



2021年度

効率運航操船支援システムの技術開発

成果報告書

2022年12月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2020年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「効率運航操船支援システムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2020年度、2021年度の2年計画で、株式会社宇津木計器に委託して実施しており、その2年分の報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2022年12月
(一社)日本船用工業会

目次

第一部 令和2年度(2020年度)	1
1 事業の目的	1
2 事業の目標	3
2.1 本事業の最終目標	3
2.2 2020年度の目標	3
3 2020年度の実施内容	3
3.1 操船支援システムの試験機的设计/製作	3
3.1.1 设计概要	3
3.1.2 システム设计	4
3.1.3 試験機のハードウェア设计	6
3.1.4 試験機のソフトウェア设计	8
3.1.5 動揺計の検証	11
3.1.6 試験機の検証	12
3.1.7 試験機的设计/製作の成果	13
3.2 試験機の実船搭載	14
3.2.1 実船搭載船	14
3.2.2 調査訪船	16
3.2.3 機器設置	16
3.2.4 計測データの取得	19
3.2.5 計測データの検証	20
3.2.6 実践搭載の成果	22
3.3 試験機の評価試験	22
3.3.1 検証概要	22
3.3.2 波浪推定の入力データ	23
3.3.3 検証手法	23
3.3.4 検証結果1	25
3.3.5 検証結果2	29
3.3.6 検証結果3	33
3.3.7 試験機の評価試験の成果	38
3.4 報告書の作成	38
4 目標の達成状況	38
4.1 2020年度の目標に対する達成状況	38
4.2 本事業の最終目標に対する達成状況	38
5 事業内容の実施概要	39
5.1 操船支援システムの試験機的设计/製作	39

5.2	試験機の実船搭載.....	39
5.3	試験機の評価試験.....	39
5.4	報告書の作成.....	39
6	今後の予定.....	39
7	まとめ.....	40
第二部 令和3年度（2021年度）.....		41
8	事業の目標.....	41
8.1	本事業の最終目標.....	41
9	2021年度の実施内容.....	41
9.1	燃費改善効果の立証.....	41
9.1.1	燃料改善シミュレーションソフトウェアの設計.....	41
9.1.2	燃料改善シミュレーションの結果.....	46
9.1.3	荒天予測から荒天時と好天時の燃料消費量を比較した結果.....	53
9.2	安全指標・燃費改善指標の確立.....	68
9.2.1	安全指標の確立.....	68
9.2.2	燃費改善指標の確立.....	76
9.3	製品版の完成.....	79
9.3.1	システム構成図.....	79
9.3.2	製品のハードウェア設計.....	81
9.3.3	製品のソフトウェア設計.....	82
9.3.4	製品概要.....	84
9.4	製品版の評価試験.....	99
9.4.1	評価試験結果.....	99
9.5	報告書の作成.....	99
10	目標の達成状況.....	99
11	2021年度の実施内容の概要.....	100
11.1	燃費改善効果の立証.....	100
11.2	安全指標・燃費改善指標の確立.....	100
11.3	製品版の完成.....	101
11.4	製品版の評価試験.....	101
11.5	報告書の作成.....	101
12	今後の予定.....	101
13	謝辞.....	102

第一部 令和2年度（2020年度）

1 事業の目的

近年における建造船舶は輸送効率面から大型化の傾向にあり、特にコンテナ船においては大型化に伴って拍車がかかり 10,000TEU 型以上の建造計画が軒並み公表されているが船舶の大型化による就航船は航海上での大振幅横揺れの影響からコンテナ流出事故が多発している。

航行中の船舶は、波浪との遭遇により縦揺れや横揺れが生じるが、横揺れが増幅すると姿勢を崩して荷崩れや転覆する可能性があり、一方、縦揺れは顕著な船体抵抗の増加によりエンジンとプロペラの効率の悪化を招き、結果大幅に燃費が悪くなってしまう。

本船航行中にリアルタイムで波浪を計測する手法は、種々のセンサにより検証を繰り返し実施され提案されてきているが、実用化に至る手法としてこれまで確立されていないため、計測方法としては実施者は長年、業界で培ってきた受圧式喫水計（以下、「喫水計」という）により波高計測を行うと言う新しい試みで、波高と船体動揺の計測から波浪予測を行う手法は世界初の挑戦となる。

この開発により波浪予測から荒天を回避することが可能となれば燃料消費率が削減可能となり GHG 削減にも貢献することができる。

またこれら計測により、SM(Sea Margin)を表示し荒天状況を見える化することで回転を落とす、避航操船などを適時に実施することでエネルギーロス削減につなげると共に、GHG 排出量を可視化し、荒天予測を事前に行うことで効率的で安全な航海が可能となってくる。

航行中に波高及び船体運動をリアルタイムに計測し、燃費改善指標を算出して燃費を見える化するとともに、当該船舶の会う波浪を予測し、安全運航に重要な指標を算出することにより、効率的かつ安全な航行が可能となる世界初の効率運航操船支援システム（以下、「操船支援システム」という）を開発する。

