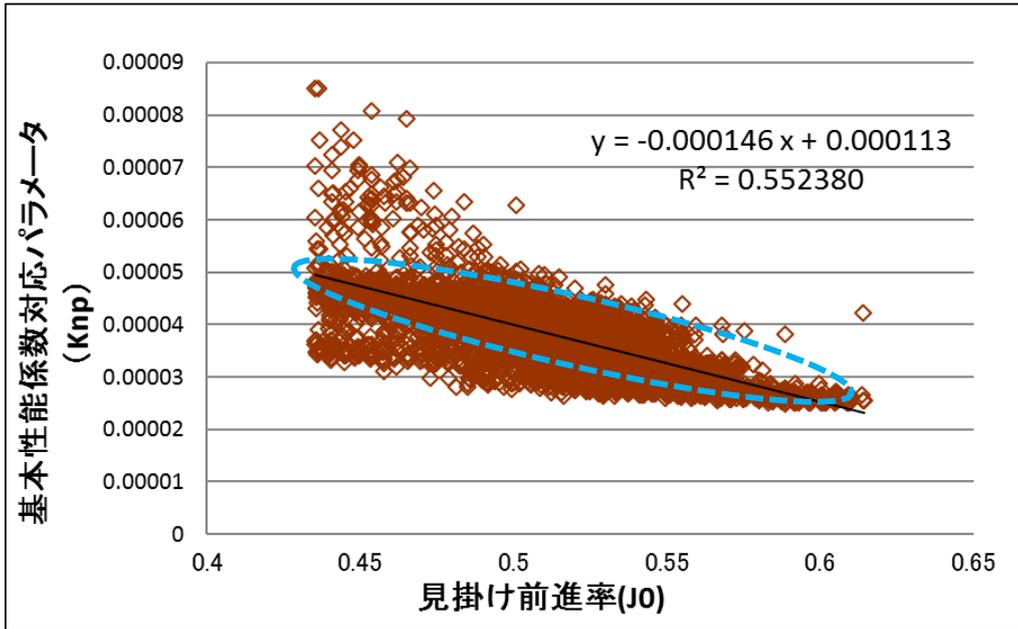


図 5-6(a) 基本性能係数対応パラメータと見掛け前進率の相関

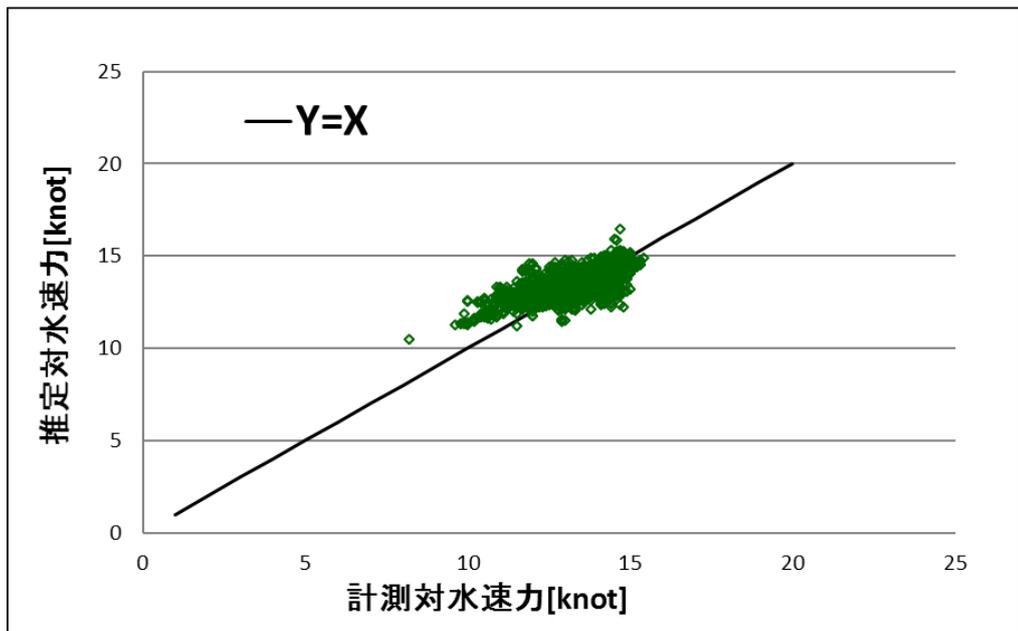


図 5-6(b) 推定法④の計測値と推定値の相関

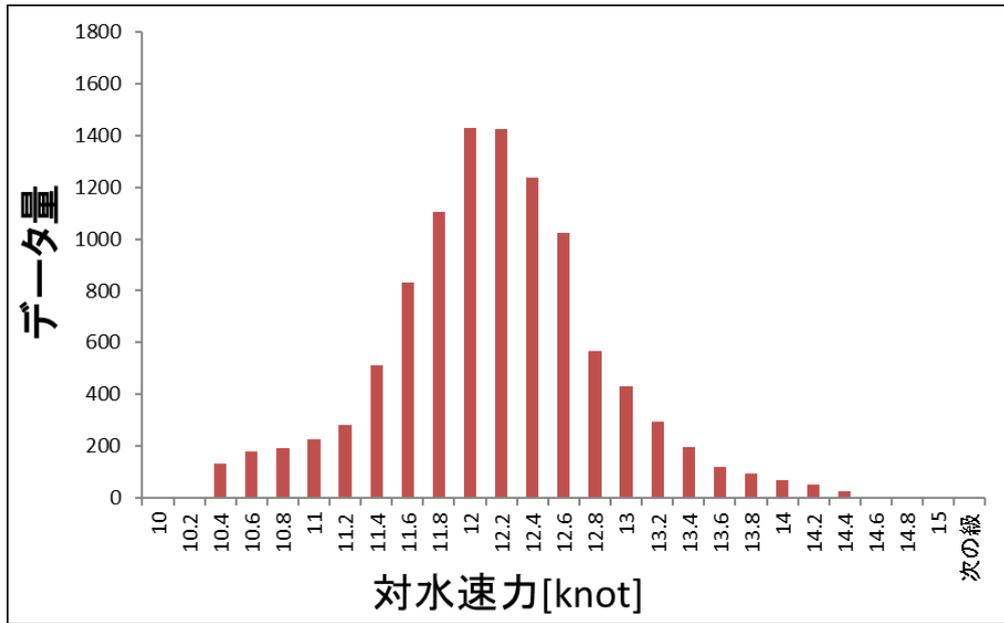


図 5-6(c) 計測値頻度分布

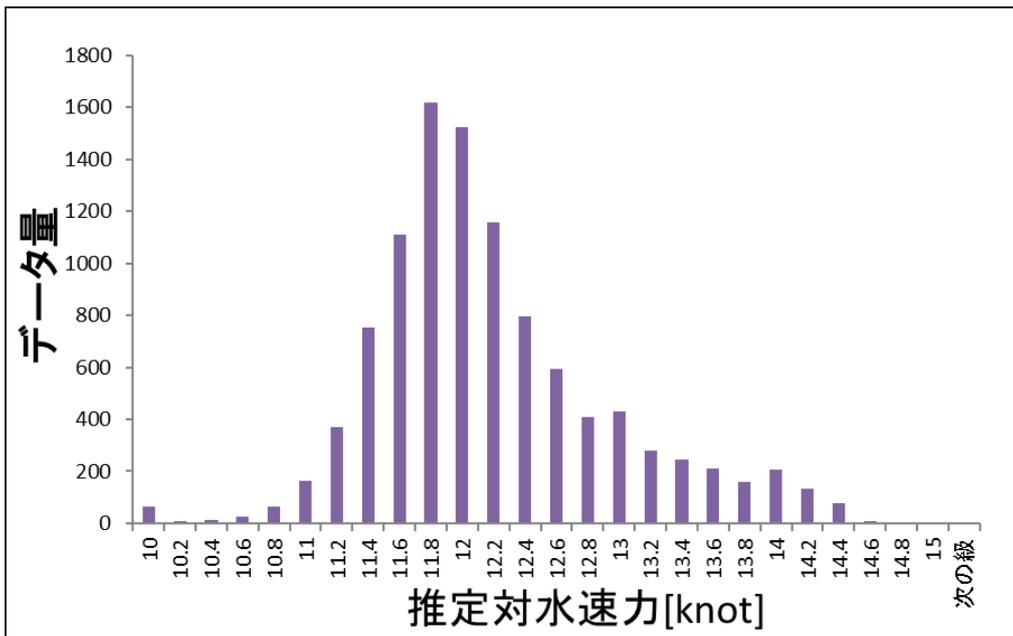


図 5-6(d) 推定値頻度分布

5.2.8 対水速力推定法の検討⑤計測データから設定したプロペラ荷重度と前進率の関係式を用いる方法(合理化案-2)

主機馬力データを必要としない方法として、対地速力と対水速力の関係をそれぞれの見掛けスリップ比の関係で評価する方法を検討した。5.2.7項で示した(10)式から、対水速力 V_s に対応する見掛けスリップ比 S_o と対地速力 V_{og} に対応する見掛けスリップ比 S_{og} により、対地・対水速力の関係が(11)式に表せる。見掛けスリップ比の関係から求めた近似式を用いて対水速力を推定する手法を検討した。図 5-7(a)に、対水速力が正常な船舶よりモデルケースとして選定した船舶の対地・対水スリップ比の相関関係を示す。この図 5-7(a)より得られた近似式を用いて、対水速力を推定した。

$$\frac{V_{og}}{V_s} = \frac{1-S_{og}}{1-S_o} \quad (11)$$

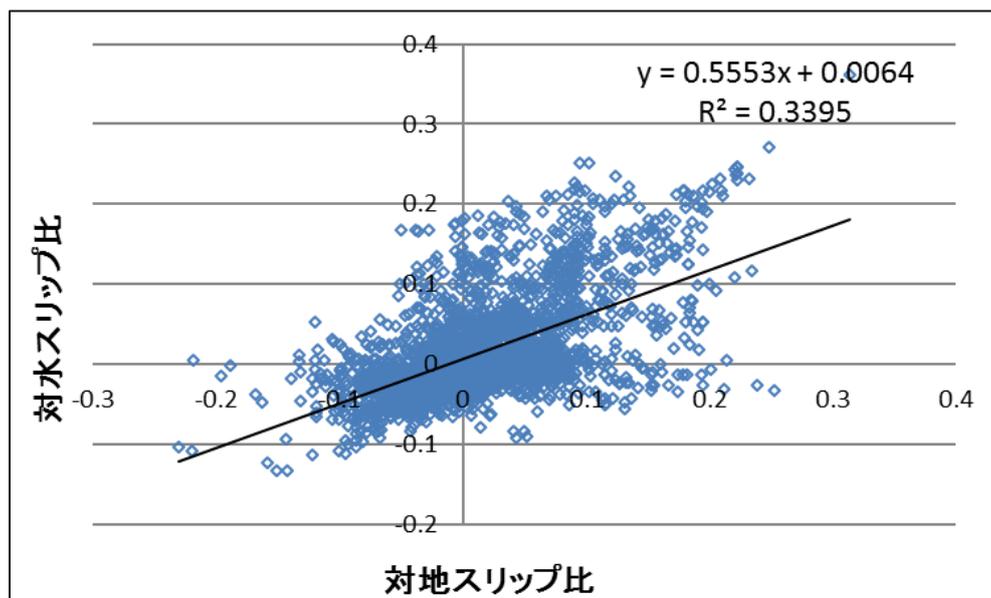


図 5-7(a) 対象船から選定した船舶の対地・対水スリップ比の関係

図 5-7(b)に本手法を用いた対水速力の推定値と計測値の散布図を示す。図 5-7(b)は、縦軸に推定値、横軸に計測値の散布図である。このデータの補完後に行われる性能推定において解析対象外となる 10knot 以下の精度は若干低いが、実用に対応し得るレベルと判断した。また、図 5-7(c)に計測値と推定値を重畳した頻度分布を示す。図 5-7(c)より、両頻度分布はほぼ重なっていることが分かる。また、計測値の平均値は、12.308 となり、推定値の平均値は、12.306 となった。平均値の面からも良好な結果といえる。

以上の結果より、本プロジェクト適用条件である主機馬力データ利用不可と膨大なデータ処理を満たす手法と判断しこの手法を用いることにした。

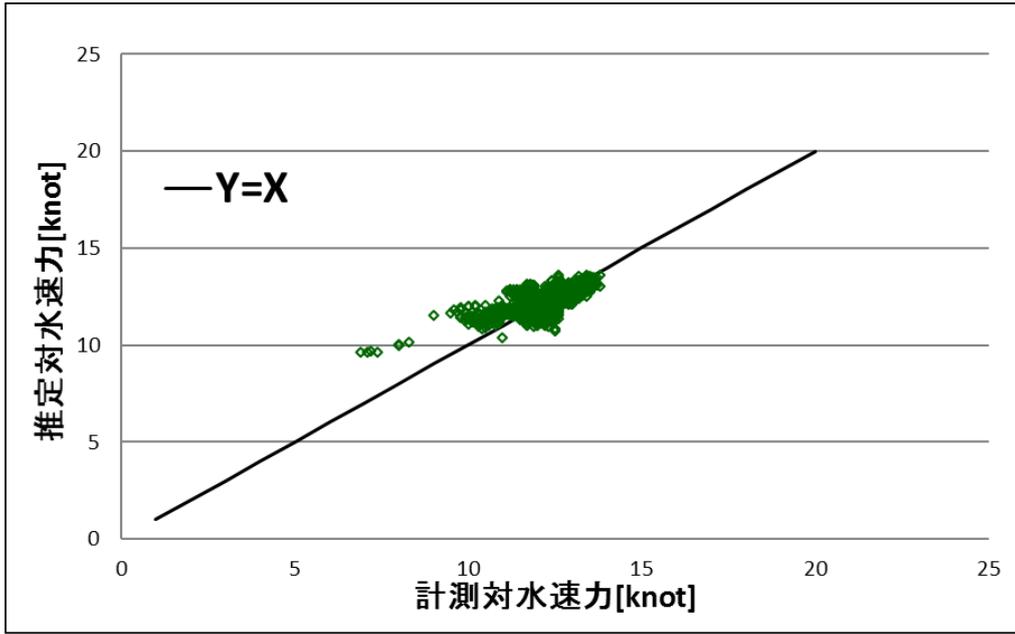


図 5-7(b) 推定法⑤の計測値と推定値の相関

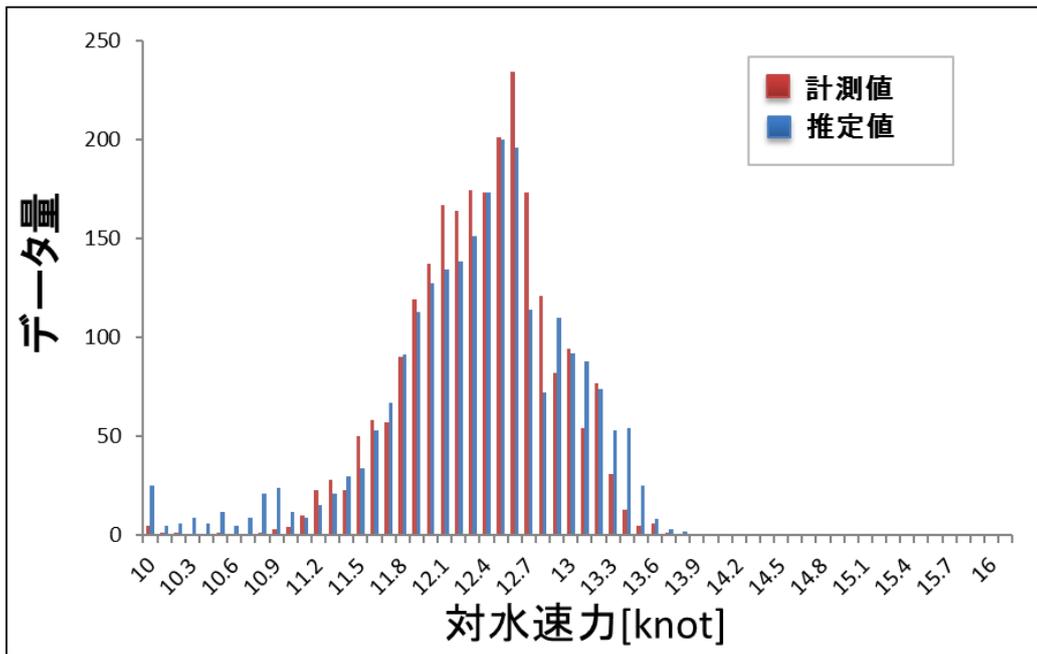


図 5-7(c) 推定法⑤の計測値と推定値の重畳頻度分布

5.2.9 推定法を適用した結果

対象船 13 隻に、5.2.8 項の手法を適用し、対水速力データの補完を行った。図 5-8(a)に 13 隻中 1 隻の計測対地速力頻度分布と、図 5-8(b)に推定した対水速力頻度分布を示す。平均値は、対地速力が 11.983 となり、推定した対水速力は 12.085 となり、近い値となったが、対地速力の変動は対水速力に比べて大きかった。この傾向は、他の 12 隻でも同様に見られた。

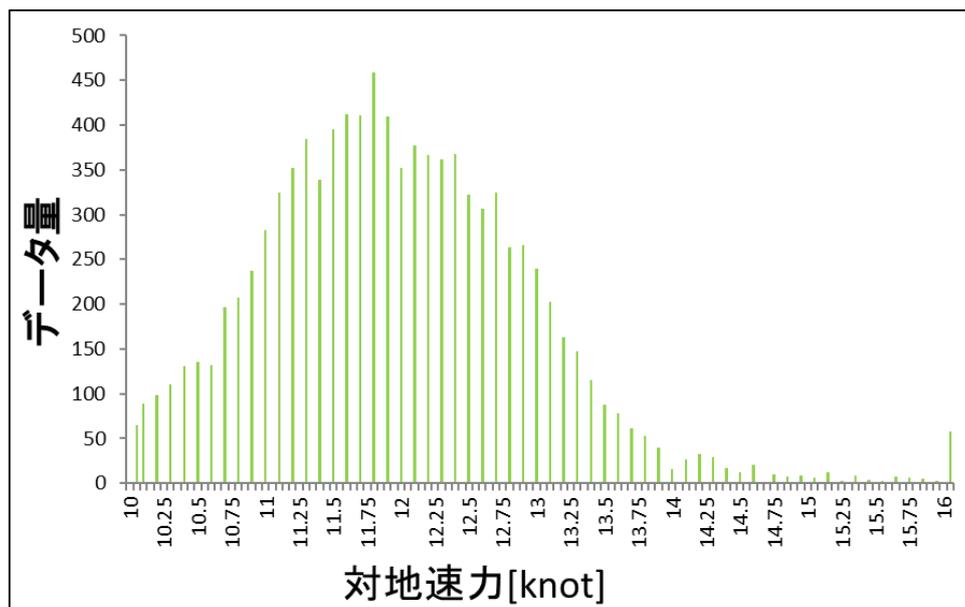


図 5-8(a) 計測対地速力頻度分布

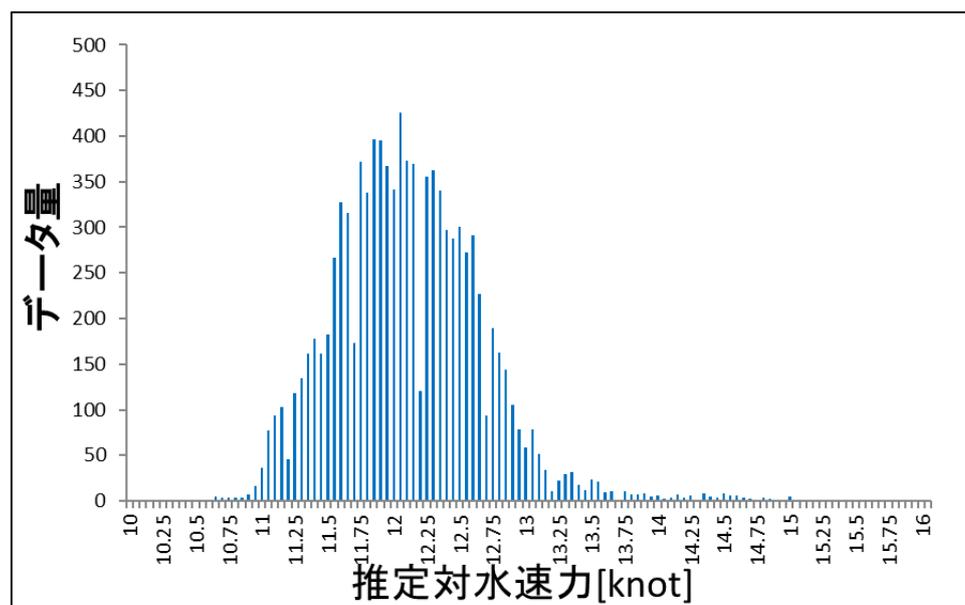


図 5-8(b) 推定法⑤を用いた推定対水速力

図 5-9(a)に、計測された対地速力と推定した対水速力のそれぞれ 1 隻ごとの平均値の散布図を示す。図 5-9(a)は、縦軸に推定した対水速力、横軸に計測された対地速力の散布図である。図 5-9(b)に海流速度と推定した対水速力のそれぞれ 1 隻ごとの平均値の散布図を示す。図 5-9(b)は、縦軸に海流速度、横軸に推定した対水速力の散布図である。