併せて、この操船支援システムには、船底汚損状況の評価を可能とするとともに、機関データを計測して機関の汚損や経年劣化などの性能状況を表示できるものとし、効率と安全の両面で活用可能とする。

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について補足すると以下のとおりである。

● 航行の効率性と安全性の向上

本船航行中にリアルタイムで波浪を計測する方法は、これまでも超音波式やレーダー式などが提案されているが、実用化に至る手法としていずれも確立されていない。

本操船支援システムは、動揺計により船体加速度及び傾斜角を計測し、また船体の船首船尾及び船体中央部の右舷・左舷に設置された喫水計により喫水を計測し、これらの計測値から波浪の高さ及び周期をリアルタイムに計測する。

中でも船舶運航の効率性と安全性を最も阻害するのは向波のうねりである。

本操船支援システムは、現在現場で運航判断にて主に使用されている天気図からは得られない、航行中の波浪の実測データを元に船体抵抗の増大や船体の動揺などの状態を運航者に

示し、これを参考にして運航することを可能とすることにより、運航効率性と安全性の向上に大きく貢献することができる。

さらに、本事業で開発する操船支援システムが実用化され、世界の主要航路を航行する各船での計測データをビッグデータとして集計・分析することにより、世界レベルでの波浪マップが作成可能となる。世界の外航船の数パーセントに本操船支援システムが装着され、荒天航海時の波浪データを集積・分析しデータベース化できれば、世界の航行の安全性向上に寄与する。

● 操船支援システム開発の経緯

波浪の計測については、日本船用工業会の令和元年 FS 事業「波浪予測（計測）から燃費改善に向けた技術開発調査事業」に採択され、実際に航行中の船舶で船体の動揺と喫水を同時に計測し、リアルタイムな波浪の計測に成功するなど、当初の計画通り順調に成果をあげた。

船体は、周期的な外力である波浪の周期（波長）、波向き、波高の大きさに応じて動揺する。縦揺れや横揺れといった船体動揺は、波浪に応答し、波浪という入力に対し、縦揺れや横揺れ、また船まわりに発生する水位変動が出力となる。両者の関係は船舶海洋工学にて理論的に解明されており、本開発では船体の動揺や船まわりの水位変動を計測することにより、波浪を推定する。

航行中の波高は、喫水計で計測した波浪データと船体加速度から算出できることが過去の研究（船載式波浪情報提供システムの開発に関する研究 日本造船学会論文集 第 192 号）に示されている。船体の加速度（縦揺れ）は平成 20 年～21 年の助成事業で開発した GM モニタリング装置で製品化した動揺計を使用することにより計測可能である。

● 理論と開発の難しさについて

船体の縦揺れは、機関出力の増大による大きなエネルギー損失に関する指標となる。

波浪により船体が動揺する運動を数値化するために喫水計で船周りの水位変動を計測し、また動揺計で縦揺れを計測する。「船舶海洋工学における耐航性理論」をもとに実測値から波浪の方向スペクトルを逆推定することにより今後の荒天と本船の操船の困難さを予測する。運航者に設定コースと速力の調整に資する情報を荒天に遭遇する前に提供可能となることから、荒天時の無用な機関出力損失を防ぐと共に荷崩れや転覆などの危険回避も可能となる。

実海域における波高の計測方法は、これまで、超音波式、レーダー式等様々な方式で試みられているが困難であった。特に外航船に大きく影響するうねりの計測は、波傾斜が小さい場合や船体の傾斜が大きくレーダー電波による波形の捕捉が不可能となる大波高の場合、困難であった。航行中の喫水を計測し実海域の波浪（波高）を算出する波高計測はこれまでの関連研究にも類を見ず、船体運動の計測と同時に行い解析する世界初の波高計測システムである。

2 事業の目標

2.1 本事業の最終目標

燃費改善指標により燃料消費量を航海平均で5%以上削減する。

2.2 2020年度の目標

喫水計を活用した波高計測試験機は、ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）計測値の±30%の範囲内に収まる精度とする。

3 2020年度の実施内容

3.1 操船支援システムの試験機の設計／製作

操船支援システムのソフトウェア（波浪予測、安全・燃費改善指標の算出）を検証するために、実船搭載用の試験機を設計／製作した。

実船搭載船は井本商運株式会社の協力を得て、同社が運航する内航コンテナ船「ながら」、「なとり」とした。同船には当社納入のバラスト制御装置が既設されている。バラスト制御装置には喫水計が接続されており、喫水の値が取得可能である。

3.1.1 設計概要

実船搭載船の操舵室に設置されているバラスト制御装置の盤内のスペースにBOX-PCを設置し、各計測機器類と接続し計測データの取得を行う。4点喫水値についてはバラスト制御装置と接続し取得を行う。接続方法はLAN接続とする。動揺計は新たに設置するが設置場所は船首喫水計付近が望ましいため船首喫水計付近に設置する。船首喫水計付近に通信設備がないが船内のWi-Fiが使用できる環境であるためWi-Fiを使用することにした。動揺計に「Wi-Fi RS-232C変換アダプタ」を接続し、動揺計から操舵室のBOX-PCに対してWi-Fiで通信する構成とした。ただし、Wi-Fiの電波状況は分からず安定した通信ができるか不明であったため、船首喫水計付近に設置した動揺計が使用できなかった場合を想定し、BOX-PCを設置する操舵室にも動揺計を設置し、BOX-PCと直接接続する構成とした。動揺計の値は動揺計と船首喫水計との距離から値を補正することで必要なデータは得られるため、船首喫水計付近に設置した動揺計が安定した通信が出来ればそれを使用し、安定した通信が出来なければ操舵室に設置した動揺計の値を補正して使用することとした。動揺計については当社製EI-900Aを使用するが、その精度を比較するために東京航空計器製の動揺計MG100CSとMG200CMの2台を使用することとした。MG100CSはMG200CMより高精度で動揺を計測することが出来る。またナウファス(全国港湾海洋波浪情報網: NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)¹⁾が公開しているGPS波浪計と比較するために、位置情報取得を目的としてGNSSアンテナを設置した。

3.1.2 システム設計

実船搭載船「ながら」、「なとり」は船体構造が同じであるため、基本的なシステム構成は共通としたが、動揺計 EI-900A は両船に搭載し、比較用の動揺計 MG100CS は「ながら」、MG200CM は「なとり」に搭載することとした。位置情報取得のための GNSS アンテナは MG100CS、MG200CM のオプション機能を利用してそれぞれに接続した。位置情報は MG100CS、MG200CM の通信から取得することとした。