図 5-9(a)より、推定した対水速力と計測した対地速力に高い相関があることが分かる。図 5-9(b)より、評価の目安とした海流速度 1 knot 以下であることが分かる。

以後進められた船舶の性能解析や評価において、対水速力データの補完を起因とする問題は生じていないため、結果は良好と考える。

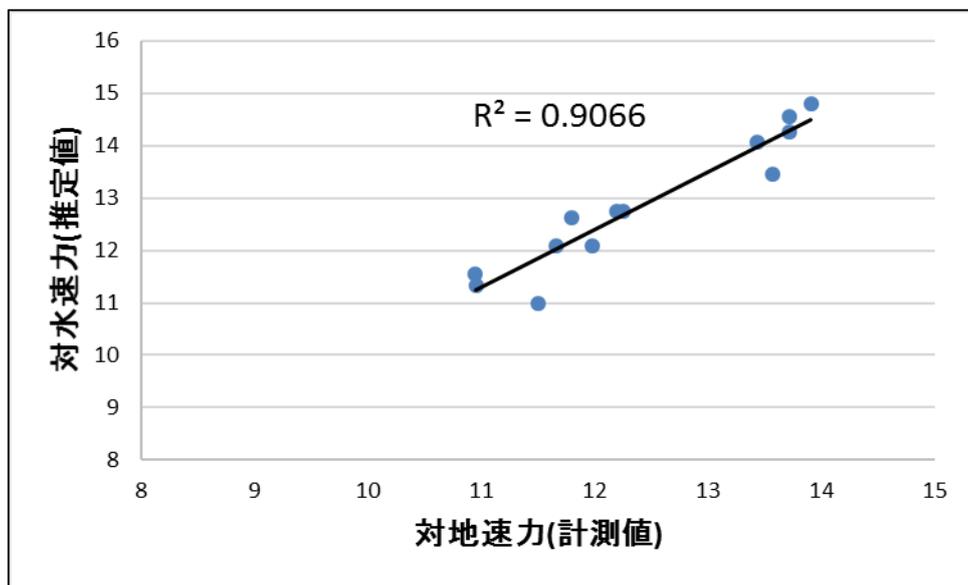


図 5-9(a) 計測対地速力と推定した対水速力の相関

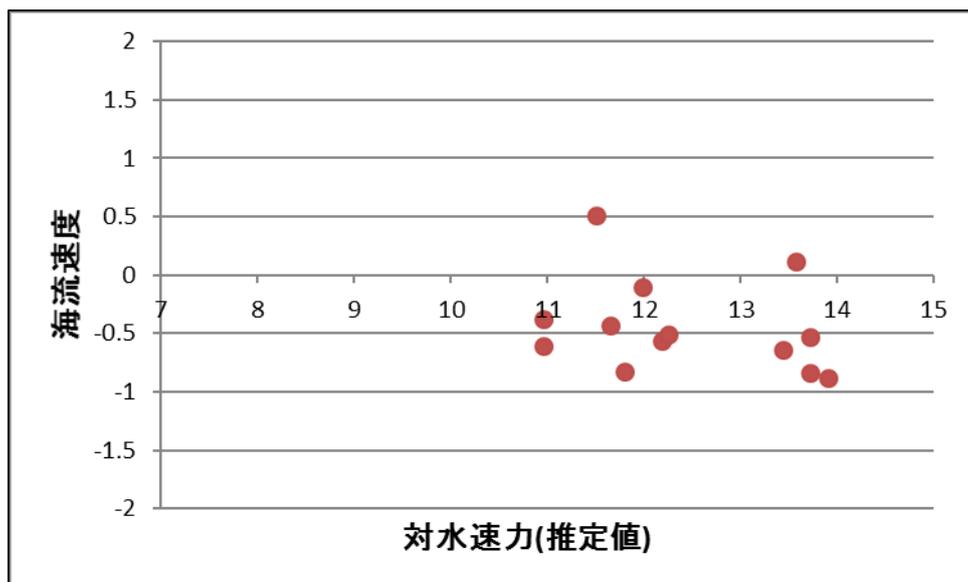


図 5-9(b) 海流速度と推定した対水速力の関係

5.2.10 対水速力推定法のまとめ

モニタリングデータ中の対水速力データの補正や欠損データの補完方法について、類似船舶のモニタリングデータの実態を考慮して、理論的合理性に基づく簡素なプロセスを目指し、頻度分布特性評価に重点を置いて、5 種の方法を具体的なデータを用いて比較検討した。以下に推定法ごとの結果を示す。

推定法①：運航性能方程式による方法では、多くのデータ項目が必要となり、局所的な補正にしか使うことができないため、不適用とした。

推定法②：計測データの中から主機馬力とプロペラ回転数を用い、プロペラ特性を用いる方法は、計算過程が複雑で大量のデータ処理に向かないため、不適用とした。

推定法③：海流予測値と計測されている対地速力を足し合わせる方法は、簡易で大量のデータ処理に適していたが、正確さに欠けたため、不適用とした。

推定法④：モニタリングデータのプロペラ荷重度と前進率の関連性から対水速力を求める方法は、精度も良かったが、主機馬力が計測されていない船舶の場合に燃料消費量から馬力への変換が必要となるため、不適用とした。

推定法⑤：基準とする船舶のモニタリングデータの対地・対水速力スリップ比の関係を利用し対水速力を求める方法は、燃料消費量から主機馬力への変換を考慮する必要もなく、精度も十分と判断し、適用した。

この推定法⑤を使用し、13 隻の船舶に対し、データの補完を行ったが、性能推定や解析において対水速力起因の問題は生じていないことから、有効な対水速力補完方法と考えられる。

5.3 モニタリングデータの異常値の取り扱いについて

5.3.1 モニタリングデータのクリーニングについて

5.1 節において、船舶の性能推定を行うためには、精度よくモニタリングデータを収集し、解析目的に応じてクリーニングが必要になると述べた。これは、船舶の運航に関する解析が多岐に及んでいるためである。図 5-10 に船舶の運航状態を示す。図 5-10 より、大きく非定常状態と定常状態に分けられ、非定常状態には、停止状態、後進状態、漂流状態が含まれることが分かる。

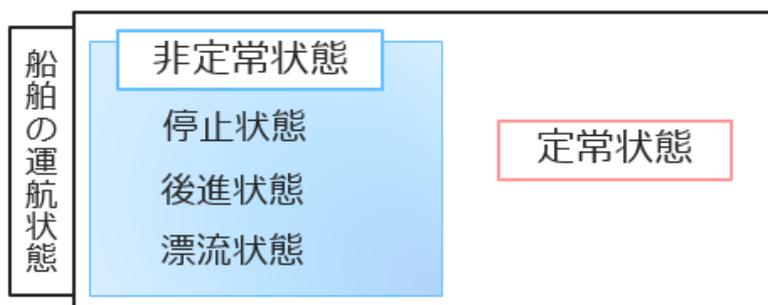


図 5-10 船舶の運航状態

本論文では、定常状態を扱う。定常状態では、計測されていない値を示す-999.99 やエラー表示、空欄、突発的に生じたと考えられる大きな値を異常値と定義する。モニタリングデータを最大限活用することを目指し、必要最小限の異常値を取り除くことを目的にクリーニングを行うことにした。

5.3.2 モニタリングデータの状態

クリーニングを行うにあたり、取り扱うデータの状態を把握することが必要と考え、統計ソフト STATISTICA を用いて、頻度分布図を作成し、データの分布を見ることにした。頻度分布図は、多数のデータのデータ分布を分かり易く表示できる利点がある。しかし、横軸のデータ区間を適切に定めないと出力したグラフに偏りができてしまうため、注意が必要である。

本論文では、A 丸の 2016 年 4 月から 6 月の 3 か月分、10 分間隔のモニタリングデータを使用した。性能推定を行う際に重要な項目となっている対水速力に着目する。図 5-11(a) に計測されたままの対水速力の頻度分布図を示す。図の右下に表示されている項目は、左から順に、グラフにデータ項目名、データ数、平均値、標準偏差、最大値、最小値となっている。

図 5-11(a)より、何もデータにしていない状態では、図中に赤四角で示したように、最小値に-999.99 が出ていることが分かる。この明らかに解析に使用しない部分を削除することにした。明らかな異常値を削除後の頻度分布図を図 5-11(b)に示す。図 5-11(b)より、明らかな異常値を削除したにも関わらず、負の速力が存在していることが図中に赤四角で示すように分かる。原則、定常状態の解析を行う際には、停止している部分のデータは扱わない。そこで、定常状態で正規分布を示すスリップ比に基づいてクリーニングを行うことにした。

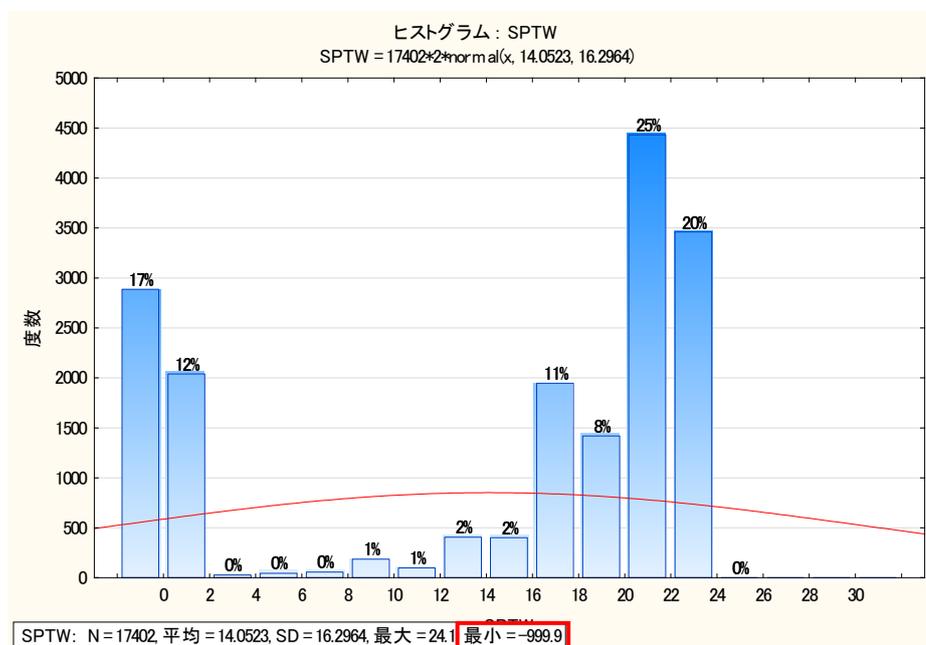


図 5-11(a) 計測されたままの対水速力

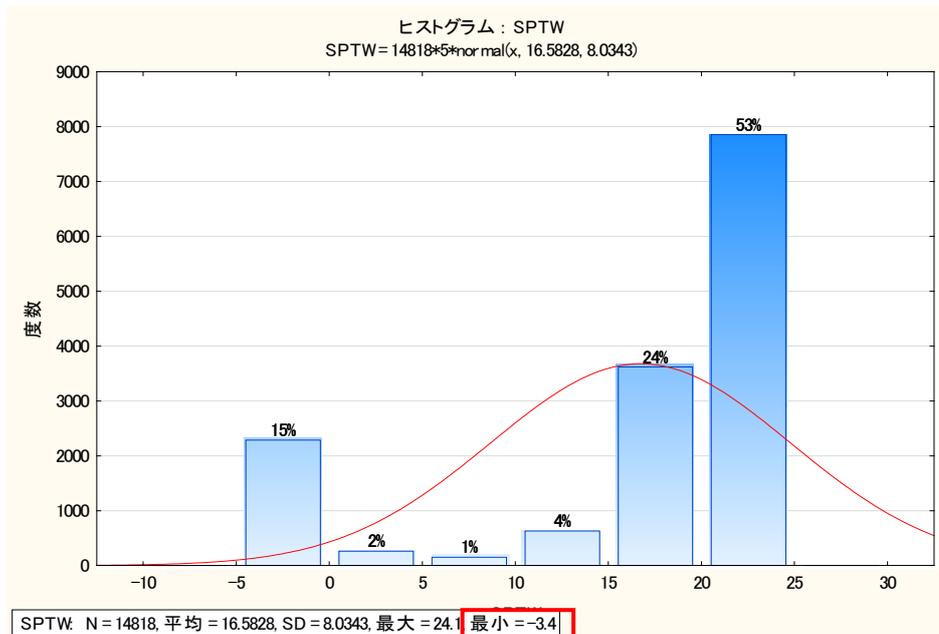


図 5-11(b) 明らかな異常値を削除した対水速力

5.3.3 正規確率プロットを用いたスリップ比の状態の検証

スリップ比は、定常状態であれば正規分布を示すと武隈は知見に基づき述べている。そのため、正規確率プロット⁶⁾を用いて、明らかな異常値を削除後のデータからスリップ比を 5.2.3 項に基づいて算出し、検証することにした。正規確率プロットには、P-P プロットと Q-Q プロットの 2 種類がある。ここでは、Q-Q プロットを正規確率プロットとして扱う。Q-Q プロットは、縦軸に正規期待値と横軸に自分の解析しているデータを取ったグラフである。正規期待値は、ヒストグラムが正規分布だった場合にとることができる値のことである。P-P プロットは、縦軸に計測値が正規分布に従う場合の累積確率の期待値、横軸に計測値の順位に基づく累積確率を取ったグラフのことである。図 5-12(a)にスリップ比の正規確率プロットを示す。この正規確率プロットは正規分布に近いほど、図中の赤い線に対して直線を描く。図 5-12(a)より、スリップ比は直線に近いものの、波打っているように見える。図 5-12(b)にスリップ比の頻度分布を示す。図 5-12(b)より、頻度分布のすそ野が長く、図中の赤線で示される正規分布と離れていることが分かる。

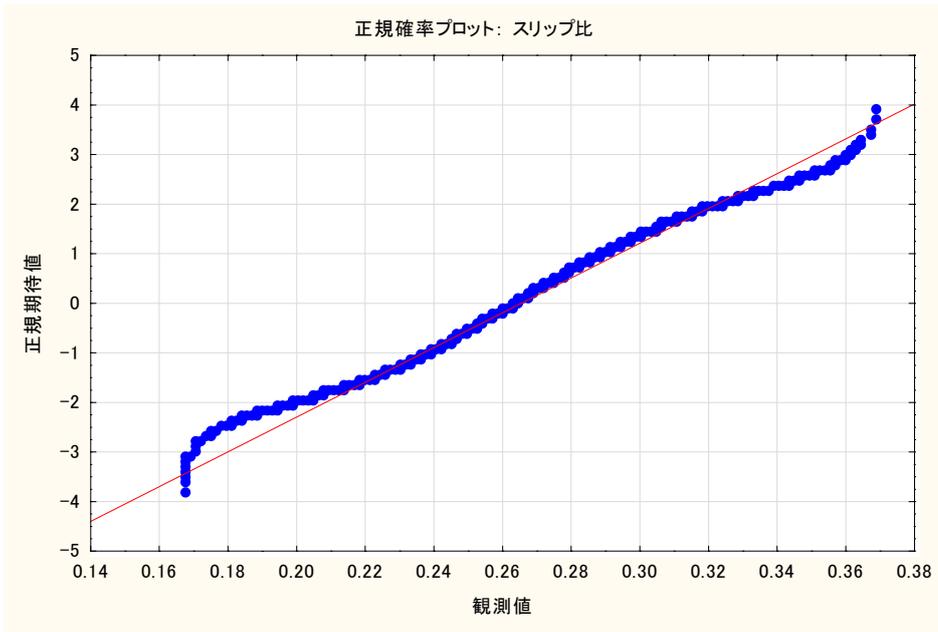


図 5-12(a) 正規確率プロットによるスリップ比

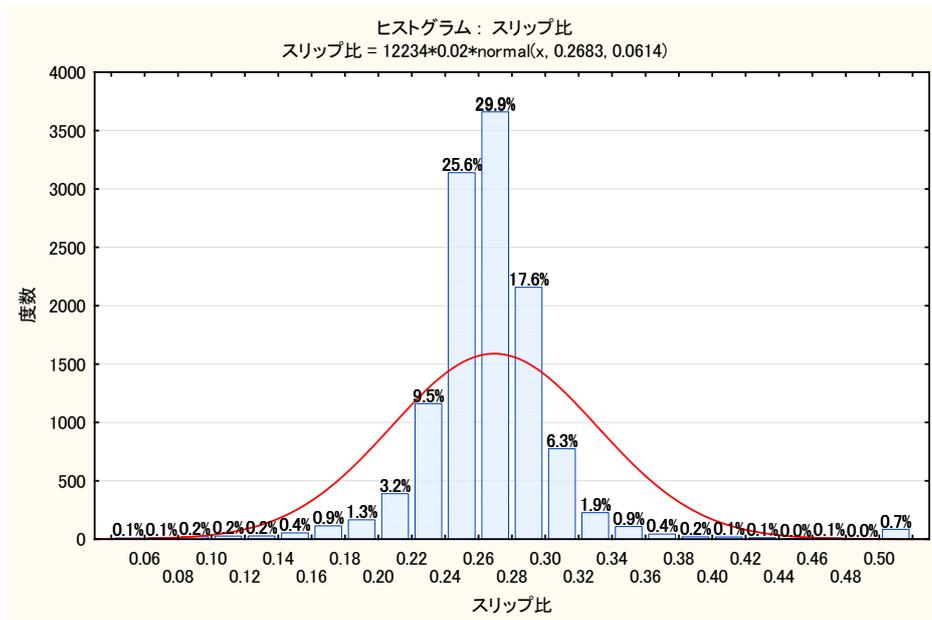


図 5-12(b) 明らかな異常値を削除した後のスリップ比

5.3.4 3つのデータ範囲での正規確率プロットの結果

5.3.3 項の結果から、統計学の信頼区間^{(7),(8)}の考え方より、5～95%、10～90%、16～84%のデータ区間でスリップ比の正規確率プロットを比較することにした。図 5-13(a)に 5～95%のデータ範囲のスリップ比を、図 5-13(b)に 10～90%のデータ範囲のスリップ比を、図 5-13(c)に 16～84%のデータ範囲のスリップ比を示す。図 5-13(a)から図 5-13(c)より、図 5-13(c)の 16～84%が最も正規分布に近いことが分かる。

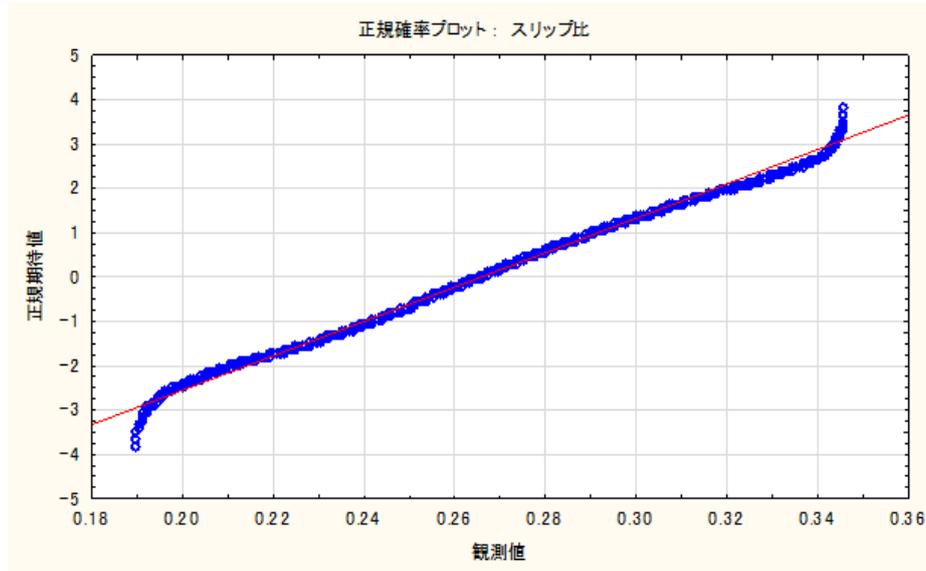


図 5-13(a) 5～95%のデータ範囲のスリップ比

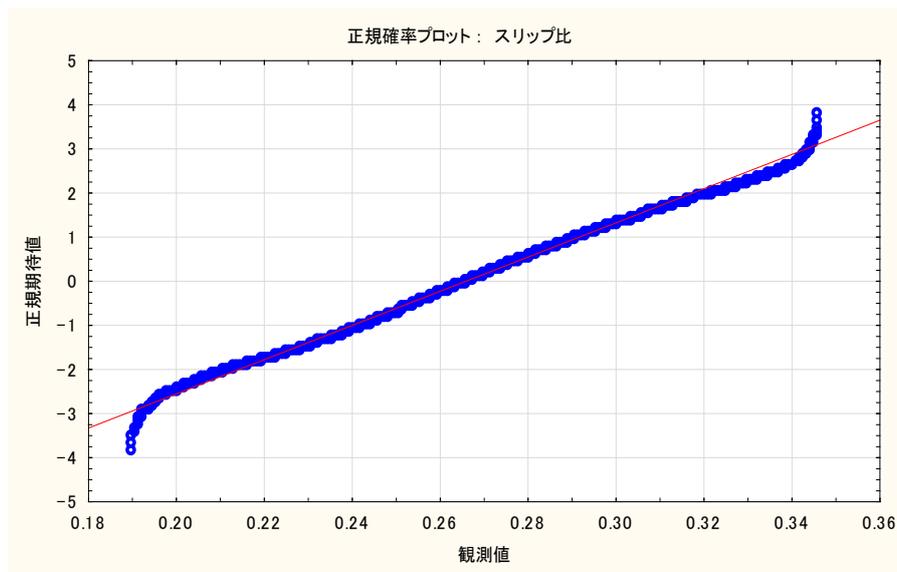


図 5-13(b) 10～90%のデータ範囲のスリップ比

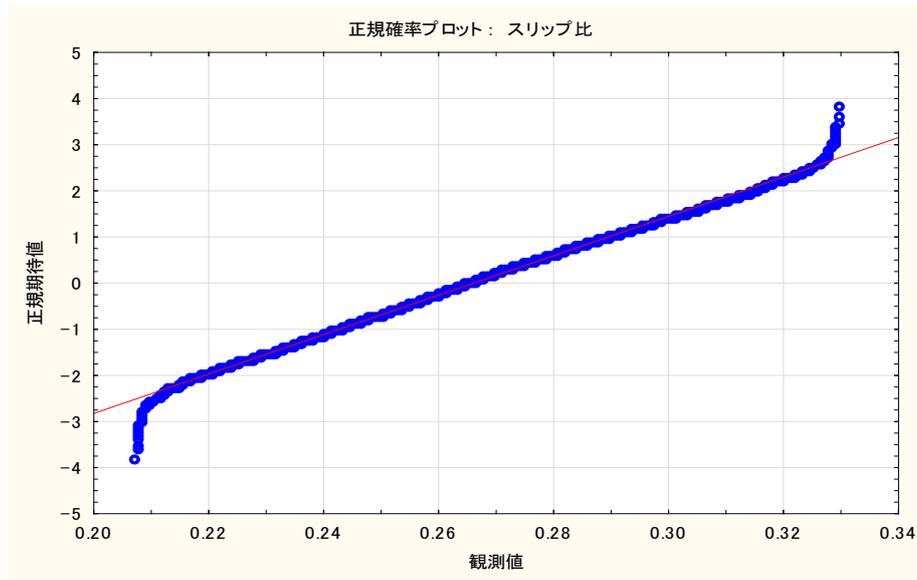


図 5-13(c) 16～84%のデータ範囲のスリップ比

スリップ比の区間において、他のデータの状態をみるために、性能に欠かせない対水速力の頻度分布図を作成した。図 5-14(a)から図 5-14(c)にデータ区間ごとの対水速力の頻度分布図を示す。頻度分布図より求めた平均値を比較すると、図 5-14(a)から 5～95%では、20.22 となり、図 5-14(b)から 10～90%では、20.31、図 5-14(c)から 16～84%では 20.40 となった。5～95%と最も正規分布に近い 16～84%で、0.18 の差しかないことが分かった。表 5-2 にデータ数の状態を割合と共に示す。表 5-2 より、5～95%では、元のモニタリングデータの 68.9%のデータ数であるのに対し、16～84%では 64.9%となっている。速力差がほとんどないため、データを多く残すために、スリップ比の 5～95%の範囲に対応するデータを利用することにした。