1) 実船搭載船「ながら」システム構成図

実船搭載船「ながら」のシステム構成を図 3-1 に機器設置場所を図 3-2 に示す。

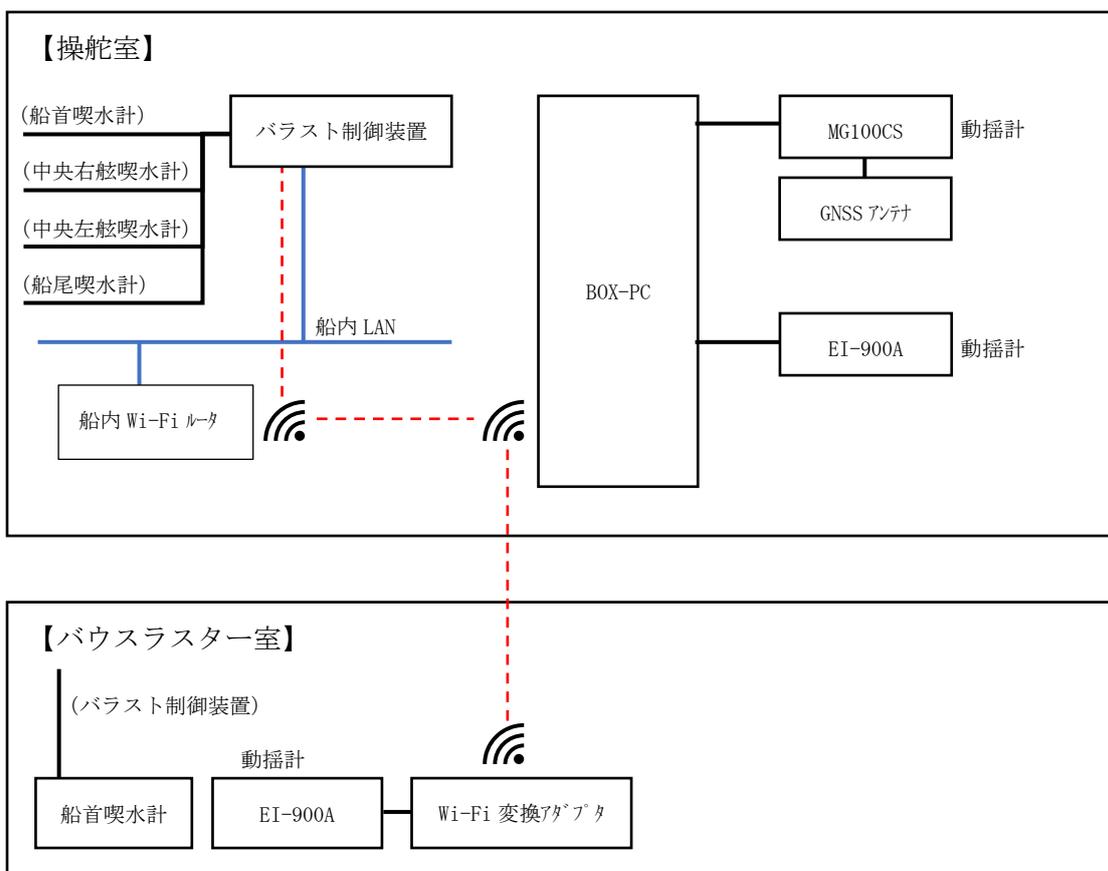


図 3-1 実船搭載船「ながら」システム構成図



図 3-2 実船搭載船「ながら」機器設置場所

2) 実船搭載船「なとり」システム構成図

実船搭載船「なとり」のシステム構成を図 3-3 に機器設置場所を図 3-4 に示す。

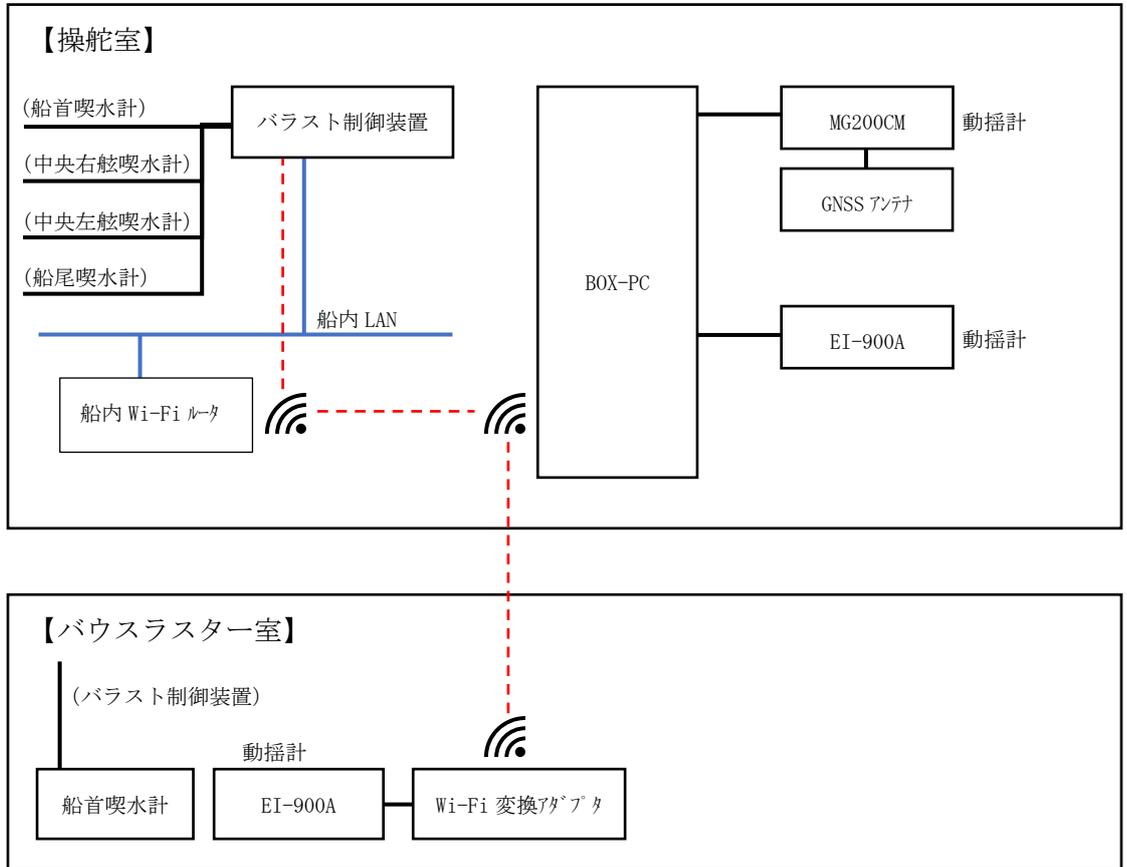


図 3-3 実船搭載船「なとり」システム構成図



図 3-4 実船搭載船「なとり」機器設置場所

3) 計測データの取得と解析

各計測機器から取得したデータはBOX-PCのローカルドライブにテキスト形式で保存する。保存したデータは定期的に訪船し当社へ持ち帰り、当社内でデータの解析と波浪推定処理を行うこととした。

3.1.3 試験機のハードウェア設計

3.1.2 システム設計で作成したシステム構成図をもとにハードウェア設計を行った。基本的なシステム構成は実船搭載船「ながら」、「なとり」共通のため、ハードウェア設計も共通とし、動揺計は全て同時に接続できる設計とした。また設置場所はパラスト制御装置（宇津木計器納入）の盤内とし、盤内の空きスペース縦500mm×横400mm×高さ200mmの大きさに収まるよう設計した。