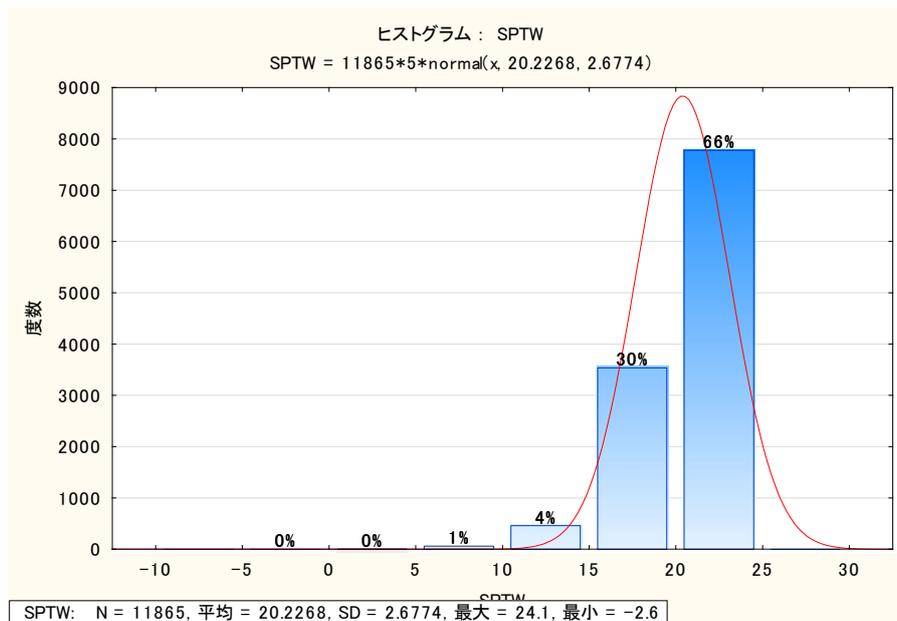


図 5-14(a) 5～95%のデータ範囲の対水速力

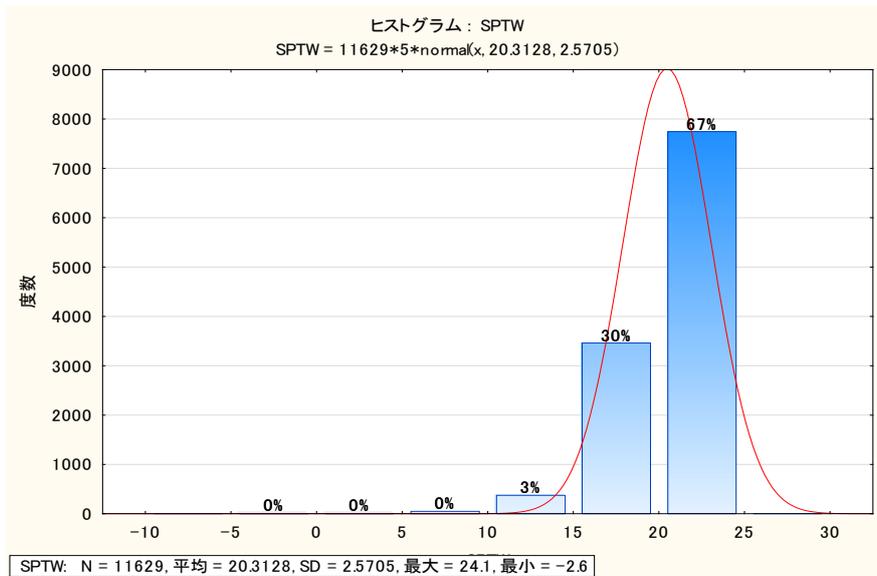


図 5-14(b) 10~90%のデータ範囲の対水速度

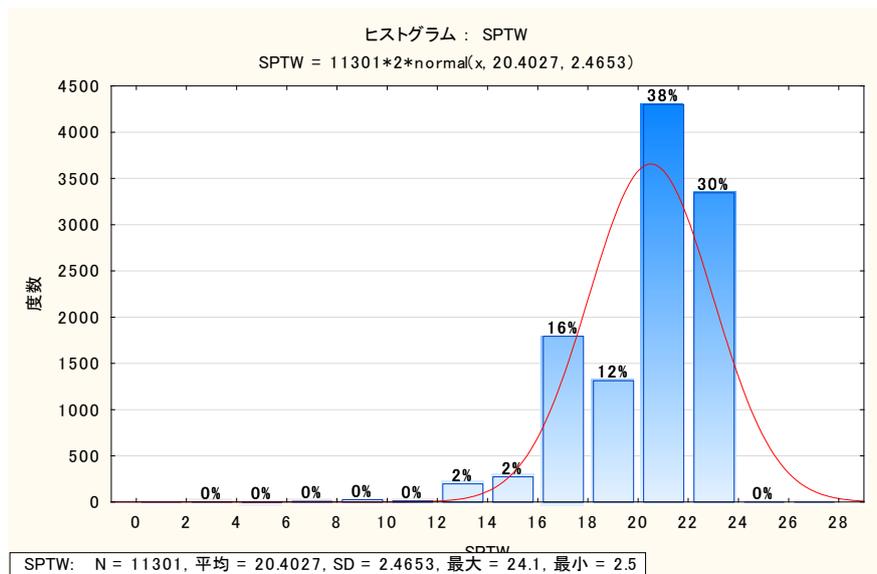


図 5-14(c) 16~84%のデータ範囲の対水速度

表 5-2 クリーニングによるデータ数の変化

	計測データ		明らかな異常値削除		信頼区間5~95%		信頼区間10~90%		信頼区間16~84%	
	データ数	%	データ数	%	データ数	%	データ数	%	データ数	%
2016年 4~7月	17402	100.0%	12428	71.4%	11865	68.2%	11629	66.8%	11301	64.9%

5.3.5 モニタリングデータの異常値の取り扱いについてのまとめ

収集したデータを解析する際には、目的に応じてデータをクリーニングすることが一般的になっており、本論文では、定常状態のモニタリングデータを得るためのクリーニング手法を検討した。船舶の航行中の状態を示す貴重なデータをより多く残すため、解析目的外となる異常値の削除を最小限にとどめることを目的とした。

そこで、定常状態においてスリップ比が正規分布を示すことに注目し、統計学の信頼区間の考え方に沿ってデータ区間を決め、クリーニングを行った。そして、船舶の性能解析に欠かすことのできない対水速力の平均速力をデータ区間ごとに求め、速力差があまりないことから、5～95%のデータ区間を用いることにした。

5.4 第5章のまとめ

第5章では、大洋航行中、環境に配慮した運航を行えるよう支援を行うために、個々の船舶の性能を精度よく把握し、実海域における船舶の性能を推定することが求められている。この支援を行うためには、航行中の船舶の状態を記録したモニタリングデータを用いる。しかし、このモニタリングデータには、不良データやエラーが含まれている。そのため、クリーニングが必要となる。

性能推定に欠かせない対水速力のクリーニングを見かけのスリップ比を用いて行った。また、船舶の定常状態のデータを得るために見かけのスリップ比が定常状態で正規分布していることから、スリップ比の5~95%に対応するデータを使用することにした。

以上の結果から、船舶の性能を推定し、運航効率の向上に寄与することができると思う。

第 6 章 結論

6.1 論文の結論

本論文では、船舶の航行海域ごとに必要な支援を行い、離岸から着岸までの各段階において有効な情報提供を行うことが必要と考えた。船舶は、出港してから目的地に到着するまで離岸し、おおむね輻輳海域を航行し、大洋を経て輻輳海域を航行後、着岸する。

離岸・着岸は、修士論文でウェアラブル端末を用いた操船支援として述べた。本論文ではウェアラブル端末の利用範囲を広げ、輻輳海域も含めたウェアラブル端末の 1 種であるヘッドマウントディスプレイを利用した情報提供について第 3 章で述べた。

次に輻輳海域を航行する船舶に対して交通状況を事前に提供することは、安全運航に有効と考えた。交通状況の事前提供のために行った海域のリスク評価を第 4 章で述べた。

大洋航行中の船舶に対しては、環境に配慮した運航が求められることから、海上で収集されたモニタリングデータを利用した効率運航が必要と考えた。モニタリングデータの有効活用について第 5 章で述べた。

以下、各章の概要および主要な結論を述べる。

第 1 章では、船舶に対する運航支援に関するこれまでの研究を概括するとともに、本研究の背景と意義および研究の概要について述べた。

第 2 章では、船舶に対して望ましい支援を提供するための支援システムの提案と、有効性について述べた。そして、提供する情報の整理を行い、情報の表示装置の検討を行った。

第 3 章では、離岸、着岸、輻輳海域も含めた支援を行うためにヘッドマウントディスプレイを利用した情報提供について述べた。情報を船内で得る端末としてヘッドマウントディスプレイを利用することを提案した。そして、東京海洋大学の練習船汐路丸で実船実験による検証を行い、有効であることを確認した。

第4章では、輻輳海域を航行する船舶に対して交通状況を事前に提供することは、安全運航に有効と考え、IWRAPを用いた各海域の潜在的リスクの検討を行った。リスク評価に使用するデータ量について確認を行い、災害時や台風襲来時の通常とは異なる状況においてもリスクを求めることができた。そして、整流効果の検証を行うことができた。以上の結果を得られたことから、IWRAPの評価が安全統一指標になりえると考え。そして、このIWRAPによって得られた情報を提供することは安全運航に有益と考える。

第5章では、大洋を航行中の船舶に対しては、環境に配慮した運航を行うための支援が必要と考えた。性能推定で重要な対水速力の推定法の提案とスリップ比を用いたクリーニングの手法は、船舶の性能を推定し、運航効率の向上することに寄与するといえる。

以上、本論文により、船舶の航行海域ごとに必要な情報提供の行うために有効な手段を提案することで、安全運航を支援するシステムの基盤として寄与できたと考える。

6.2 今後の課題

今後、船舶の運航システムの実用化を進めるにあたり、以下の課題を解決する必要があると考える。

1. ヘッドマウントディスプレイ上の表示画面は、操船者の意見を参考に、より見やすく、情報を得やすいように改良を続ける必要がある。
2. 操船者の動きと追従し、装着者が直感的に情報を得られるような複数の画面の切り替えができる仕様への改良が必要となる。
3. 航海支援に使用することのできる機器は、年々進歩しているため、今後の製品に期待したい。
4. IWRAP を用いて海域のリスク評価は、一部の海域のみでしか行っていない。運航支援に活かすためには、日本の主要海域についてもリスク評価を進める必要がある。
5. モニタリングデータの有効活用するために、欠損データとクリーニングの手法についてより精度よく、効率よく処理できる手法を模索してくべきと考えている。

謝辞

本論文は、東京海洋大学海洋科学技術研究科応用環境システム学専攻在学中に庄司るり先生の多大なるご指導のもと、一般財団法人日本航路標識協会並びに NPO 法人マリンテクノロジストより機会をいただき執筆した論文をまとめたものです。研究を進めるにあたり、多くの方々から御指導、御助言を賜りましたことに心から感謝申し上げます。

庄司るり先生には、終始熱心なご指導をいただき、大学院 5 年間様々な研究に触れることや勉強の機会をいただきました。この 5 年間、先生の励ましとお力添えが無ければ研究を続けることはできませんでした。心より感謝申し上げます。

一般財団法人日本航路標識協会の池田保専務、大谷雅彦総務部長、山藤翼業務部長、赤石節雄教育訓練部長、高岡関西支部長をはじめとする皆さまに様々な資料の提供やご意見、学ぶ機会をいただきました。厚く御礼申し上げます。

NPO 法人マリンテクノロジストの武隈克義様には、船舶の性能推定に関するご指導を賜りました。山崎英津子様、佐久間晶様には修士課程在学中より、研究に対しご理解をいただくとともに大変お世話になりました。この場を借りてマリンテクノロジストの皆さまに厚く御礼申し上げます。

共にヘッドマウントディスプレイの研究を行ってくれた軸丸祐策様、大石浩世様に心より感謝申し上げます。

論文執筆にあたり、ご指導、ご助言いただきました古谷雅理先生、田丸人意先生、金岡京子先生、西崎ちひろ先生に心より感謝申し上げます。

博士論文のはじめの一歩となった卒業論文のご指導をいただいた林尚吾先生に改めて感謝申し上げます。

常に気にかけていただき、温かいお言葉を頂戴した井上一規先生、逸見真先生に心より感謝申し上げます。

在学中、ご指導賜りました東京海洋大学の先生方、貴重なご意見を聞かせてくださった海上保安庁の皆さまにお礼申し上げます。

大学卒業後も論文執筆にあたり、忌憚ない貴重な意見を寄せてくれた井上浩岐氏、佐藤公泰氏に改めて感謝申し上げます。研究室に不在なことが多い中で後輩たちの面倒を見てくれた大家俊平氏、そして、共に研究室で過ごした後輩たちの協力に感謝申し上げます。

大学卒業後も折に触れて励まし、様々な面で支えてくれた友人たちに感謝しております。

最後になりますが、約 9 年の大学生活を物心両面で支えてくれた両親に心より感謝申し上げます。

Appendix. 1 5GHz 帯無線アクセスシステムの有効性

1.1 無線 LAN と使用する帯域についてと有効性について

無線 LAN は、ブロードバンド無線の 1 つである。ブロードバンド無線は、インターネット接続をする際に配線不要で接続することができる。ブロードバンド自体の定義としては、高速・大容量のデータ通信が可能な回線のことをいい、インターネット通信において「通信帯域(スループット)がおおよそ下り 1Mbps 以上で SD 解像度の動画が無理なく再生できる速度のときに呼ばれることが多いが、明確な線引きはないとされている。無線 LAN の世界的標準規格は「IEEE 802.11」となっている。正確にいうと IEEE 802.11 という通信規格を採用した無線 LAN 機器を製造するメーカーの業界団体が「Wi-Fi」という共通規格を作り、Wi-Fi が無線 LAN の世界的標準となった。その Wi-Fi の採用している通信規格が IEEE 802.11 であるとエレコム(1)のサイトで解説されている。

総務省は、沿岸海域において安価で簡便に使用できるブロードバンドシステムが求められていることから、5GHz 帯の周波数を使う規格 IEEE 802.11j の 5GHz 帯無線アクセスシステムにおいて、従来の基地局及び、陸上移動局以外に携帯基地局と携帯局を追加し、海上でも使用できるように電波法を改正した。5GHz 帯無線アクセスシステムの公称速度と受信感度を表 1-1 に示す。この 5GHz 帯無線アクセスシステムは、比較的高出力の空中線電力が使用できるため、有効範囲が広く沿岸域を航行する船舶に対する海上ブロードバンド無線として有効であるとの提言がある。また、この提言を裏付ける資料として、表 1-2 に平成 21 年に総務省が離島等の中・長距離海上電波伝搬に適した無線アクセスシステム構築のための調査結果の評価を示す。

5.0GHz 帯は電波伝搬試験距離も長く、安定度評価、スループットの評価も高い。しかし、降雨や潮位の外部要因の影響度は、2.4GHz 帯や 2.5GHz 帯と比較すると影響を受ける。

このような弱点は、偏波ダイバーシティ効果により、潮位の影響を軽減することができる。加えて、海面反射の影響を軽減するためにアンテナの海拔高を高くすることを考慮すれば、実用化できると考えられる。

表 1-1 IEEE 802.11j の基準規格

規格	IEEE802.11j (基準規格値)							
公称速度 (Mbps)	6	9	12	18	24	36	48	54
受信感度 (dBm)	-82	-81	-79	-77	-74	-70	-66	-65
変調方式	BPSK		QPSK		16QAM		64QAM	

表 1-2 中・長距離海上電波伝搬に適した無線アクセスシステムの比較

周波数帯別 無線アクセスシステム	通常電波 伝搬距離	電波伝搬 試験距離	アンテナ 偏波	実測値				外部要因の影響度		電波伝搬 試験結果 の評価
				RSSI		スループット		降雨	潮位	
				安定度評価	Max値 (dBm)	評価	Max値 (Mbps)			
2.4GHz帯	数km	20.4km	垂直	△一部不安定	-77	○5~10Mbps	5	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	○
			水平	△一部不安定	-79	○5~10Mbps	8	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	○
			円	○ほぼ安定	-78	○5~10Mbps	6	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	◎
2.5GHz帯	数km	9.5km	垂直	△一部不安定	-51	△3~5Mbps (上り)	4.5	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	○
			水平	△一部不安定	-55	△3~5Mbps (上り)	4.5	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	○
			円	○ほぼ安定	-50	△3~5Mbps (上り)	4.5	◎ほぼ影響なし	◎ほぼ影響なし	○
5.0GHz帯	数km	20.4km	垂直	○ほぼ安定	-60	◎10Mbps以上	13	○影響が少ない	△やや影響あり	○
			水平	○ほぼ安定	-65	◎10Mbps以上	13	○影響が少ない	△やや影響あり	○
			円	◎安定	-63	◎10Mbps以上	13	○影響が少ない	○影響が少ない	◎
25GHz帯	1km程度	9.5km	垂直(SD)	△一部不安定	-74.5	◎10Mbps以上	15	×影響あり	×影響あり	△

5.0GHz 帯の理論上の有効範囲は、船舶に沖合携帯局としての機能を持たせたマルチホップ通信を行なうことで、伝搬距離を 5km 延長できることから、約 20km と考えられる。マルチホップ通信とは、複数の無線通信装置がそれぞれ隣接する他の無線通信装置を連鎖経由して、バスケリレーのようにデータを伝送していく通信技術である。マルチホップ通信における概念図を図 1-1 に示す。

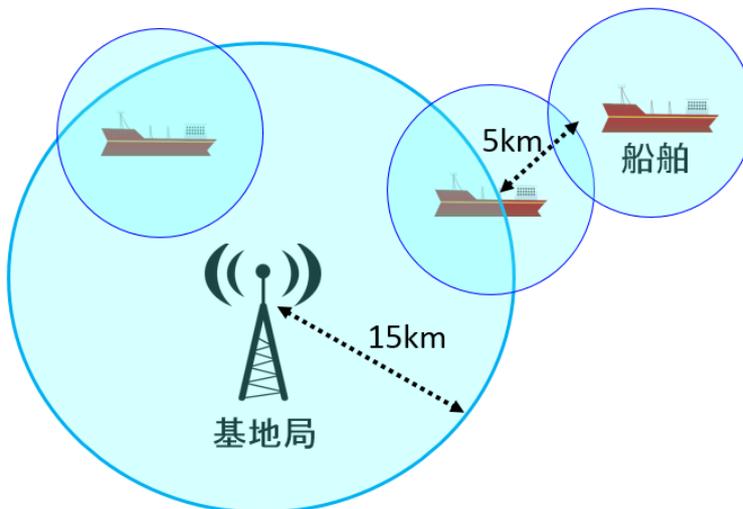


図 1-1 マルチホップ通信の概念

1.2 5GHz 帯の使用に関する実証実験について

5GHz 帯無線アクセスシステムの汎用装置を使用して海上でインターネットを使用するための実証実験が東京湾において平成 25 年 12 月 17 日に行なわれた。汎用装置は、富士通製の 5GHz 帯 IP 無線システム「FBW-5n」を使用している。図 1-2 の位置にある東京湾海上交通センターと金谷フェリーターミナルを基地局として、無線伝送装置の本体と無指向性アンテナを設置し、携帯局を、東京湾フェリー株式会社所属のフェリー「かなや丸」及び東京汽船株式会社所属のタグボート「浦賀丸」に設置した。装置の外姿と無指向性アンテナを装備した外観を図 1-3(a)、図 1-3(b)に示す。実験は、以下の 2 つの目的で行われた。

- 設置した基地局からの 5GHz 帯無線アクセスシステムの有効範囲の測定と実証
- 携帯局を用いたマルチホップ通信の有効範囲の測定と実証

図 1-4 に富士通が作成した実験構成図を、図 1-5 に有効範囲の想定図を示す。図 1-4 中の BWA 装置は、Broadband Wireless Access(広帯域移動無線アクセスシステム)の略である。

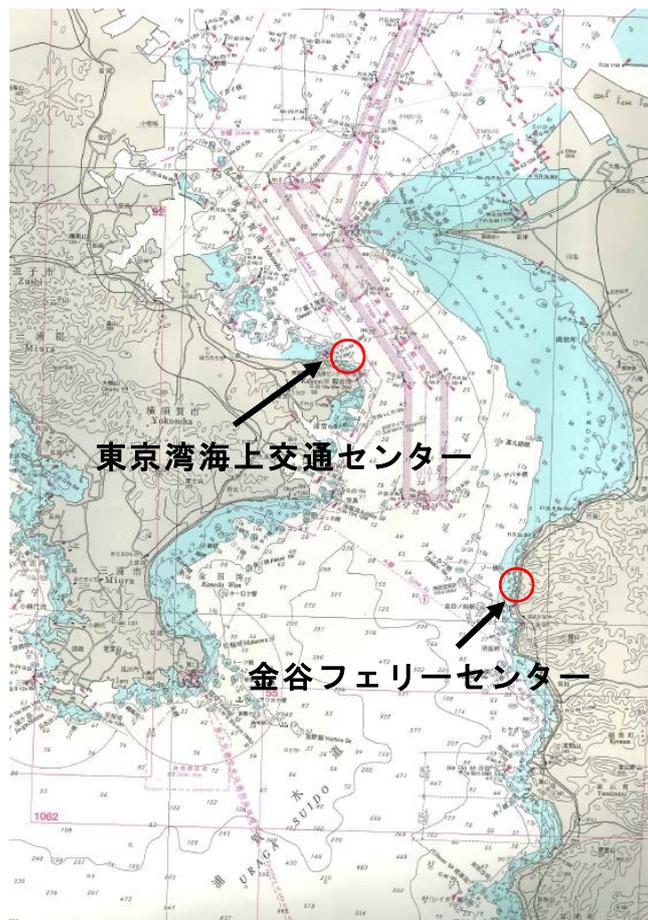


図 1-2 実験での基地局の位置



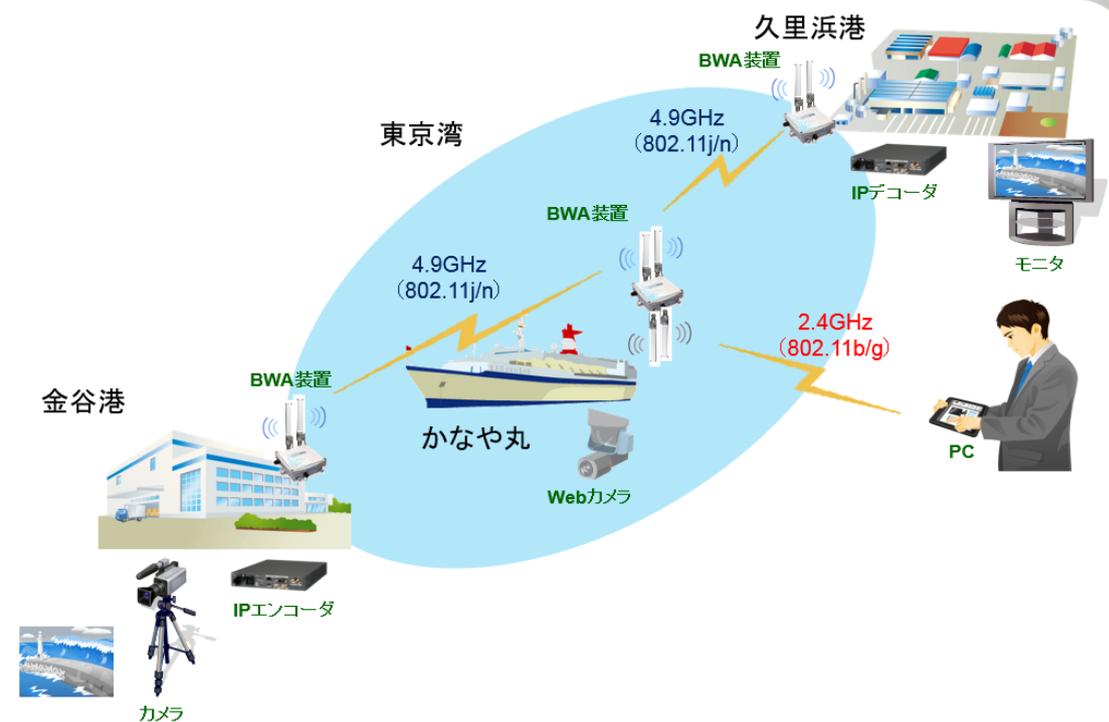
図 1-3(a) 装置の外姿



図 1-3(b) 無指向性アンテナ

東京湾無線LAN実証実験構成図

FUJITSU



FUJITSU CONFIDENTIAL

Copyright 2013 Fujitsu Network Solutions Limited

図 1-4 東京湾無線 LAN 実証実験構成図

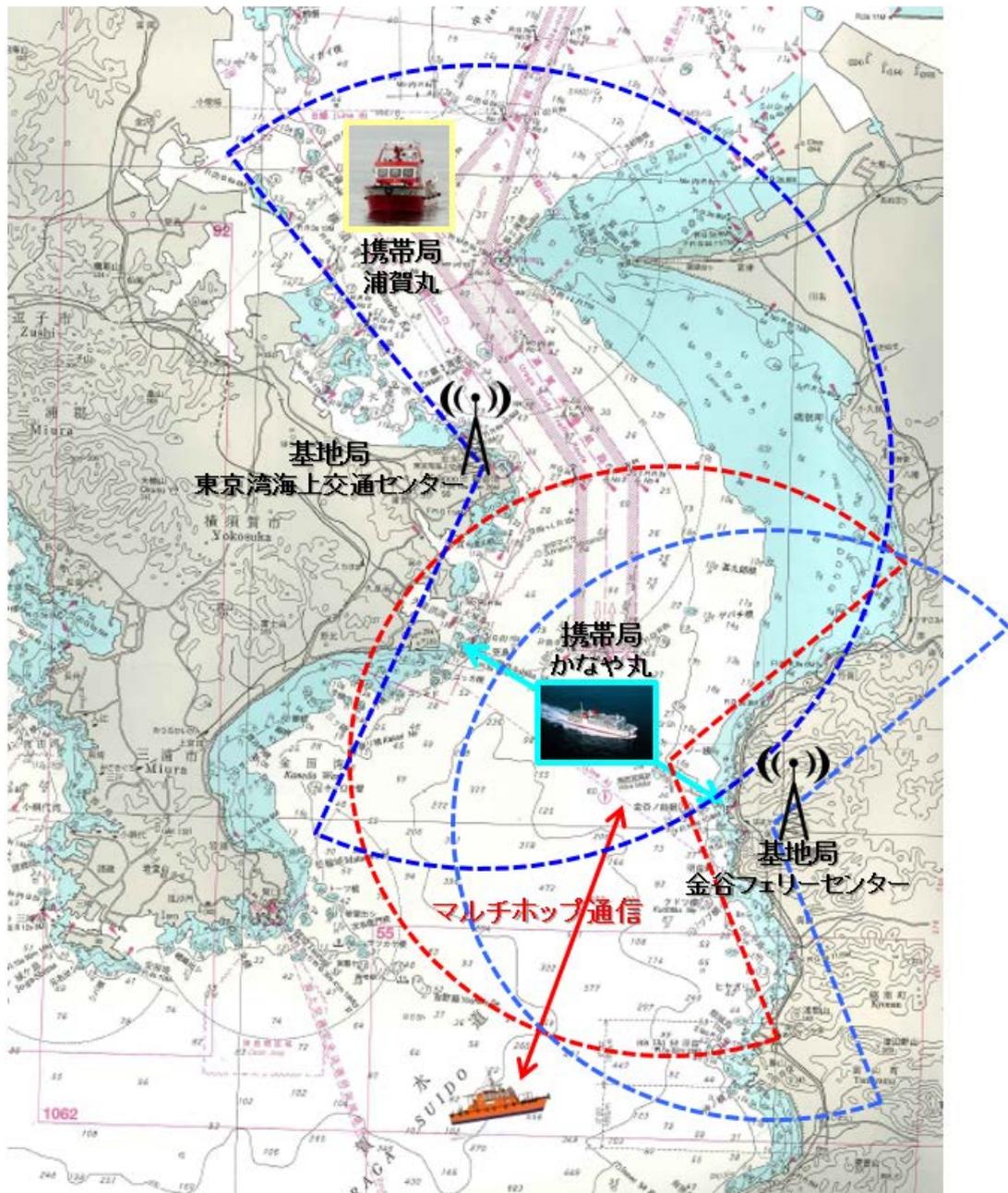


図 1-5 5GHz 帯無線アクセスシステムの有効範囲の想定図

1.3 5GHz 帯の使用に関する実証実験結果

1.3.1 東京海上交通センターを基地局とした場合

東京湾海上交通センターを基地局として、約 7km に位置し、岸壁から直接基地局を見通せる位置の横須賀新港 1 号岸壁に接岸していた浦賀丸は、電波を良好に受信していることが確認された。

一方で、約 5km 離れた久里浜港に停泊中のかなや丸での電波受信結果は、図 1-6 に示すように見通し位置にないことから、電波をとらえることができなかった。このことから、東京湾海上交通センターを基地局とした場合、見通し距離が少なくとも約 7km 前後は有効範囲と考えられる。

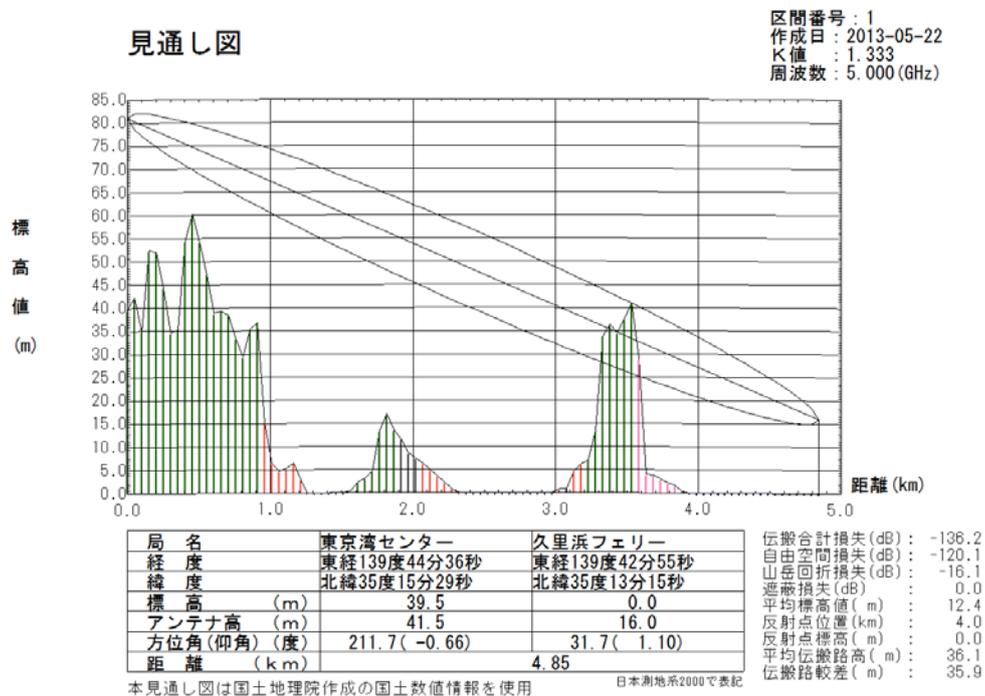


図 1-6 基地局からの見通し図

1.3.2 金谷フェリーセンターを基地局とした場合

金谷フェリーセンターを基地局として、数十メートルの近距離にいたかなや丸は、電波を良好に受信していることが確認された。かなや丸が約 11km 離れた久里浜港に移動した後は、電波をとらえられなかったが、図 1-7 に示す約 10km の範囲で電波を良好に受信できた。金谷フェリーセンターから約 10km の地点にある久里浜内港の入口である久里浜内港防波堤灯台付近から電波が良好に受信できたことから、金谷フェリーセンターの基地局の有効範囲は図に示すとおり、約 10km と言える。

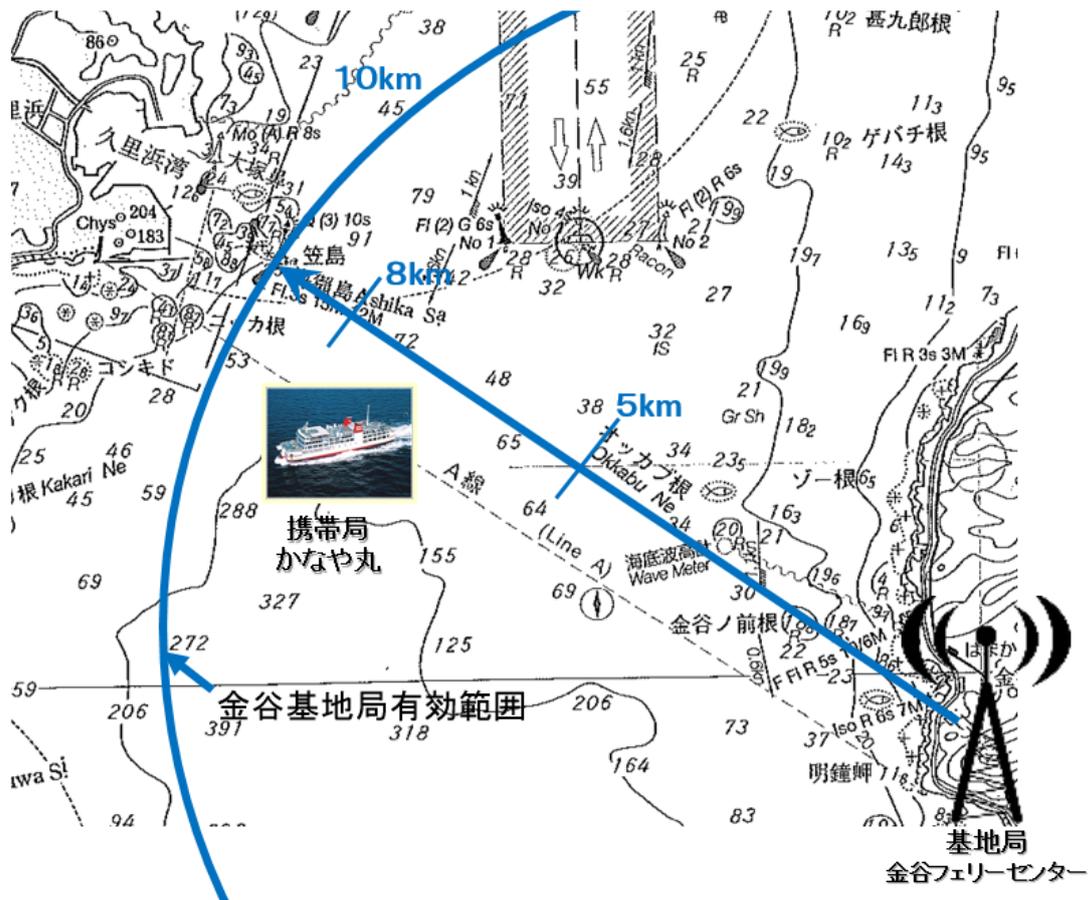


図 1-7 金谷基地局有効範囲

1.3.3 金谷フェリーセンターを基地局とのマルチホップ通信

かなや丸を中継とした金谷フェリーセンターの基地局とのマルチホップ通信の有効範囲を調べるため、久里浜1号岸壁で受信状況を計測した。金谷港を出港後10分後から通信が可能となった。かなや丸は、約9knotで航行していることから約8~9kmの付近から通信が可能となったと考える。そのため、図1-8に示すように約8kmの有効範囲であると推測される。

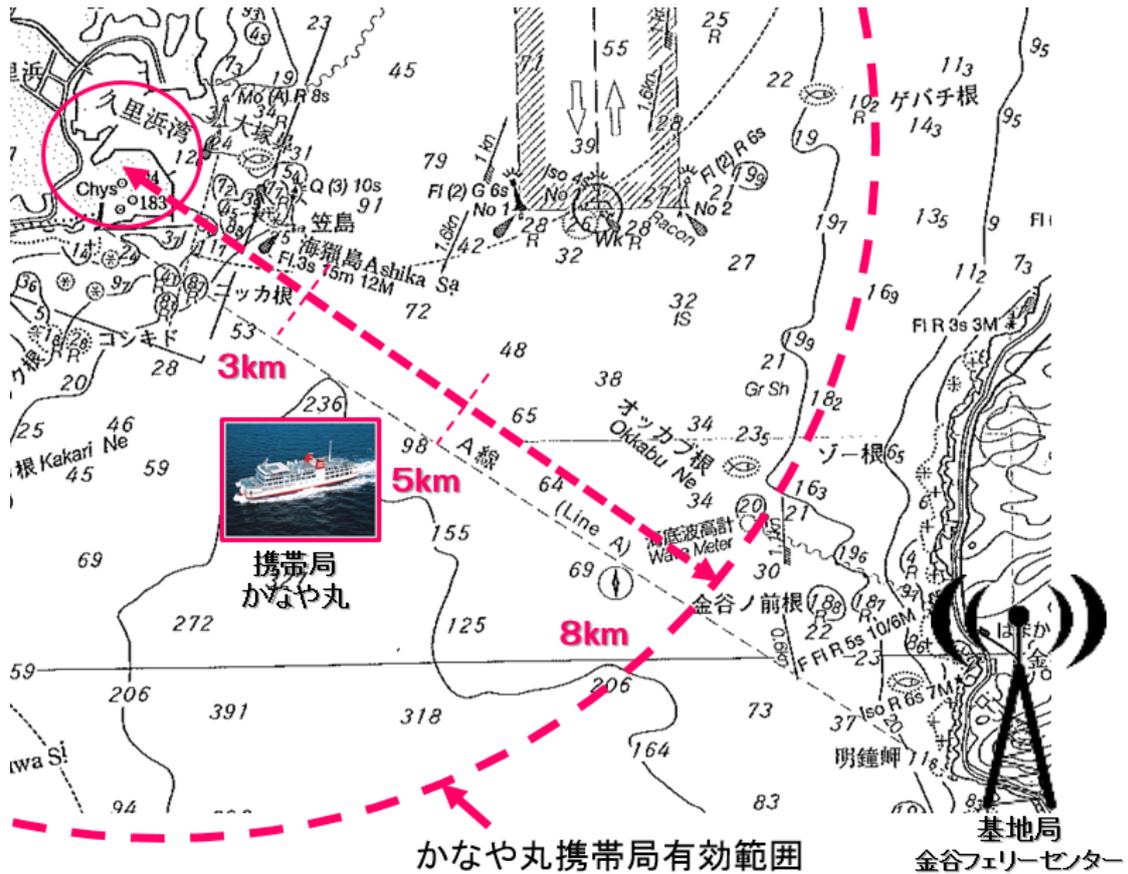


図 1-8 かなや丸携帯局有効範囲

1.4 課題に対する対策と有効性

実用化に向けて実験終了後 4 つの課題があげられている。1 つ目は、移動体の携帯局アンテナ高と通信距離である。5GHz 帯無線アクセスシステムは、その無線装置から概ね 10km 以内は相互に通信を行える範囲であることが判明したが、特に、移動体に携帯局を設置する際は、そのアンテナ高が通信距離に影響を与えるので、十分な高さを確保する必要がある提言があった。2 つ目は、基地局の配置と通信距離である。今回実験に使用したシステムは、原則見通し内通信であることから、基地局の配置を検討する際は、停泊船や海上構造物による遮断を避けるためダブルカバレッジ等の対策が必要となる。3 つ目は、マルチホップ通信による通信範囲の拡大の有効範囲である。マルチホップ通信は通信範囲拡大に有効であり、基地局の配置を検討する際に中継局となりうる船舶が常に存在するかどうかにより有効範囲が変わってくる。4 つ目は、海面反射等による受信の不安定要素があることである。本システムの海上利用にあたっては、海面反射等による受信の不安定要素が常にあるため、安定な通信を確保するためにはダイバーシティ等の受信対策が必要となる。5GHz 帯を使用した海上伝搬においては、直接波と海面反射波の干渉や船舶の動揺による姿勢変動などによる受信レベルの変動(フェージング)などが報告されている。そのため、陸上伝搬と比較すると、通信品質に変動があるということを留意しなければならない。直接波と海面反射波の影響により受信電力が低下する課題に対しては空中線高の違いを利用した空間ダイバーシティ方式が有効とされている。ダイバーシティとは、無線通信において通信の品質を高める技術のことである。具体的には、空間的に位置を離れた複数のアンテナで信号を受信し、いずれかの受信状態の良い信号を選択する。または、信号を合成して利用することをいう。ダイバーシティ技術⁽²⁾には、送信ダイバーシティ、受信ダイバーシティ、時間ダイバーシティ、周波数ダイバーシティ、空間ダイバーシティの 5 つがある。空間ダイバーシティは、数波長程度の距離で隔てられた複数のアンテナを同時に使用することにより、フェージングの悪影響を最小限にする送受信方式である。