1) 試験機ハードウェア構成

試験機のハードウェア構成を図3-5に示す。

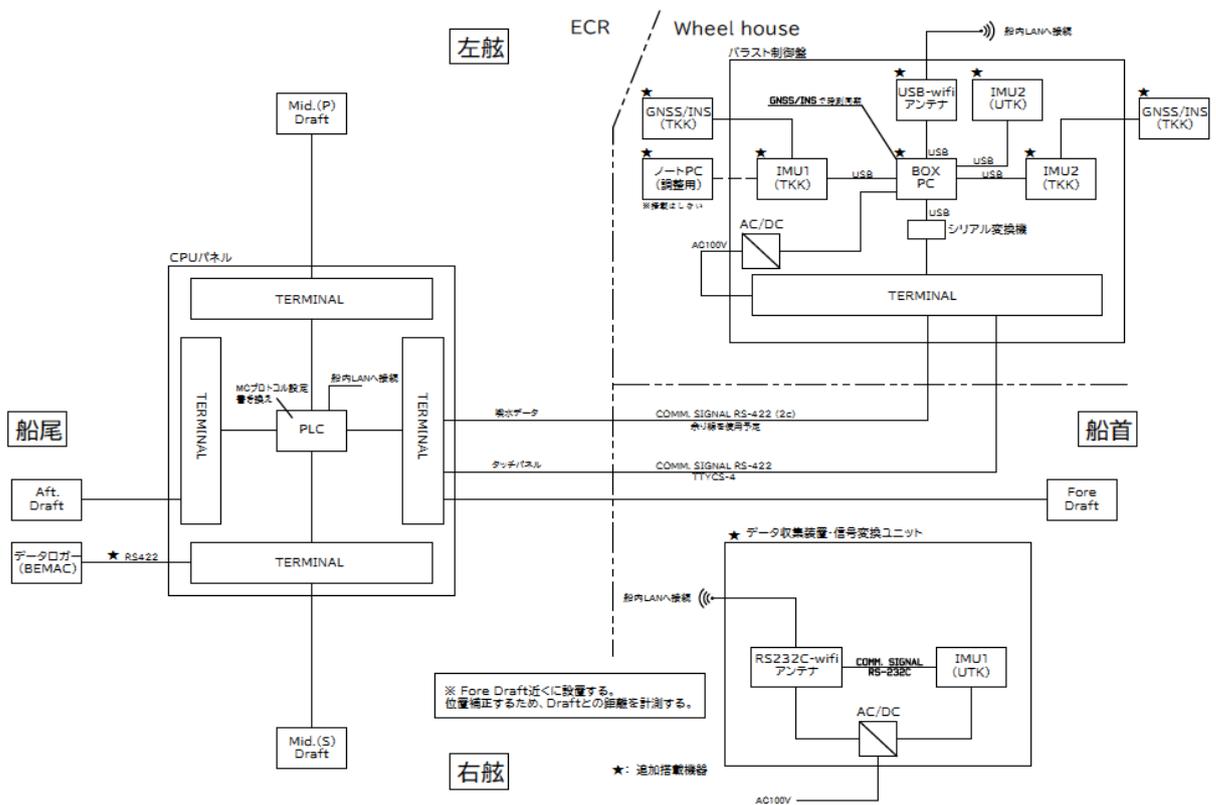


図 3-5 ハードウェア構成図

2) 試験機構成機器一覧

試験機の「ながら」構成機器一覧を表 3-1 に、「なとり」構成機器一覧を表 3-2 に示す。

表 3-1 「ながら」構成機器一覧

品名	型式	メーカー	数量
BOX-PC	EC4A-010CT-8G	アルゴシステム	1
Wi-Fi アダプタ	WI-U2-433DHP	BUFFALO	1
動揺計	CSM-MG100CS	東京航空計器	1
GNSS アンテナ	CSM-MG100CS-ANT	東京航空計器	1
動揺計	EI-900A	宇津木計器	1
Wi-Fi RS-232C 変換 アダプタ	REX-WF60	ラトックシステム	1

※主要な構成機器のみ記載

表 3-2 「なとり」構成機器一覧

品名	型式	メーカー	数量
BOX-PC	EC4A-010CT-8G	アルゴシステム	1
Wi-Fi アダプタ	WI-U2-433DHP	BUFFALO	1
動揺計	CSM-MG200CM	東京航空計器	1
GNSS アンテナ	CSM-MG200-ANT	東京航空計器	1
動揺計	EI-900A	宇津木計器	1
Wi-Fi RS-232C 変換 アダプタ	REX-WF60	ラトックシステム	1

※主要な構成機器のみ記載

3.1.4 試験機のソフトウェア設計

3.1.2 システム設計で作成したシステム構成図をもとにソフトウェア設計を行った。試験機のソフトウェアはBOX-PC上で動作する。試験機のソフトウェア構成を図 3-6 に示す。