先に述べたように、課題はあるが、海上においてインターネット通信ができる有効範囲が明確になったことは、実用化への 1 歩と考える。

Appendix. 2 IWARP を用いたスリランカの解析結果

2.1 Dondra のデータ範囲と交通流の状態

スリランカの Galle と Dondra の 2 か所で収集した AIS データをそれぞれの場所ごとに解析した。

以下の図 2-1 は、Dondra で受信した AIS データをプロットしたものである。広範囲で AIS が受信できていることが分かる。色により、船舶の混雑が示されている。最も混雑しているのが、紺で示され、続いて赤、黄色、白の順となっている。Dondra のデータは緑の枠で囲んだ部分を中心に解析を行った。図 2-1 中の青の枠で囲んだ部分に TSS が設定されている。この TSS の影響もあってか、交通流は、広範囲にわたってセパレートしていることが分かる。また、船舶の通航隻数から出力したヒストグラムを図 2-2(a) に示す。この黒枠で囲んだ部分のヒストグラムから、Dondra では、分離通航されていることが分かる。

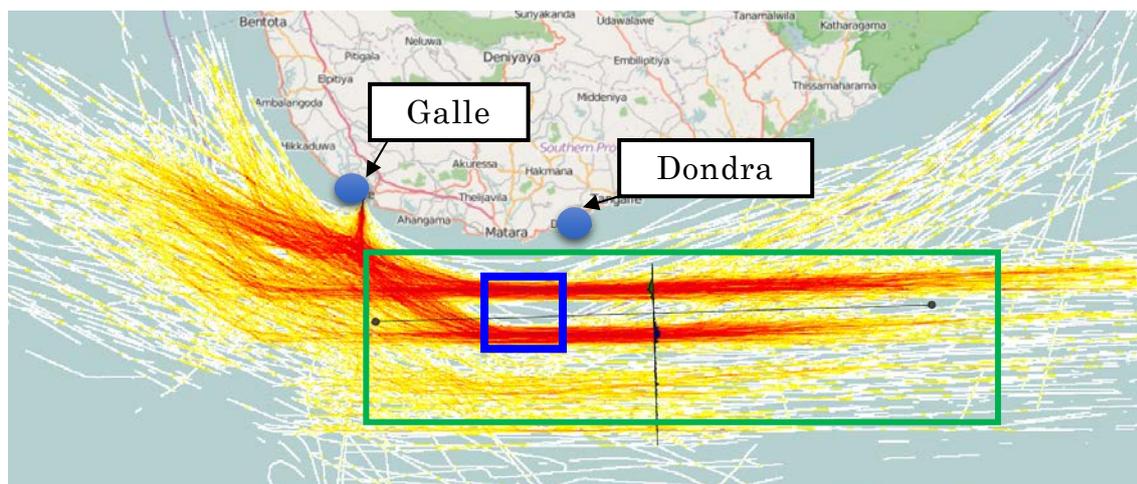


図 2-1 Dondra の AIS データの範囲

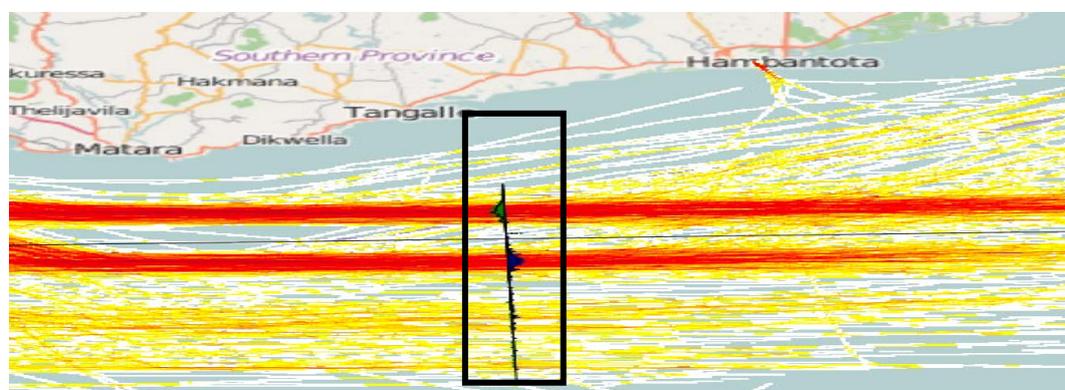


図 2-2(a) Dondra の交通流の状態(ヒストグラム)

図 2-2(b)は、船舶の通航隻数から出力したヒストグラムと AIS データの船首方位と位置から出力した矢印を重ねたものである。これにより、船舶の見合い関係が悪いエリアと見合い関係を分析することが可能になる。このエリア(赤枠)では、行き合いの船舶多くいることが分かる。また、TSS の設定されているエリア(青枠)に入る前のエリア(黄色枠)では、Hambantota の方向へ針路を取っている船との横切りや行き合いの関係が生じていると推測される。TSS の設定されているエリア(青枠)ははっきりと分離通航が行われ、行き合いや横切りの関係は生じていないと考えられる。

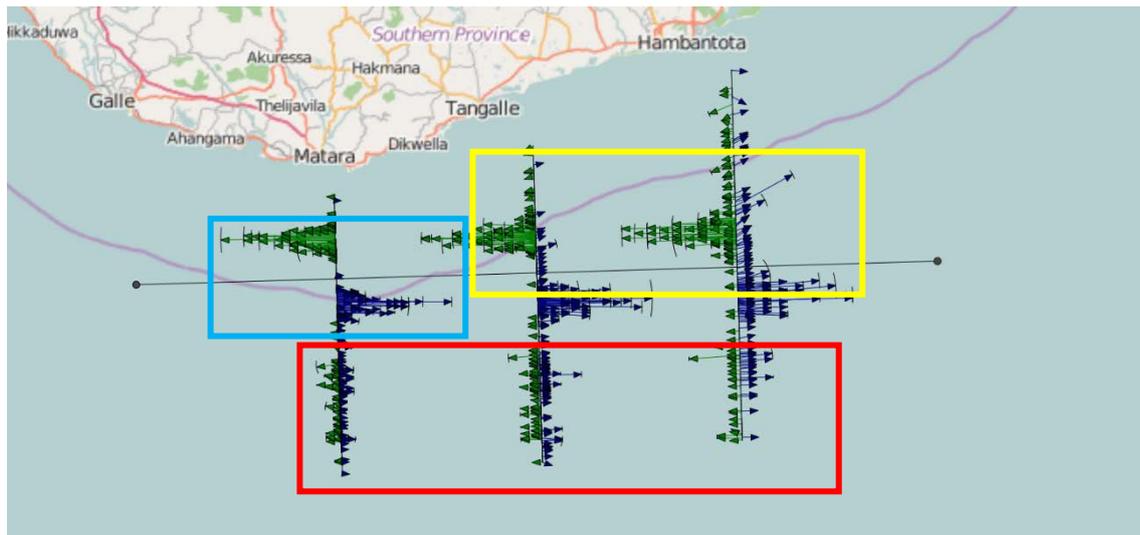


図 2-2(b) Dondra の交通流の状態(船首方位)

図 2-1 の緑枠で囲った Dondra のエリアは広範囲である。そのため、危険な場所をより狭い範囲で特定するために、15nm ごとにエリアをレグ(図中の線)で区切った。図 2-3(b)は、図 2-3(a)に図 2-2(b)と同じく AIS データの船首方位と位置から出力した矢印を重ねたものである。図 2-3(b)から、黄色の枠で囲ったエリアでは行き合いが多いため行き合いのリスクが高くなり、青の枠で囲ったエリアでは、追い越しのリスクが高くなるのではないかと推測する。青の枠のエリアで追い越しのリスクが高くなると考えられる理由として、TSS の影響があげられる。航路を設定することで、船舶が集中し交通流の幅が狭くなるためである。同じよう傾向が日本でも設定航路や推奨航路の解析結果に見られる。

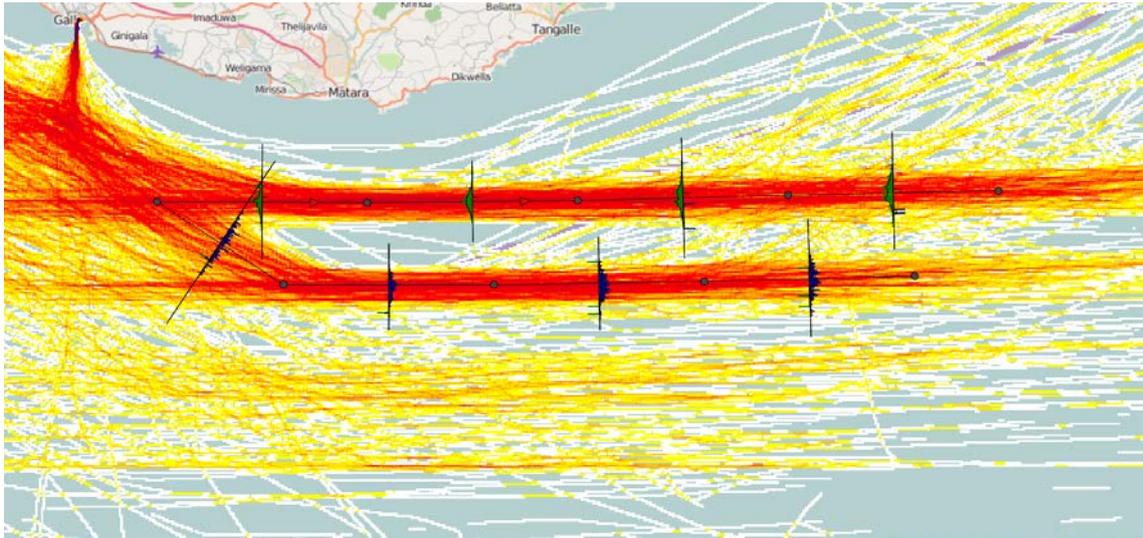


図 2-3(a) 15nm ごとのヒストグラムと Dondra の交通流の状態

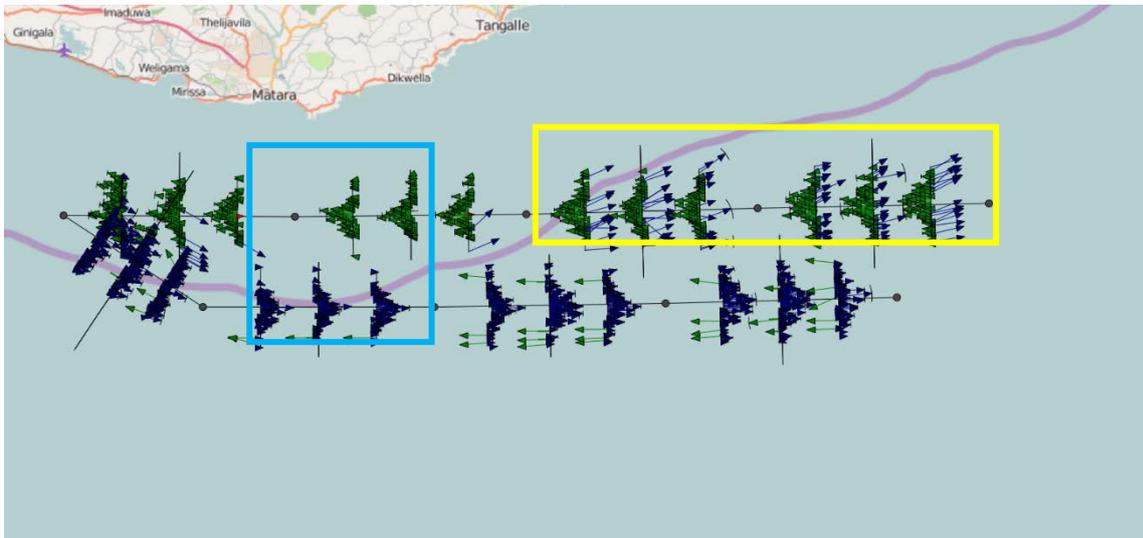


図 2-3(b) 15nm ごとの船首方位と Dondra の交通流の状態

2.2 Dondra の船種と船長の棒グラフ

図 2-5(a)は、図 2-4 の青枠で囲ったエリア (East Bound) の部分での船種と船長の棒グラフである。船種で、最も多いのは General cargo ship で 2 番目は Oil products tanker だった。船長では、175~200m の船舶が最も多く通航していることがグラフから分かる。図 2-5(b)は、図 2-4 の黒枠で囲ったエリア (West Bound) での船種と船長の棒グラフである。最も多いのは General cargo ship で 2 番目は Oil products tanker だった。船長では、175~200m の船舶が最も多く通航していることがグラフから分かった。これらの結果から、どちらの交通流でも最も多く通航している船種は General cargo ship であり、175~200m の船長の船舶が最も多く通航していることが分かった。

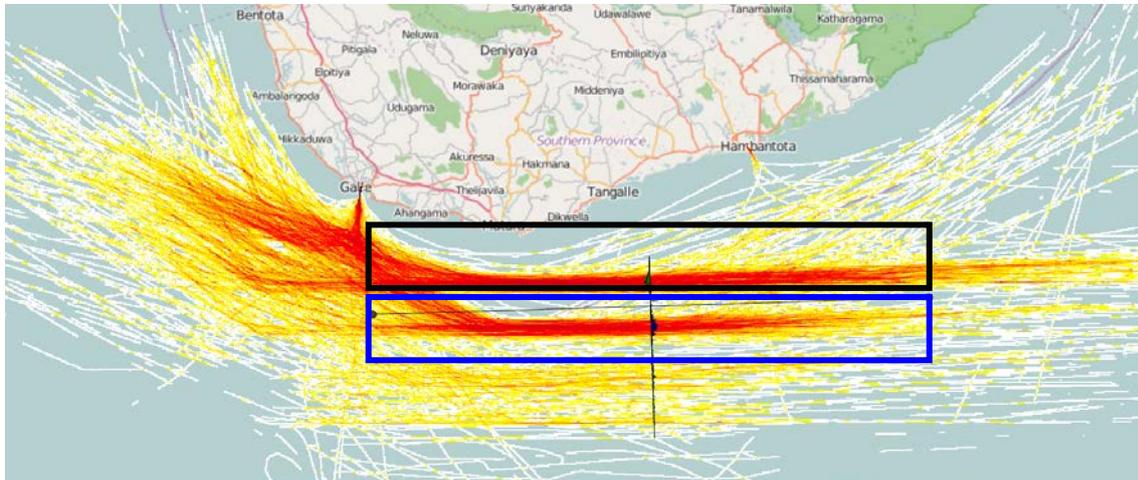
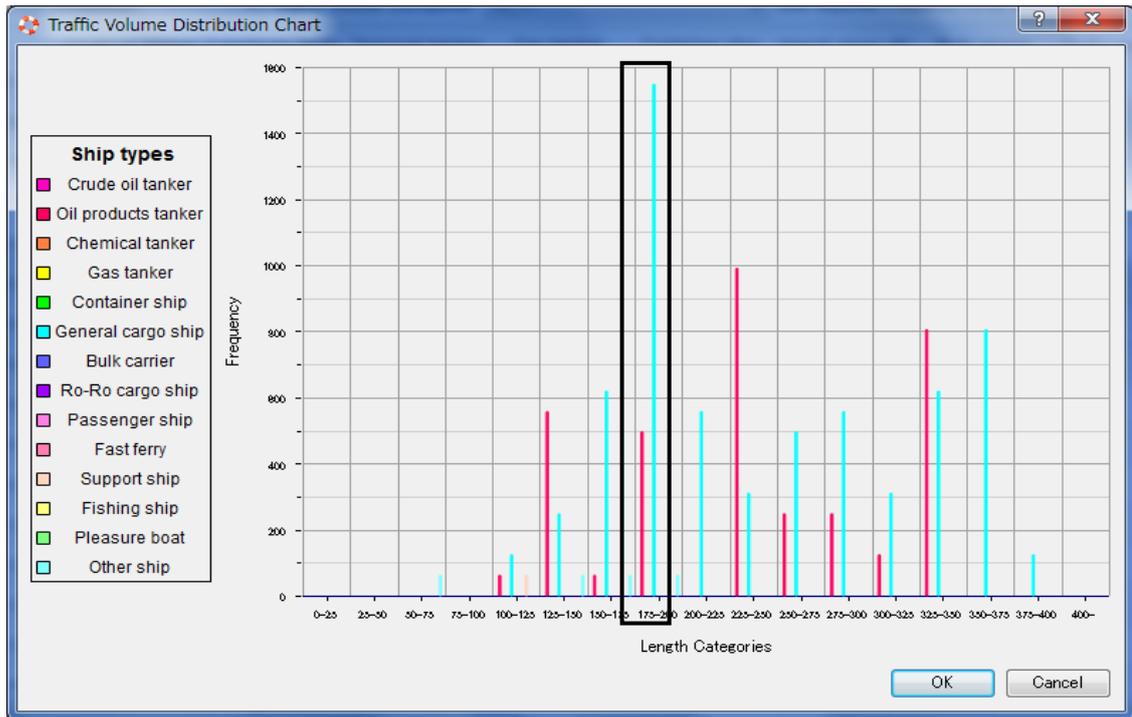
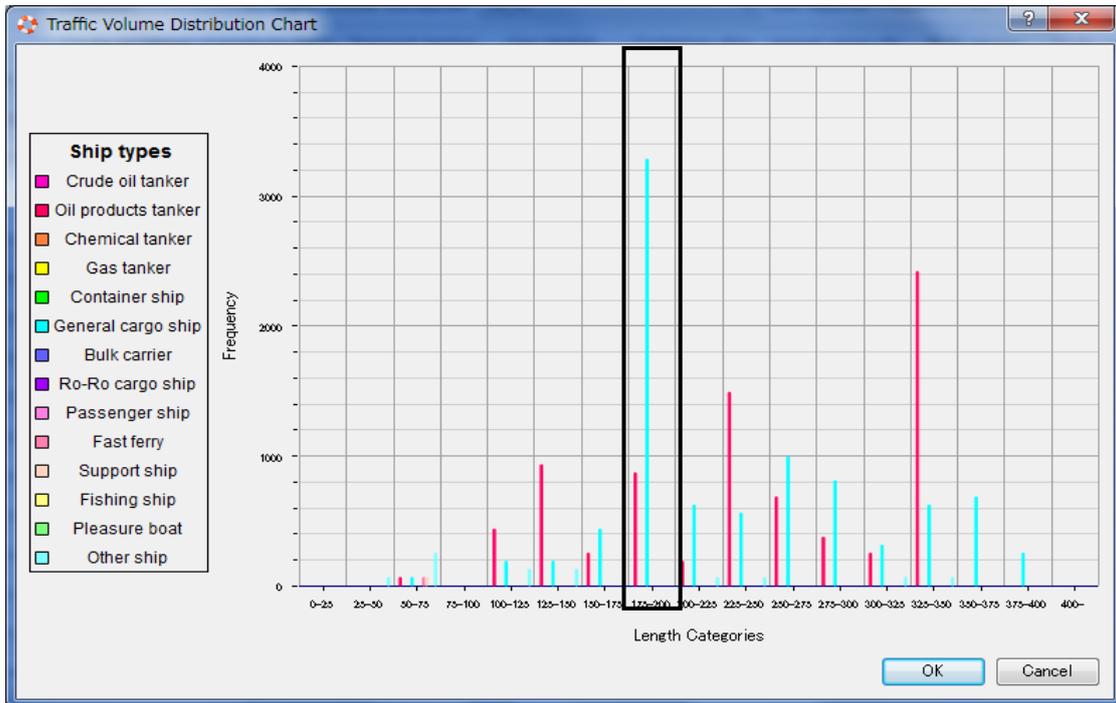


図 2-4 Dondra の船種と船長の棒グラフの範囲



☒ 2-5(a) East Bound



☒ 2-5(b) West Bound

2.3 Dondra の船種ごとの解析 General cargo ship について

図 2-6 は Dondra で最も多い船種である General cargo ship のみをプロットした図である。赤の線は、通航船舶の航跡である。水色の枠で囲んだエリアが TSS である。この水色のエリアに合流するために図中で示した黒矢印のように右から合流している様子が分かる。また、図中で示した白矢印のように左から合流していく流れもあることから、ピンクの丸の 2 か所は危険な見合い関係が生じやすいと考えられる。

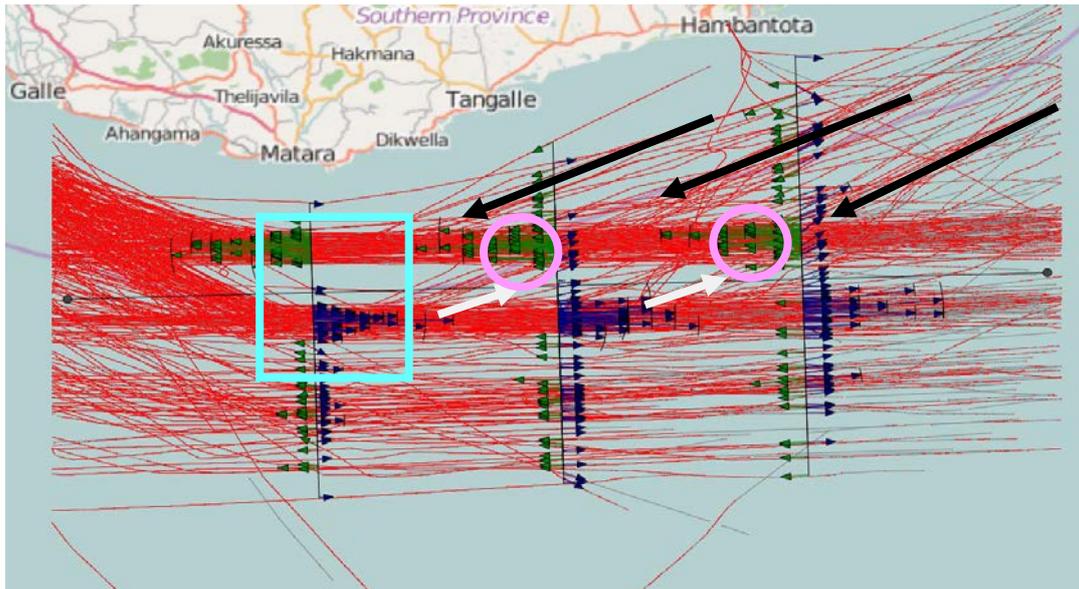


図 2-6 General cargo ship の航跡と船首方位

2.4 Dondra のリスク解析の結果

Dondra のエリアのリスクを計算した。計算結果は、表 2-1 に示す。IWRAP のリスク計算は、2つの表示方法がある。1年に何回事故の起きる可能性があるかを示す Incidents/Year と、何年に1回事故の起きる可能性があるかを示す Years between incidents である。Incidents/Year では、1が最も危険であり、Years between incidents では年数が少ないほど危険であることを示している。表 1 より Dondra のエリアで最もリスクの高い見合い関係は、追い越し(Overtaking)であることが分かる。図 2-7(a)は、表 2-1 の結果を詳細に地図上に示した図である。

表 2-1 Dondra のリスク

	Dondra	
	Incidents/Year	Years between incidents
Overtaking	0.0078	127.4
Head on	0.00022	4527
Crossing	0.0000000001	7283000000
Total Collisions	0.00807	123.9

リスクが高い順に赤、橙色、黄色、緑、青、白の色で表わされている。水色の枠で囲んだエリアが TSS である。TSS の一部（赤の線）と TSS に入る前の部分（黄色の線）のリスクが高いことが分かる。このエリア（図 2-7(a)中のピンクの丸）は、Appendix 2.3 節の図 2-6 で示した危険な見合い関係が生じやすいと考えられる部分とほぼ一致していることが確認できた。

次に、図 2-7(b)は、見合い別にどの地点でリスクが高いかを示した図である。Overtaking（追い越し）のリスクが最も高いエリアには、①Overtaking（追い越し）と表記し、次にリスクが高いエリアは②Overtaking（追い越し）とした。同様に Head on（行き合い）についても表記した。追い越しのリスクが高くなるのは船舶が集中する TSS の付近であり、合流が見られるエリアで行き合いのリスクが高くなることが分かった。

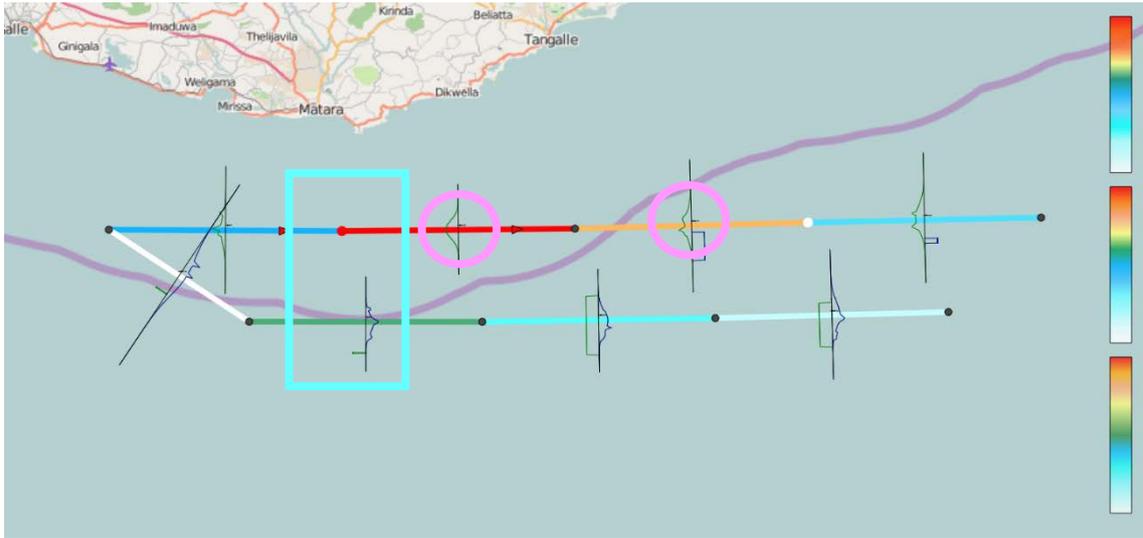


図 2-7(a) Dondra の交通流におけるリスク

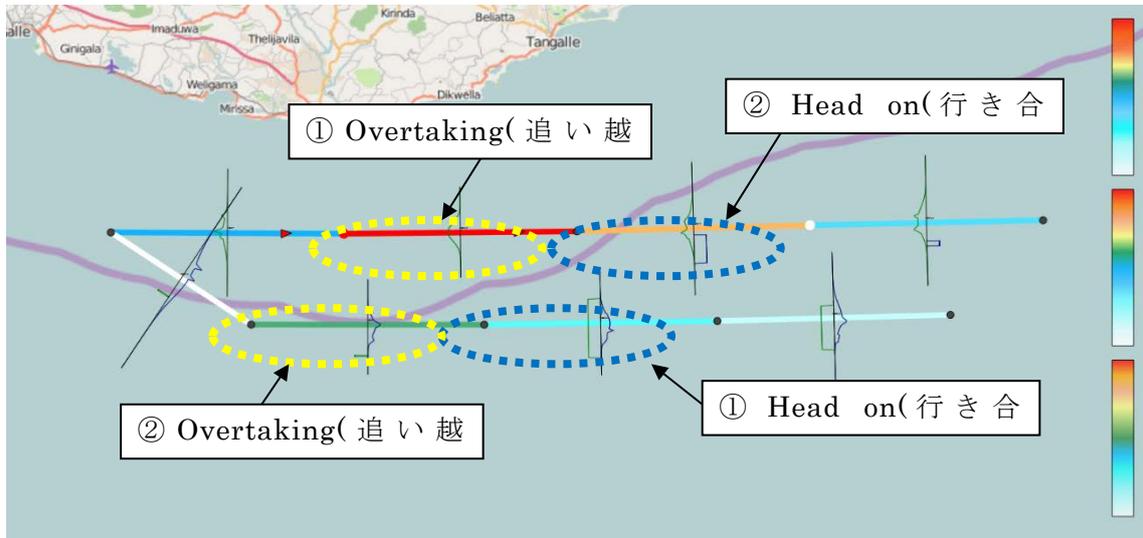


図 2-7(b) Dondra の交通流における見合い別リスク

2.5 Galle のデータ範囲と交通流の状態

Galle で収集したデータは図 2-8 の水色の枠で囲んだ部分である。図 2-9(a)は、Galle で受信した AIS データをプロットしたものに交通流の向きを示すヒストグラムを重畳した図である。図 2-9(a)からこの海域は、整流されておらず船舶が輻輳した状態で航行していることが示されている。特に、行き合いの関係が多く発生していることがヒストグラムから分かった。

さらに詳しく見合い関係を調べるため、船舶の通航隻数から出したヒストグラムと AIS データの船首方位と位置から出力した矢印を重ねた図が、図 2-9(b)である。

交通流から 2 つの海域が危険と考える。最も危険な海域と考えられるエリアは、緑枠で囲った部分である。このエリアは、TSS の設定されたエリアの直後の合流地点にあたる場所である。約 7nm 四方あり、船間距離は比較的取りやすいと考えられる。しかし、TSS に入る船の横切りや TSS から出る船の行き先への進路変更などが行われる場所と推測されるため、見合い関係が複雑になりやすいと考える。次に危険と考えられる海域は、青枠で囲った部分である。このエリアは、港への入港ルートであり、広い海域から狭い港内へと入っていくにつれ、船間距離が短くなると考えられるためである。

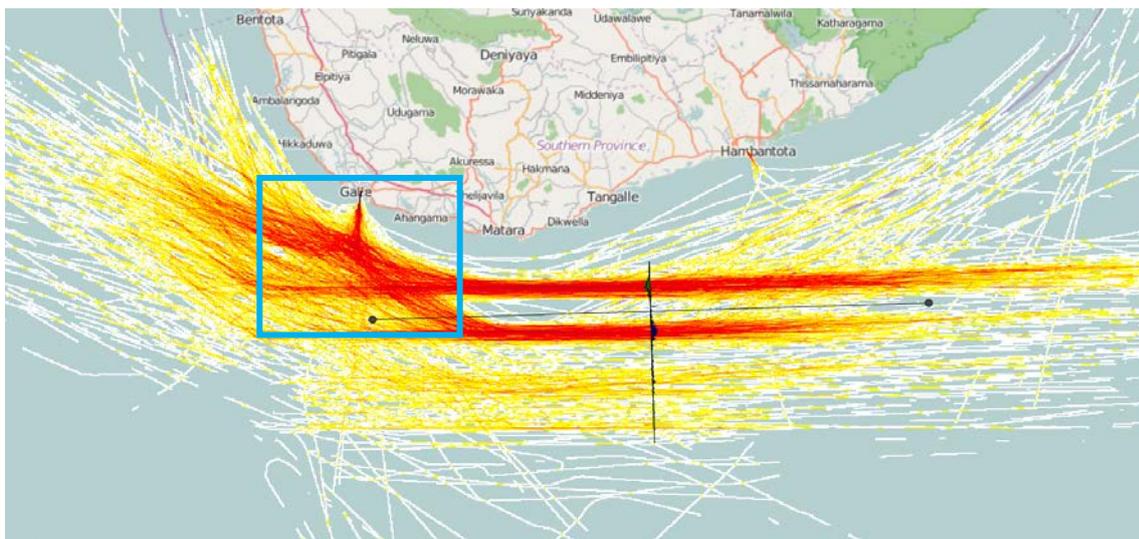


図 2-8 Galle の AIS データの範囲

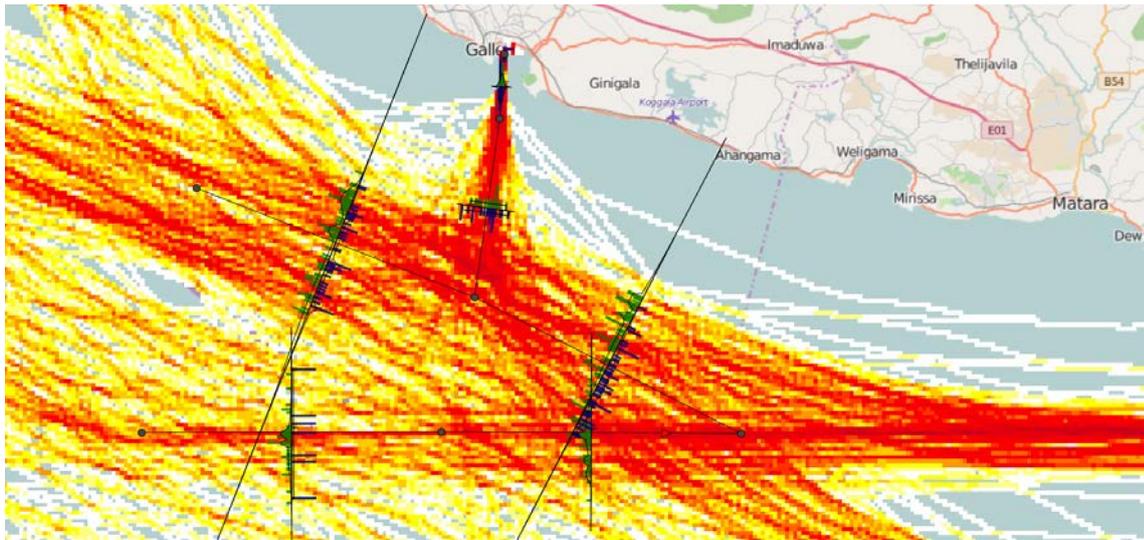


図 2-9(a) Galle の交通流の状態(ヒストグラム)

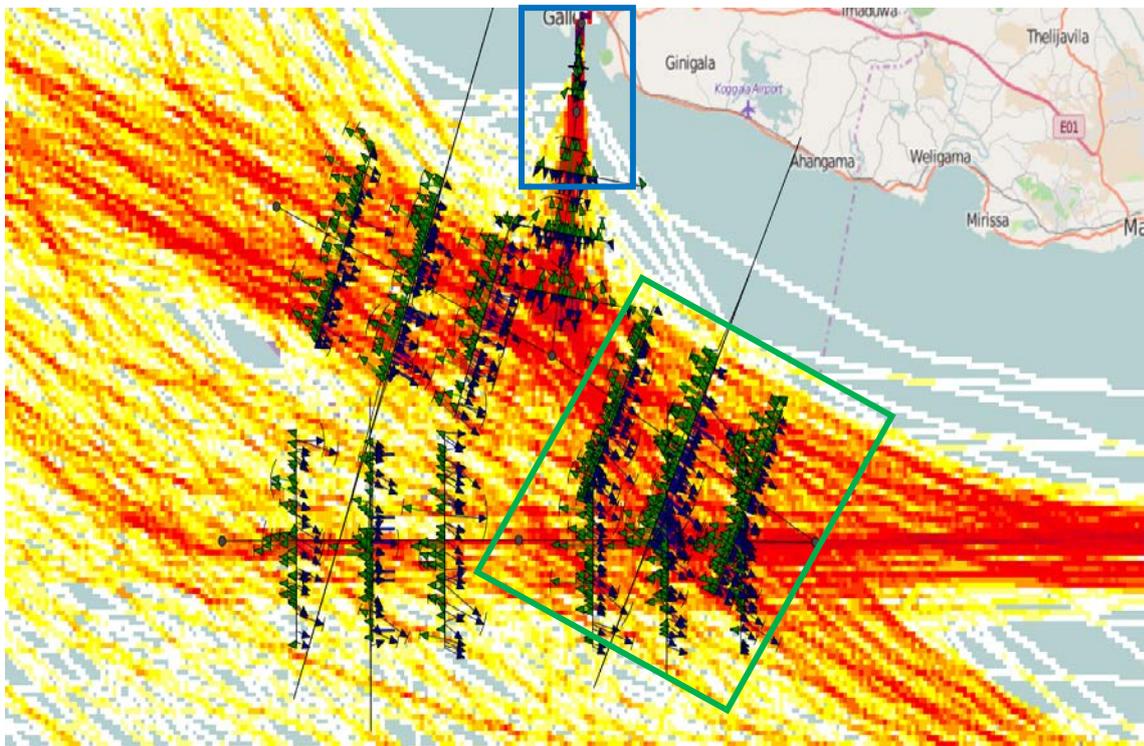


図 2-9(b) Galle の交通流の状態(船首方位)

2.6 Galle の船種と船長の棒グラフ

Galle の解析エリアでは、Galle の港への交通流と沖を通過する交通流の 2 つの交通流に分けられる。図 2-10 のオレンジの矢印が港への交通流を示し、沖を通過する交通流を青の矢印が示している。これら 2 つの交通流ごとの船種と船長の棒グラフを図 2-11(a)と図 2-11(b)に示す。図 2-11(a)より、最も多く入港している船種は、**General cargo ship** と分かった。船長では、25~50m の小型の船舶が最も多く通航していた。図 2-11(b)より、最も多く沖を通航している船種は、**Oil products tanker** と分かった。船長では、325~350m の大型の船舶が最も多く通航していることがグラフから分かった。

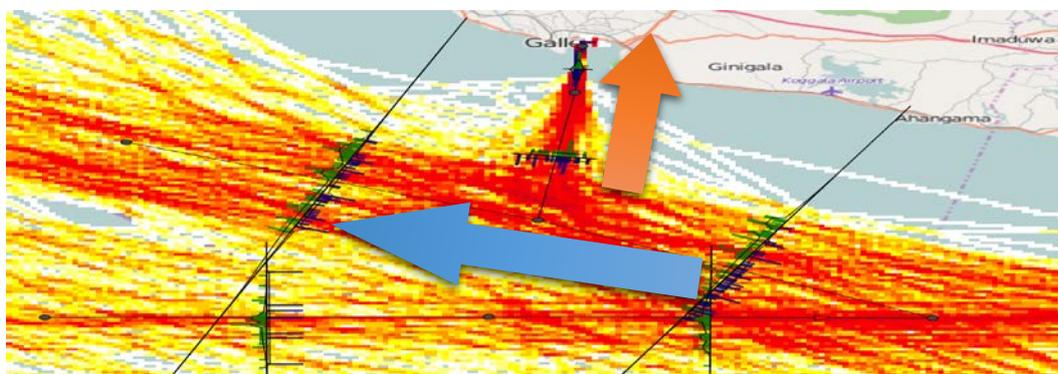


図 2-10 Galle の交通流の向き

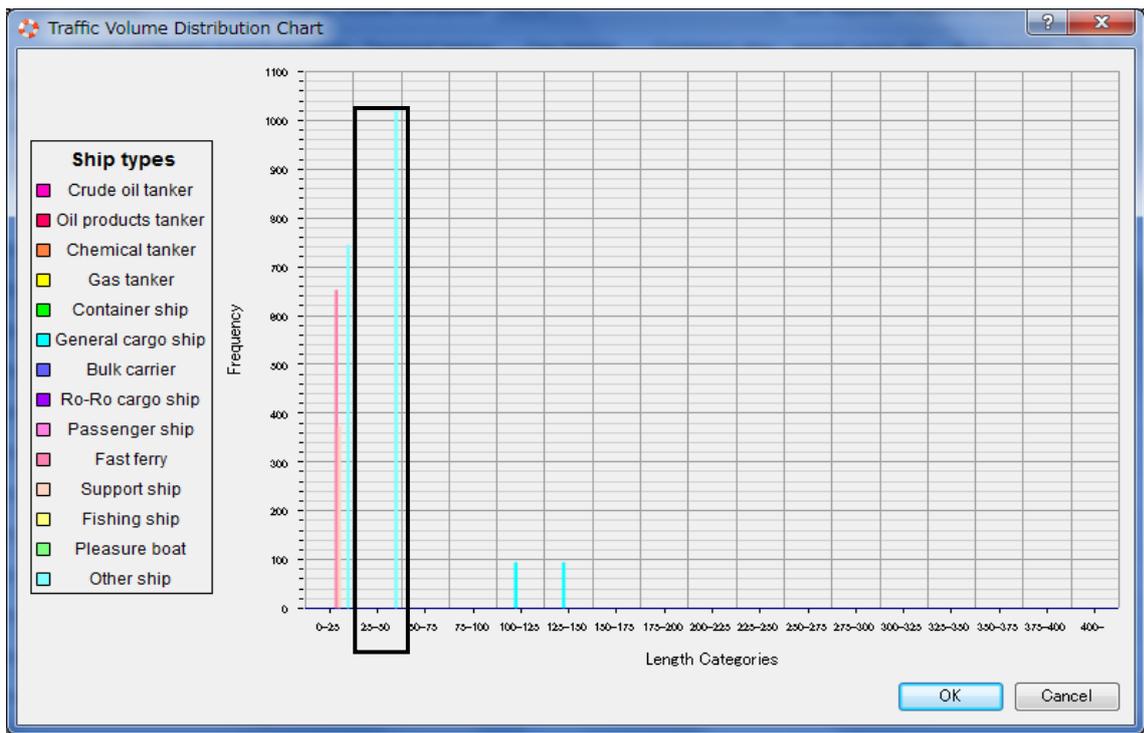


図 2-11(a) 港への入港船舶

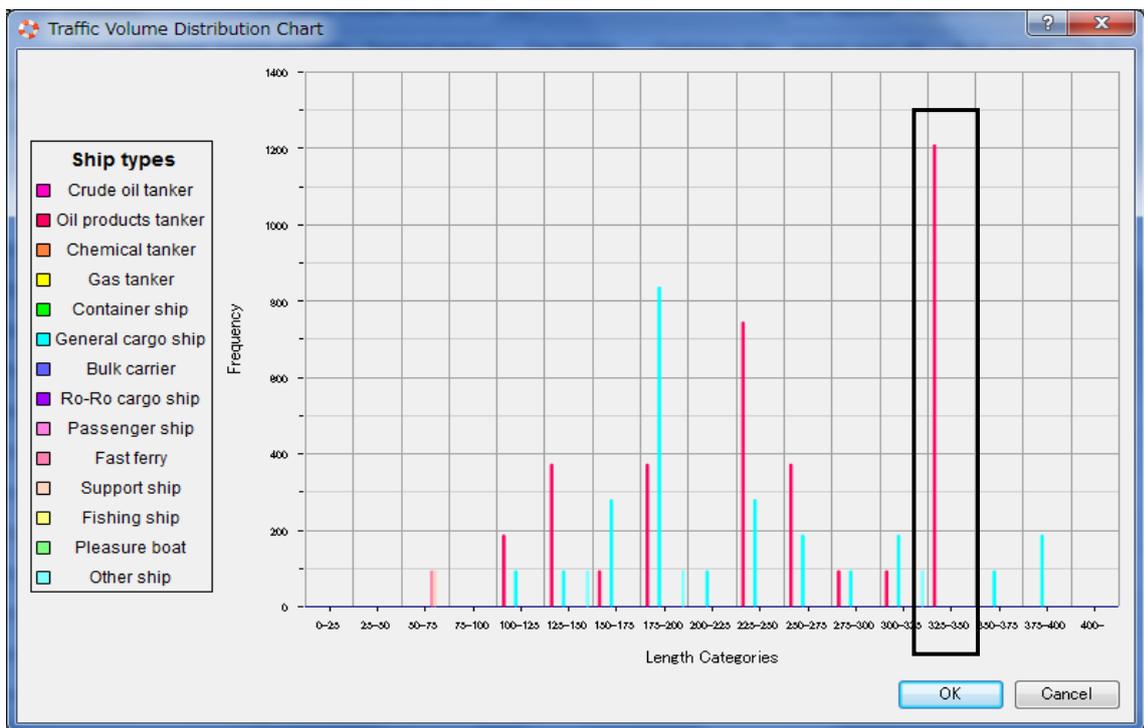


図 2-11(b) 港外を航行する船舶

2.7 Galle の船種ごとの解析 General cargo ship について

図 2-12 は Galle で比較的通航隻数が多い船種である General cargo ship のみをプロットした図である。赤の線は、通航船舶の航跡である。この航跡から図 2-9(b)で緑の四角で示した見合い関係が危険と考えられる海域(図 2-12 中においては、緑の丸)において交差が多数生じているのが分かる。