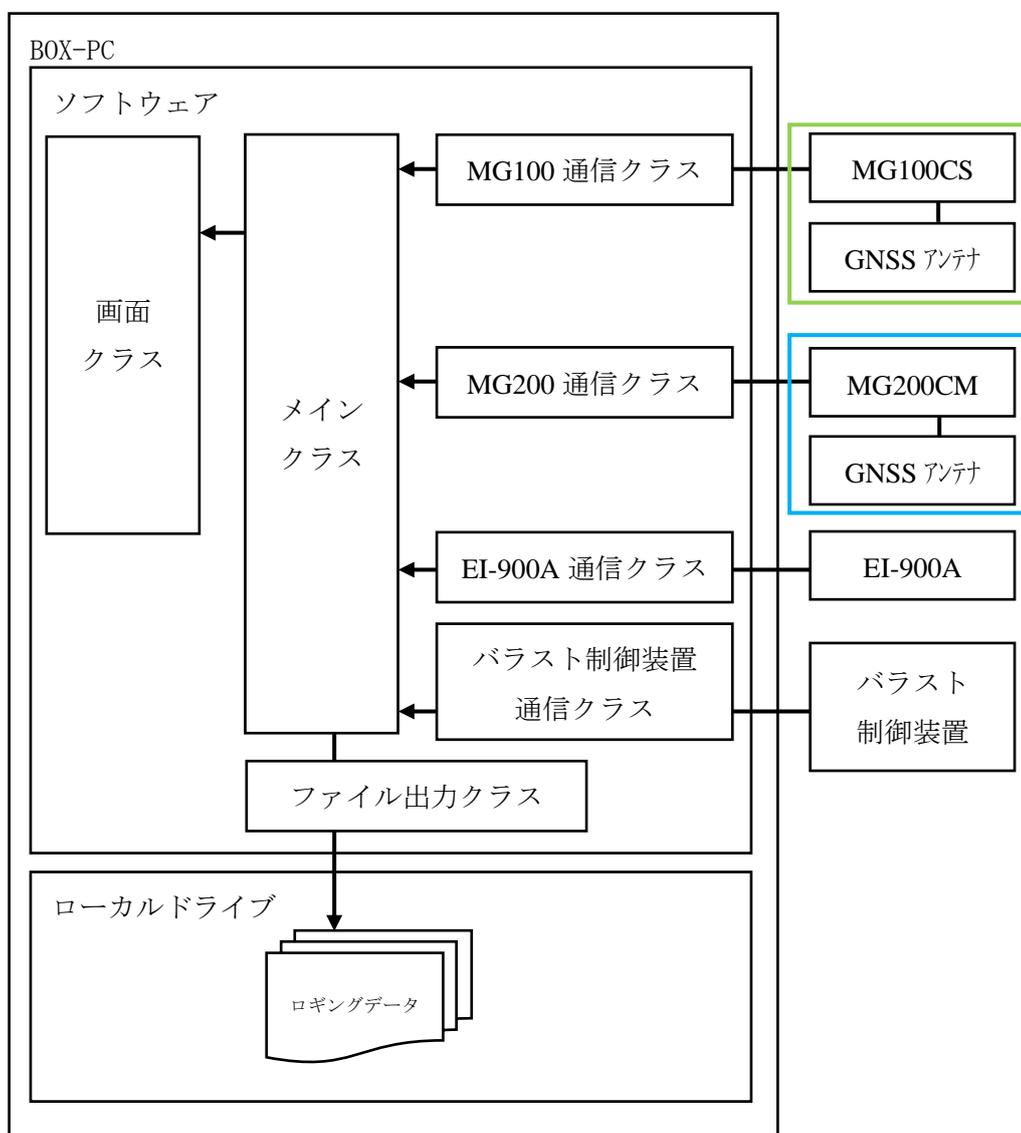


図 3-6 ソフトウェア構成図

ソフトウェアは実船搭載船「ながら」、「なとり」どちらも同じソフトウェアが使用できるように設計した。「ながら」に搭載する場合は緑枠の MG100CS が接続され、「なとり」に搭載する場合は青枠の MG200CM が接続され、それぞれの通信クラスが計測機器との通信を行う。

動揺計はシリアル通信でデータを受信し、バラスト制御装置は TCP/IP 通信でデータを受信する。各通信クラスが各機器とリアルタイムに通信を行い、通信した結果をメインクラスへ通知する。メインクラスは通信した結果を処理し、