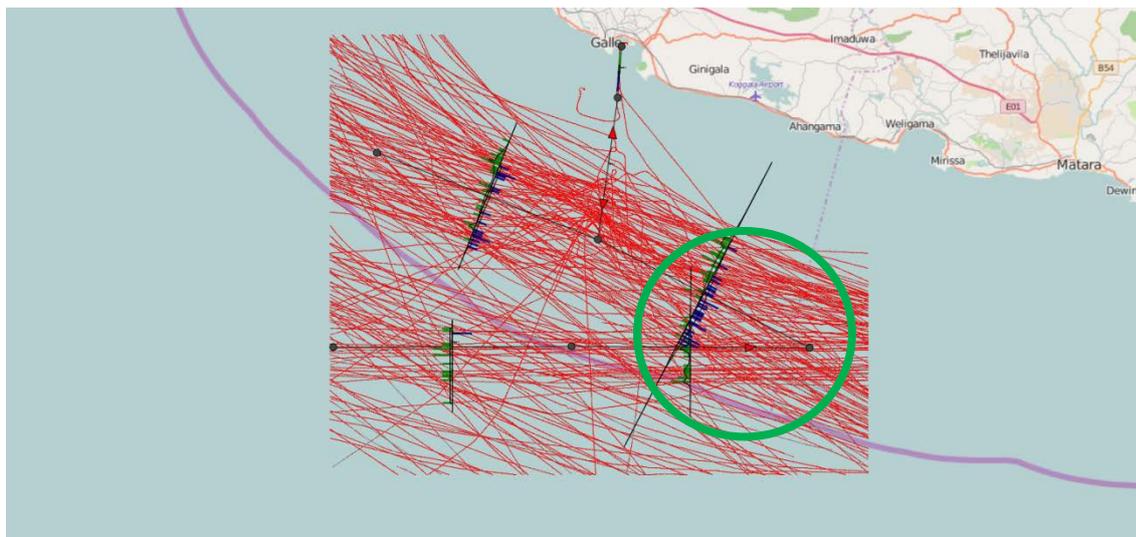


図 2-12 General cargo ship の航跡

2.8 Galle のリスク解析の結果

Galle のエリアのリスクを計算した。計算結果は、表 2-2 に示す。表 2-2 より Galle のエリアで最もリスクの高い見合い関係は、行き合い(Head On)であることが分かる。表 2-1 では無かった Merging は合流部分がある時に計算される合流衝突のリスクを表わしたものである。

表 2-2 Galle のリスク

	Galle	
	Incidents/Year	Years between incidents
Overtaking	0.00086	1153
Head on	0.00163	612.4
Crossing	0.00009	11260
Merging	0.00005	21030
Total Collisions	0.00263	379.9

図 2-13(a)中では黒丸の部分該当箇所である。図 2-13(a)と図 2-13(b)は、表 2-2 の結果を図示したものである。Galle のエリアでは港付近(図 2-13(a)中のピンクの丸)が最もリス

クが高いことが分かった。2 番目にリスクが高いエリアは、Galle 沖を航行している交通流と港からの交通流が合流する図 2-13(a)中の黄色の四角のエリアだった。交通流が交差する図 2-13(a)中の黄色の四角のエリアのリスクが高くない理由としては、2 つ考えられる。1 つ目は、比較的海域が広く、船間距離がとりやすいことである。2 つ目は、見合い関係においては、行き合いが多く避航操船しやすいのではないかと推測する。しかし、交通流の交差が多いため、操船者が感じる潜在的なリスクは高いと考える。どのリスクがどのエリアで高いのかを図 2-13(b)に示す。図 2-7(b)と同じく Overtaking (追い越し) のリスクが最も高いエリアには、①Overtaking (追い越し) と表記し、次にリスクが高いエリアは②Overtaking (追い越し) とした。同様に Head on (行き合い) についても表記した。追い越し、行き合いともにリスクが高くなるのは Galle 沖を通過後であることが分かった。追い越しと行き合いのリスクが高いエリアの交通流をより拡大し分析することにした。

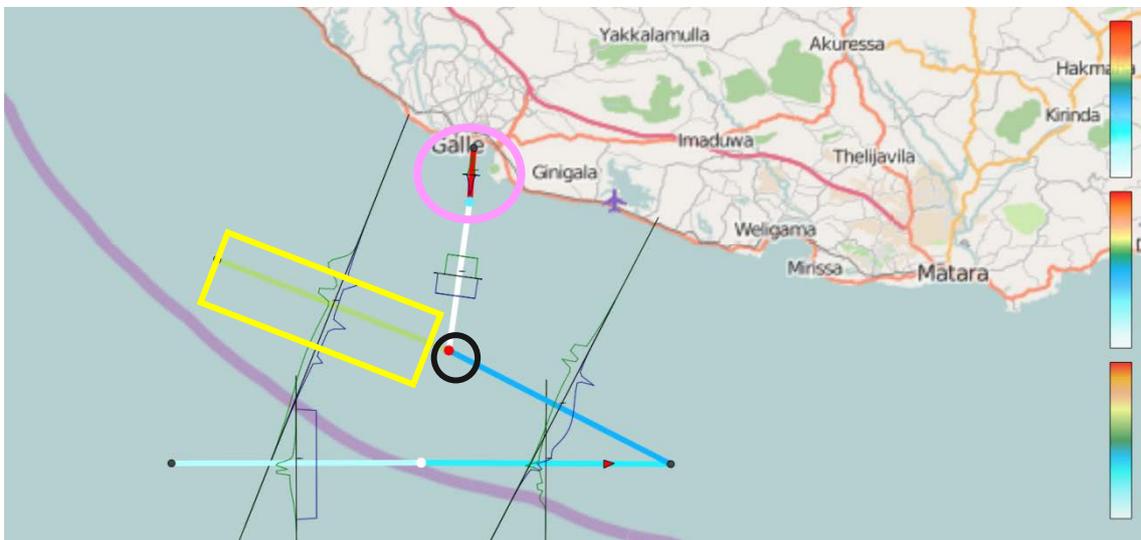


図 2-13(a) Galle の交通流におけるリスク

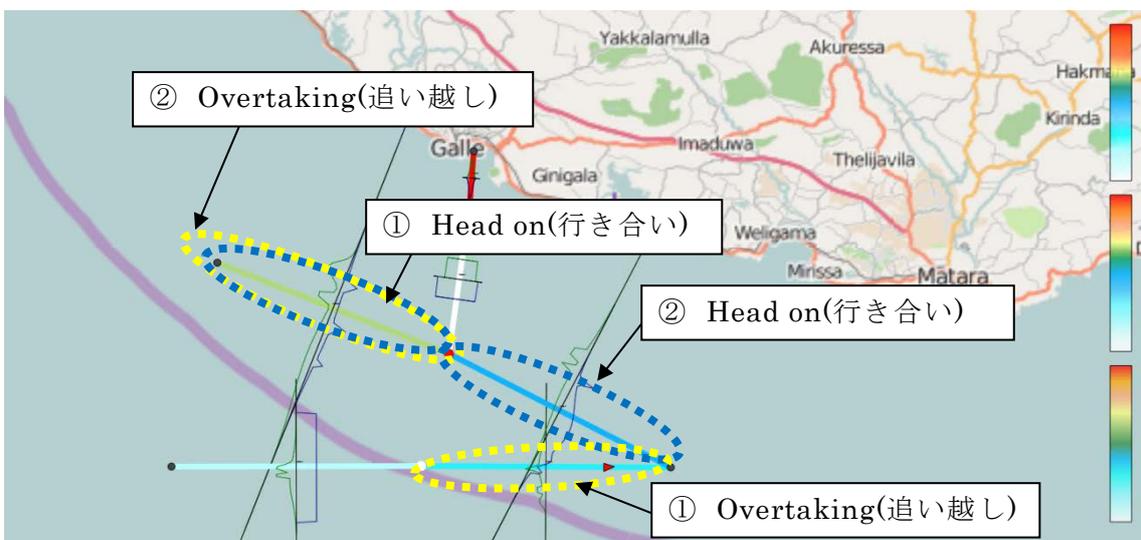


図 2-13(b) Galle の交通流における見合い別リスク

2.9 Galle のリスクの高いエリアについて

Galle のエリアで潜在的なリスクも含め危険と考えられる 3 つの海域を図 2-14(a)に示す。これらの海域をそれぞれ分析する。最もリスクが高い海域は、図 2-14(a)の①である。この①は港への出入港の交通流である。見合い関係に焦点を当てたリスクが最も高いのが図 2-14(a)の②である。この②は、Galle 沖を通過していく交通流である。船舶の航跡から潜在的なリスクがあると考えられるのが図 2-14(a)の③である。

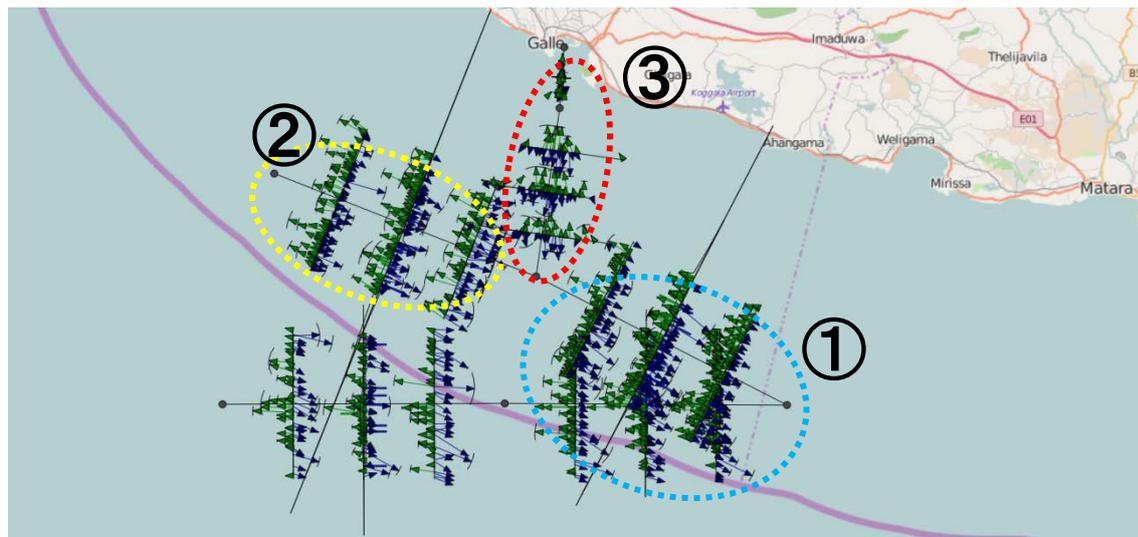


図 2-14(a) Galle の船首方位による潜在的なリスク

最初に①の交通流に注目する。図 2-14(b)の黒矢印で入港の交通流の向きを示した。このように①では狭い港内に入るまたは出るため船間距離も短くなり行き合いも多いため、最も危険であるといえる。このエリアは、交通流の中央にバーチャル AIS を表示し、かつ港内の手前にブイを設置し、整流すべきであると考ええる。

次に②の交通流に注目する。図 2-14(c)の橙色の矢印部分が②の交通流である。一見他の交通流と比較しても船間距離もあり、交差もないように見える。しかし、図 2-14(c)の黄色の点線の四角の部分に注目すると、航行船舶が 3 種類の進路を取っていることが分かる。Galle 港に入港しようと進路を変更する船舶、直進する船舶、交通流の中央に入ろうとしている船舶である。この②付近には目標物もない。TSS にも距離があるため、交通流も集中せず、船間距離も取りやすいと考えやすいが、3 種類の船舶がいることから、進路の目標となるバーチャル AIS を図 2-14(c)の白丸付近に表示し、整流すべきであると考ええる。

最後に③の交通流に注目する。図 2-14(d)の黒色の点線の四角の部分が③の交通流である。この交通流の特徴は、横幅が広い点である。図 2-14(d)の赤の矢印に横幅を示す。横幅のある交通流は船間距離が長く取れ安全ではあるものの、交差も生み出すため、見合い関係の判断に迷う状況もあるのではないかと推測する。そのため、このエリアでは、図 2-14(d)の白丸付近にバーチャル AIS を表示させ、このブイの内側を通航させることで、交通流の横幅を狭く図 2-14(d)の黄色矢印程度に整流すべきであると考ええる。



図 2-14(b) Galle の船首方位による潜在的なリスク①

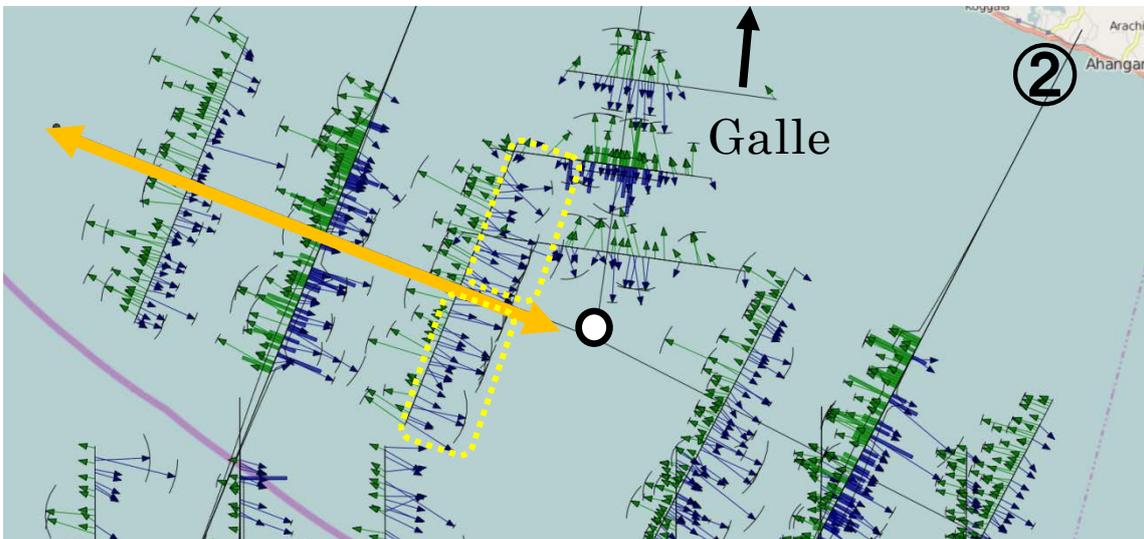


図 2-14(c) Galle の船首方位による潜在的なリスク②

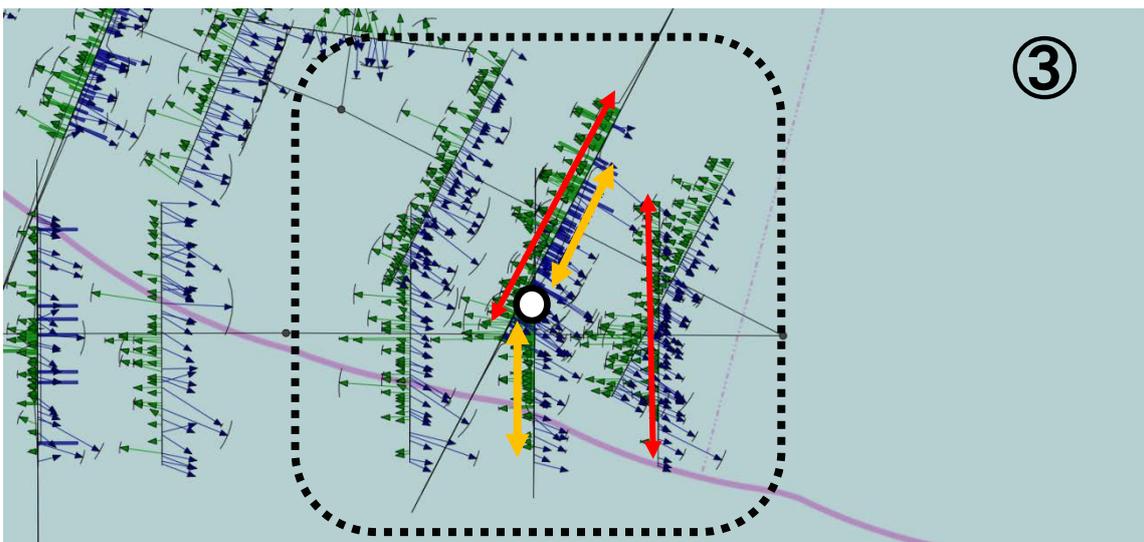


図 2-14(d) Galle の船首方位による潜在的なリスク③

2.10 バーチャル AIS の設置場所について

Appendix2.1 節から 2.9 節の分析結果を踏まえ、交通流を整流しようとした場合、リスクの高いエリアでは、現在の交通流の中央部分に 3nm ごとにバーチャル AIS を表示させるのがよいと考える。バーチャル AIS は操船者の目の前に実際にあるわけではない。そのため、推奨する設定航路を通らずともブイとの衝突は生じない。そのため、レーダや ECDIS 上にバーチャル AIS のみで通る航路が分かるように表示するのがよいと考える。図 2-15 は、正確な 3nm ごとではないが、交通流に沿ってバーチャル AIS を表示させるとよい場所にマークを入れた図である。バーチャル AIS は白丸で表わし、ブイは、黄色の丸で表わした。水色はスリランカ沖を通過しアラビア海へ進路を取る船舶と Galle へ入港する船舶の流れを表している。白色の矢印はアラビア海からスリランカ沖を通過する船舶と Galle から出港する船舶の流れを表している。

この図 2-15 は現時点での構想段階であり、今後さらに情報を収集するなどして、改善していきたいと考えている。

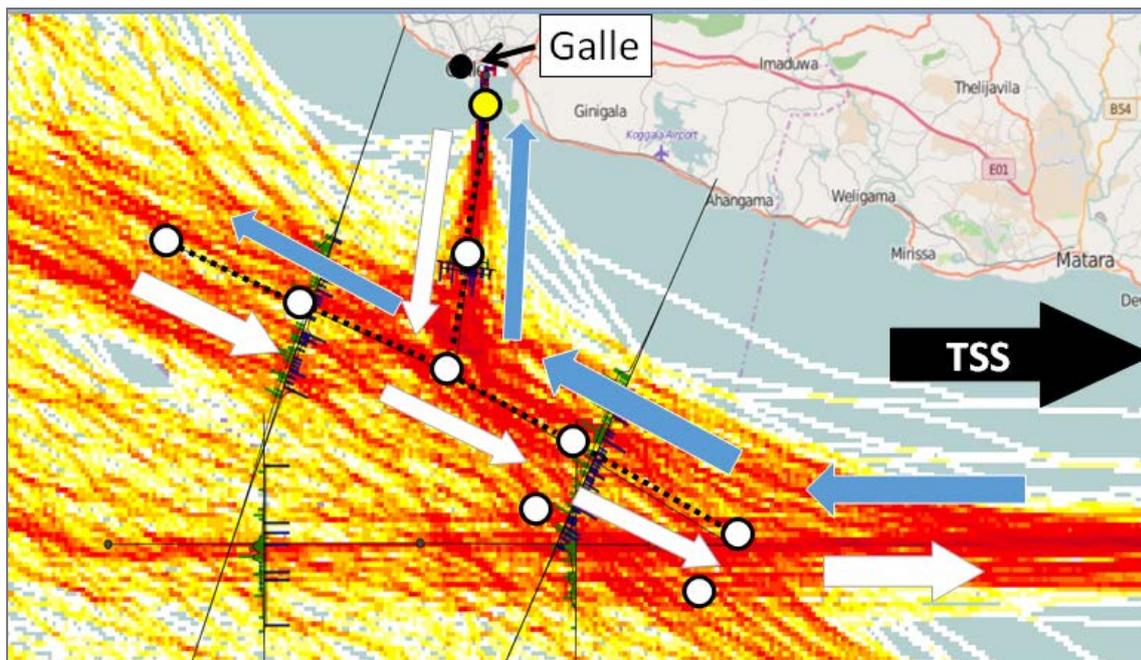


図 2-15 提案するバーチャル AIS の設置場所

Appendix.3 解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスク

以下に解析対象日数に対する見合い関係ごとのリスクの結果を表で示す。

表 3-1 見合い関係ごとのリスク(正面衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1日	21.87	-1.37	-6.7%	-1.95	-9.8%
3日	20.83	-0.33	-1.6%	-0.91	-4.6%
1週間	16.04	4.46	21.8%	3.88	19.5%
2週間	15.18	5.32	26.0%	4.74	23.8%
3週間	16.19	4.31	21.0%	3.73	18.7%
1ヶ月	17.64	2.86	14.0%	2.28	11.4%
2ヶ月	20.28	0.22	1.1%	-0.36	-1.8%
3ヶ月	20.5	-	-	-0.58	-2.9%
12ヶ月	19.92	-0.58	-2.8%	-	-

表 3-2 見合い関係ごとのリスク(追い越し衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1日	5.757	1.238	17.7%	2.875	33.3%
3日	7.788	-0.793	-11.3%	0.844	9.8%
1週間	7.152	-0.157	-2.2%	1.48	17.1%
2週間	6.62	0.375	5.4%	2.012	23.3%
3週間	7.216	-0.221	-3.2%	1.416	16.4%
1ヶ月	8.495	-1.5	-21.4%	0.137	1.6%
2ヶ月	9.08	-2.085	-29.8%	-0.448	-5.2%
3ヶ月	6.995	-	-	1.637	19.0%
12ヶ月	8.632	1.637	23.4%	-	-

表 3-3 見合い関係ごとのリスク(交差衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1日	32.04	1.48	4.4 %	-23.589	-279.1 %
3日	38.05	-4.53	-13.5 %	-29.599	-350.2 %
1週間	31.32	2.2	6.6 %	-22.869	-270.6 %
2週間	27.78	5.74	17.1 %	-19.329	-228.7 %
3週間	29.99	3.53	10.5 %	-21.539	-254.9 %
1ヶ月	9.361	24.159	72.1 %	-0.91	-10.8 %
2ヶ月	25.85	7.67	22.9 %	-17.399	-205.9 %
3ヶ月	33.52	-	-	-25.069	-296.6 %
12ヶ月	8.451	-25.069	-74.8 %	-	-

表 3-4 見合い関係ごとのリスク(屈曲部衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1日	1.585	0.107	6.3 %	0.148	8.5 %
3日	1.747	-0.055	-3.3 %	-0.014	-0.8 %
1週間	1.474	0.218	12.9 %	0.259	14.9 %
2週間	1.524	0.168	9.9 %	0.209	12.1 %
3週間	1.554	0.138	8.2 %	0.179	10.3 %
1ヶ月	1.758	-0.066	-3.9 %	-0.025	-1.4 %
2ヶ月	1.68	0.012	0.7 %	0.053	3.1 %
3ヶ月	1.692	-	-	0.041	2.4 %
12ヶ月	1.733	0.041	2.4 %	-	-

表 3-5 見合い関係ごとのリスク(合流衝突)

	リスクの値	3ヶ月との差		12ヶ月との差	
		数値	%	数値	%
1日	1228	-851.5	-226.2 %	-762.2	-163.6 %
3日	296.6	79.9	21.2 %	169.2	36.3 %
1週間	362.2	14.3	3.8 %	103.6	22.2 %
2週間	554.5	-178	-47.3 %	-88.7	-19.0 %
3週間	304.9	71.6	19.0 %	160.9	34.5 %
1ヶ月	257.8	118.7	31.5 %	208	44.7 %
2ヶ月	285.9	90.6	24.1 %	179.9	38.6 %
3ヶ月	376.5	-	-	89.3	19.2 %
12ヶ月	465.8	89.3	23.7 %	-	-

参考文献

第1章

- (1) 疋田賢次郎・福戸淳司・沼野正義・稲岡孝・中藤雅範：目視認識支援装置の開発，日本航海学会論文集，No.122，pp.7-13,2009.10.
- (2) 小野昌也：内航海運における船舶管理高度化の実例，日本航海学会誌，No.196,pp.21-25, 2016.7.
- (3) 中野和昌：運航支援システム，日本航海学会誌，No.196,pp.17-20,2016.7.
- (4) 庄司るり：先端ナビゲートシステムと船舶情報の活用について，日本航海学会誌，No.196, pp.12-16,2016.7.
- (5) 市川正隆：ウェアラブル端末を活用した救急救命システムの開発-プロトタイプシステムの要件および映像音声通信機能の開発-，筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科特定課題研究報告書，pp1-172,2011.3.
- (6) 高田晋太郎・松原孝志・森直樹：HUD とジェスチャ操作の組み合わせによる運転中の機器操作ディストラクションの低減，情報処理学会全国大会講演論文集，No.77,pp.73-74, 2015.3.
- (7) 中村有貴・仲谷善雄：ヘッドアップ型情報提示装置を用いた、初心運転者のための合流支援システム，情報処理学会全国大会講演論文集，No.74,pp.191-192, 2012.3.
- (8) 有村信夫・山田一成・管澤忍・米原健一：衝突予防援助装置の安全性の評価に関する考察，日本航海学会論文集，No.94,pp.187-192,1996.3.
- (9) 中村紳也・小瀬邦治：船舶航行の安全性評価，日本航海学会論文集，No.92,pp.101-112, 1995.3.
- (10) 日當博喜・小瀬邦治：閉塞された水路の航行危険度の評価尺度に関する研究，日本航海学会論文集，No.91,pp.51-60,1994.9.
- (11) 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，No.133,pp.66-74,2015.12.
- (12) 福戸淳司・今津隼馬：相手船による妨害ゾーン(OZT)を用いた衝突警報の検討，日本航海学会論文集，No.128,pp.49-54,2013.3.
- (13) 篠田岳思・下川和宏・田村由佳：ベイジアンネットワークを適用した漁船と大型船の衝突海難のリスク解析に関する研究，日本航海学会論文集，No.127,pp.165-174,2012.9.
- (14) 西山尚材・足達宏之・大津皓平・庄司るり：ウェザールーティングシステムの構築に関する研究-II.- 船載型モニタリングシステムデータの活用-，日本航海学会論文集，No.128,pp.199-206,2013.12.
- (15) 辻本勝・藤原敏文：船舶の実海域性能計算法(フォーカス)，日本船舶海洋工学会誌，No.27,pp36-38,2009.11.

- (16) 笹健児・寺田大介・塩谷茂明・若林伸和・池淵卓郎: 実海域における荒天航海時の貨物船の運動性能について-オンボードデータによる運動および波浪特性の分析・推定-, 日本船舶海洋工学会論文集, No.18, pp167-175, 2013.
- (17) 安藤英幸: 船舶運航におけるビッグデータの活用-燃費削減におけるケーススタディ-, マリンエンジニアリング, No.49 第5号, pp660-665, 2014.
- (18) Class NK: 2014 Class NK 秋季技術セミナー,
<http://www.classnk.or.jp/hp/ja/research/seminar/old.html>, 2017.3.15.
- (19) 海上保安庁: 海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成28年版), 2017.3.

第2章

- (1) 北澤文香: アンドロイド端末を使用した航海支援端末-ユビキタスな船内情報の提供-, 卒業論文, 2012.3
- (2) 北澤文香: 船舶の運航支援に関する基礎研究-航海情報の利用-, 修士学位論文, 2014.3
- (3) 国土交通省 海事局 海洋・環境政策課: 船舶ビッグデータによる海事産業の変革に向けた取り組み, 2015.4
<http://www.mlit.go.jp/common/001097131.pdf>, 2017.2.22
- (4) 総務省: 平成27年通信動向調査の結果,
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/160722_1.pdf, 2017.2.22
- (5) 農林水産省: 平成27年漁業就業動向調査,
http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/gyogyou_doukou/pdf/gyogyou_syugyou_15.pdf, 2017.2.22

第3章

- (1) 西村知久・小林弘明: 避航操船における見張り特性に関する研究-I, 日本航海学会論文集, No.118, pp.299-305, 2008.3.
- (2) 西村知久・小林弘明: 避航操船における見張り特性に関する研究-II, 日本航海学会論文集, No.120, pp.81-88, 2009.3.
- (3) 古莊雅生: 船舶の視認と見張りに関する一考察, 日本航海学会論文集, No.100, pp.59-66, 1999.3.
- (4) 児玉敬一・松下邦幸・多田光男: 船舶運航における視覚情報の重要性とヒューマンエラー-いくつかの海難事故を例として-, 電子情報通信学会技術研究報告, No.256, pp.19-22, 2004.8.
- (5) Oculus社: Oculus Rift+touch 製品情報, <https://www.oculus.com/rift/>, 2017.2.26.
- (6) ブラザー工業株式会社: エアスカウタースペシャルページ,
<http://www.brother.co.jp/special/hmd/airscouter/index.htm>, 2017.2.26.

- (7)Amazon:Google Glass グーグル グラス 開発者向け販売ページ,
<https://www.amazon.co.jp/Google-Glass-%E3%82%B0%E3%83%BC%E3%82%B0%E3%83%AB-%E3%82%B0%E3%83%A9%E3%82%B9-%E9%96%8B%E7%99%BA%E8%80%85%E5%90%91%E3%81%91/dp/B00H3BX61E>,2017.2.26.
- (8)塚本昌彦:Google Glass はどうなったのか? どうなるのか?,情報処理学会誌,Vol.56 No.4,pp402-404,2015.4.
- (9)日本マイクロソフト株式会社: HoloLens 法人向け製品情報,
<https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/ja-jp>,2017.2.26.
- (10)ASCII.jp 編集部:見た目もサイバーなスマートグラスを使ってみた外見も性能も近未来なスマートグラス「MOVERIO BT-200」,
<http://ascii.jp/elem/000/000/914/914445/index-2.html>,2017.2.26.
- (11)セイコーエプソン株式会社:MOVERIO 製品情報,BT-200AV/BT-200,
<http://www.epson.jp/products/moverio/bt200/>,2017.2.26.
- (12)I/O 編集部,「VR」「AR」技術ガイドブック,pp1-157,2016.9.
- (13)パイオニア株式会社:カロツェリア機能紹介,
http://pioneer.jp/carrozzeria/system_up/navi/nd-hud10/,2017.2.26.
- (14)遠山貴大・戸谷貴洋・宮尾敏明・小嶋健仁・木下史也・山川達也・木村瞭太・宮尾克:シースルー型ウェアラブルメガネを用いた AR による作業効率向上への効果,情報処理学会報告,No.46, pp.1-4,2016.1.
- (15)株式会社インプレス:大画面/多画面マニア西川善司レビュー,
<http://www.watch.impress.co.jp/topics/epson1503/>,2016.9.19.
- (16)竹本孝弘・岩崎裕行・古荘雅生・阪本義治:操船者の情報処理システムに基づく避航行動,日本航海学会論文集,No.120,pp.35-43,2008.10.
- (17)今津隼馬:衝突針路を使った OZT 算出方法,日本航海学会誌,No.188,pp.78-81,2014.3.
- (18)富士原匡隆・新井イスマイル:光学透過型 HMD を用いた AR ナビにおける背景色に基づくビューマネジメント,情報処理学会研究報告,No.11, pp.1-5,2012.3.
- (19)武蔵野美術大学:MAU 造形ファイル 色相関,
<http://zokeifile.musabi.ac.jp/%E8%89%B2%E7%9B%B8%E7%92%B0/>,2017.3.10.
- (20)河本健一郎・坂本和也・広野康平・古荘雅生・瀧真輝・藤本昌志・矢野吉治・小瀧信幸・加尻慎也・石原嗣生:海上における安全色の視認性,日本色彩学会誌,No.35,pp.138-139,2011.5.
- (21)疋田賢次郎・福戸淳司・沼野正義・稲岡孝・中藤雅範:目視認識支援装置の開発,日本航海学会論文集,No.122, pp.7-13,2009.10.

第 4 章

- (1)国土交通省 海難審判所:裁決の閲覧 裁決で用いられる用語の説明,
http://www.mlit.go.jp/jmat/saiketsu/saiketsu_kako/teigi.htm#海難の種類（事件種類）,2017.2.26.

- (2)藤井弥平:船の衝突直径と衝突発生率,日本航海学会誌,No.42,pp1-8,1969.12.
- (3)水城南海男・山内宏之・藤井弥平:海上交通事故の調査-II,日本航海学会誌,No.46, pp171-180, 1971.12.
- (4)藤井弥平・山内宏之・水城南海男:交通事故当量と衝突危険度-船の衝突回数・推定係数について-,日本航海学会誌,No.46,pp181-189, 1971.12.
- (5)大嶋良三・藤井弥平:横切の避航直径と避航領域,日本航海学会論文集,No.47,pp103-108, 1972.8.
- (6)藤井弥平・山内宏之・水城南海男:海上交通事故の調査-III,日本航海学会論文集,No.50 , pp15-20,1973.12.
- (7)藤井弥平・山内宏之:海上交通事故の研究-IV-明るさおよび視程の事故率におよぼす影響 -,日本航海学会論文集,No.50, pp21-28,1973.12.
- (8)藤井弥平:海上交通事故の研究-V-損害の程度-,日本航海学会論文集,No.54,pp47-54, 1976.1.
- (9)山内宏之・藤井弥平:海上交通事故の研究-VI-交通事故危険度の再調査-,日本航海学会論 文集,No.60,pp45-49,1979.2.
- (10)藤井弥平:多重遭遇について,日本航海学会論文集,No.65,pp179-184,1981.9.
- (11)松井孝幸・藤井弥平・山内宏之:海上交通事故の研究-VII-横切の衝突確率について-,日 本航海学会論文集,No.69,pp177-180,1983.9.
- (12)松井孝幸・藤井弥平・山内宏之:海上交通事故の研究-VIII-航行船舶と浮標及び操業中 の漁船の衝突確率について-,日本航海学会論文集,No.70,pp207-212,1984.1.
- (13)松井孝幸・藤井弥平・山内宏之:海上交通事故の確率と危険度,日本航海学会論文集, No.73, pp75-86,1985.9.
- (14)河島園子・川村恭己・伊藤博子:AIS データの主成分分析による関門海峡の交通流の特 徴抽出とその再現手法の検討,日本船舶海洋工学会論文集,No.19,pp323-326,2014.11.
- (15)河島園子・川村恭己・伊藤博子・福戸淳司:AIS データの主成分分析に基づく海上交通 流発生と遭遇確率評価シミュレーション,日本船舶海洋工学会論文 集,No.20,pp465-468, 2015.5.
- (16)河島園子・川村恭己・伊藤博子・福戸淳司:AIS データの主成分分析による海上交通流 の特徴抽出とそれに基づく遭遇確率評価シミュレーション,日本船舶海洋工学会論文 集,No.23,pp55-63,2016.6.
- (17)IALA:IWRAP theory, <http://www.iala-aism.org/wiki/iwrap/index.php/Theory>, 2017.3.10.
- (18)慶応義塾大学講義資料:確率ノート <http://www.ae.keio.ac.jp/lab/soc/takeuchi/lectures/kakuritsu.pdf>,2017.3.10.
- (19)海上保安庁警備救難部航行安全企画課:昭和 51 年度通航船舶実態調査報告書,1976.3.
- (20)海上保安庁警備救難部航行安全企画課:昭和 52 年度通航船舶実態調査報告書,1977.3.
- (21)海上保安庁警備救難部航行安全企画課:昭和 53 年度通航船舶実態調査報告書,1978.2.
- (22)海上保安庁警備救難部航行安全企画課:昭和 54 年度通航船舶実態調査報告書,1979.3.

- (23)海上保安庁警備救難部航行安全課:昭和 55 年度通航船舶実態調査報告書,1980.3.
- (24)海上保安庁警備救難部航行安全課:昭和 56 年度通航船舶実態調査報告書,1981.3.
- (25)海上保安庁:海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成 22 年版)資料編,2011.5.
- (26)海上保安庁:海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成 23 年版)資料編,2012.3.
- (27)海上保安庁:海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成 24 年版)資料編,2013.3.
- (28)海上保安庁:海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成 25 年版)資料編,2014.3.
- (29)海上保安庁:海難の現況と実態-大切な命を守るために-(平成 26 年版),2014.3.
- (30)内閣府:平成 28 年版交通白書,第 2 編海上交通,pp147-167,2016.6.
- (31)東京湾海上交通センター:海の安全ガイド,
http://www6.kaiho.mlit.go.jp/tokyowan/others/tokyo_guide/baylaw.htm,2017.3.10.
- (32)Gatehouse 社:IWRAP Mk2 v5.0.1 manual,pp1-97,2016.
- (33)気象庁:平成 23 年 3 月地震・火山月報(防災編),pp57-148,2011.3.
- (34)東京都:建物における液状化対策ポータルサイト,
<http://tokyo-toshiseibi-ekijoka.jp/about.html>,2017.3.10.
- (35)阿部和彦:東日本大震災が東京湾に与えた影響,UED レポート,2012 夏号,pp44-54,
2014.6.
- (36)内藤裕之:東京湾における地震・津波発生時船舶避泊対策の提案,国土交通省国土技術研究会論文集,pp53-56,2013.
- (37)気象庁:知識・解説 台風とは,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/typhoon/1-1.html>,2017.3.10.
- (38)海上保安庁:本州南・東岸水路誌,pp133-188,2014.3.
- (39)気象庁:2011 年(平成 23 年)の台風について,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1112/21a/typhoon2011.pdf>,2017.3.10.
- (40)気象庁:2014 年(平成 26 年)の台風について,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1412/22d/typhoon2014.pdf>,2017.3.10.
- (41)日本気象協会:過去の天気,
http://www.tenki.jp/past/?selected_type=weather,2017.3.10.
- (42)気象庁:過去の気象データ検索,
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?sess=6ef525a9cdef28cea634ce58ca736e68>,2017.3.10.
- (43)YAHOO! JAPAN 天気災害:過去の天気,
<http://weather.yahoo.co.jp/weather/jp/past/>,2017.3.10.
- (44)日本海難防止協会,海と安全 2014 冬 No.563 特集 航路標識の重要性と今後のあり方,
pp48-49,2014.12.
- (45)第五管区海上保安本部:AIS バーチャル航路標識の実用化実験について(継続),
http://www6.kaiho.mlit.go.jp/05kanku/info/virtual_ais_J.pdf,2017.3.17.
- (46)第五管区海上保安本部:第五管区海上保安本部ニュース,
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/05kanku/contents/news/archives/cat10/cat13/2012-11-01-1350-post-868.html>,2017.3.17.

第 5 章

- (1)加納敏幸:運航データの利・活用 最新ツールを活用した省エネ・安全運航の取り組み-
更なる省エネ・安全運航を目指して-,運航支援に関するセミナー,pp51-64,2013.7.
- (2)谷口中・田村欣也:風圧抵抗修正の新しい方法について,西部造船学会会報,No.18,
pp21-34,1959.8.
- (3)加納敏幸・伊勢谷沙織・山崎英津子:内航船の航海データから見た対水船速の一考察,
日本航海学会論文集,No.122,2010.3.
- (4)一般社団法人 日本船主協会:海運雑学ゼミナール
<https://www.jsanet.or.jp/seminar/index.html>,2017.2.22
- (5)小林充・松浦邦明・加納敏幸:環境調和型航海支援システムのための船舶性能推定と実
証実験の検証,日本船舶海洋学会講演会論文集,No.12, 2011.5.
- (6)社会情報サービス統計調査研究室:統計 WEB
<https://software.ssri.co.jp/statweb2/>,2017.3.17.
- (7)東京大学教養学部統計学研究室,自然科学の統計学(基礎統計学Ⅲ),pp1-23,東京大学出版
会,1992.8.
- (8)小林幹雄・鈴木七緒・黒崎千代子・福田安蔵・安岡善則,新装版 数学公式集,
pp272-273,2005.5.

Appendix

- (1)ELECOM:無線 LAN の基礎知識
http://www2.elecom.co.jp/network/wirelesslan/column/wifi_column/vol42/
,2017.3.17.
- (2)高山智之:東京湾における海上ブロードバンドの可能性,卒業論文,2013.3.