図 3-9 EI-900A 通信確認画面

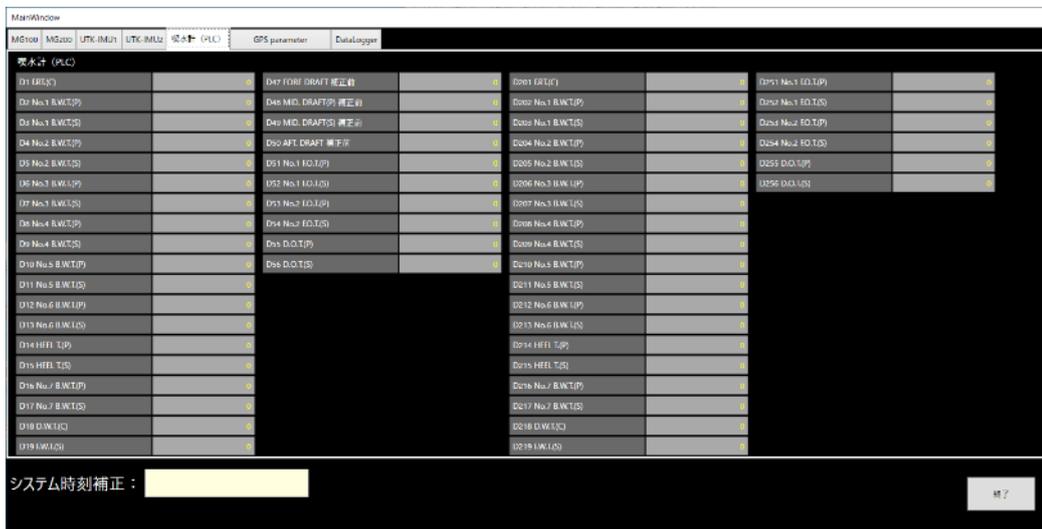


図 3-10 喫水計（バラスト制御装置）通信確認画面



図 3-11 船内で動作している様子

3.1.5 動揺計の検証

動揺計の製品比較のため、当社開発品の「EI-900A」と東京航空計器製「MG100CS」、「MG200CM」の評価を行った。比較する項目はデータ解析で使用する横揺れ角、縦揺れ角とした。

当社の社内設備である動揺試験台に実船搭載で使用する動揺計を設置し、動揺試験台を動作した際の動揺計から出力される値の比較を行った。動揺試験台は動作定義ファイルを読み込み、動作定義ファイルに定義された動作を連続して再現することが可能である。横揺れ角の結果を図 3-12、縦揺れ角の結果を図 3-13 に示す。

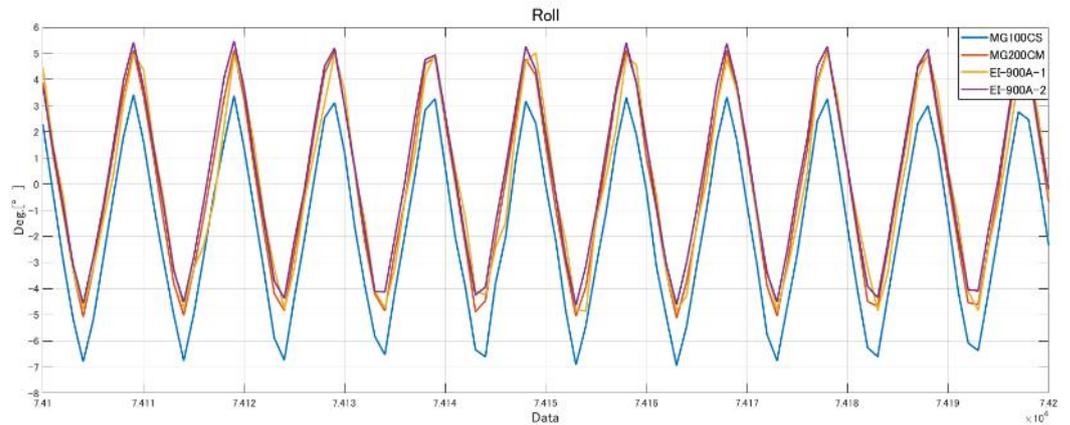


図 3-12 横揺れ角

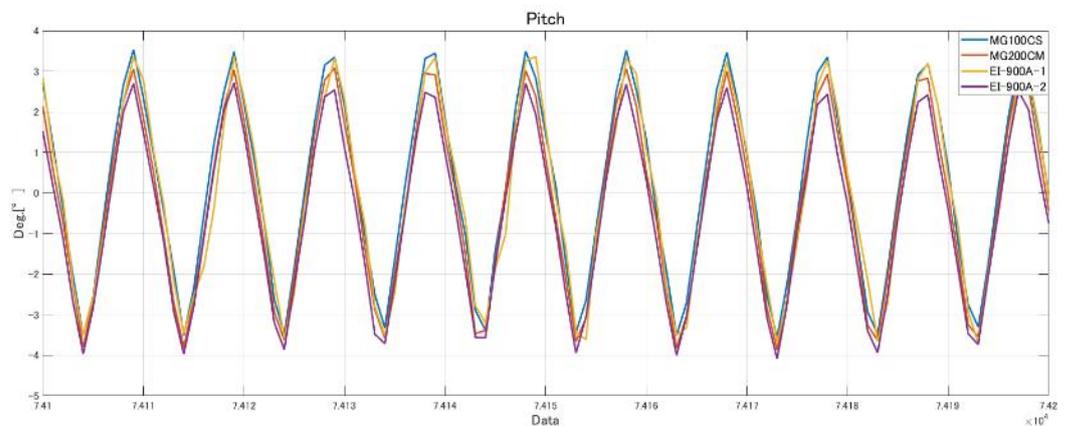


図 3-13 縦揺れ角

比較の結果、すべての動揺計で動揺試験台の動作に追従した値であることが確認できた。横揺れ角において、MG100CS が他の動揺計の値に対して僅かに乖離しているが、グラフの曲線は動揺試験台の動作と一致しており問題ないと評価した。

3.1.6 試験機の検証

1) 試験機検証のシステム構成

試験機は社内に模擬環境を構築し検証を行った。基本的なシステム構成は「ながら」、「なとり」で共通であること、ソフトウェアは同一のため検証環境は「ながら」、「なとり」と分けずに一つの環境とした。社内検証の環境を図 3-14 に示す。

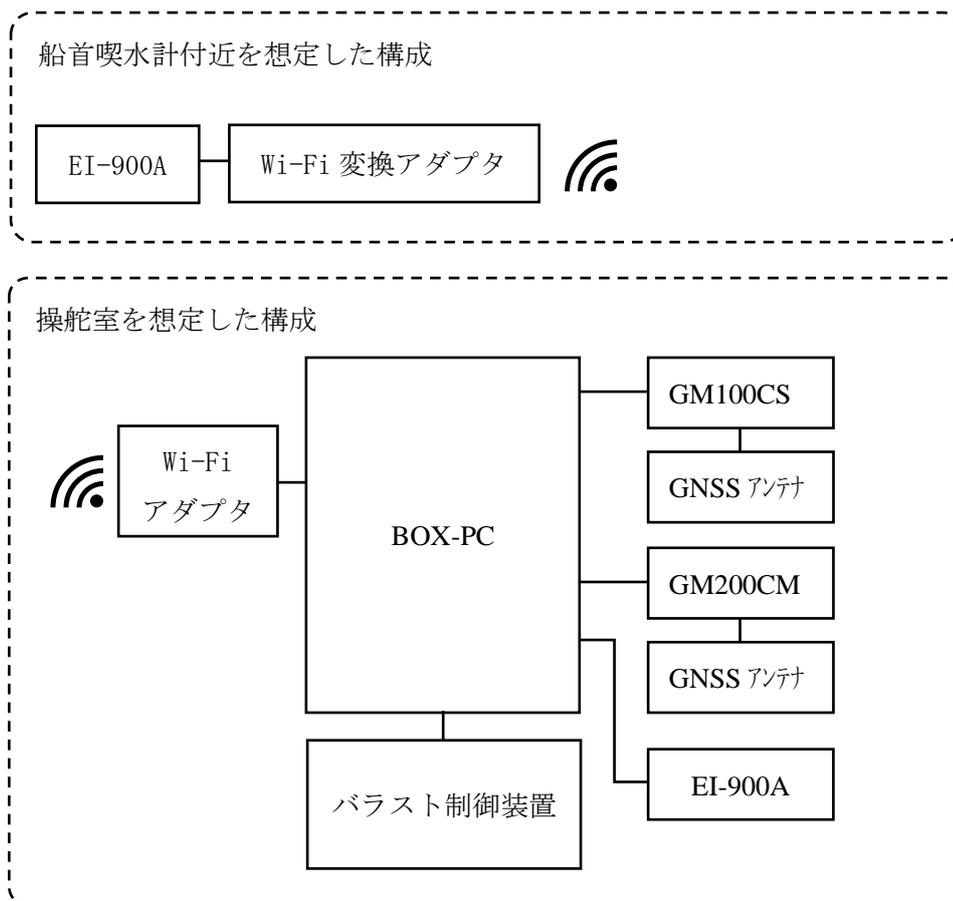


図 3-14 社内検証環境

2) GNSS アンテナの検証

図 3-14 の環境で GNSS アンテナが取得した位置情報が正しいことを確認した。また位置情報がリアルタイムに継続して記録されることを確認した。

次に社内検証環境を社用車に搭載し、公道を走行した。記録した位置情報を確認し、走行したルートが記録されることを確認した。

3) Wi-Fi 接続の検証

船首喫水計付近を想定した構成と操舵室を想定した構成が Wi-Fi 経由で通信できることを確認した。また船首喫水計付近を想定した構成の動揺計 EI-900A が計測した値が BOX-PC に記録されることを確認した。

4) 喫水値の検証

バラスト制御装置は実船搭載船と同じソフトウェアを準備し接続を行った。バラスト制御装置の画面に表示される船首、船尾、中央右舷、中央左舷の喫水値が BOX-PC に取り込まれることを確認した。

5) 検証結果

図 3-14 の環境で接続したすべての機器が正常に通信し、BOX-PC のローカルドライブにテキスト形式で記録することを確認した。一つの通信機器を物理的に切断した場合にその他の機器は記録が継続することを確認した。また切断した機器を再接続した場合に記録が再開されることを確認した。2 週間程度、計測を継続し、その間データが継続して記録されることを確認した。以上の結果より試験機は問題ないことを確認した。

3.1.7 試験機的设计/製作の成果

設置場所や配線経路、ネットワーク状況の確認のため訪船調査を行い、設置場所はバラスト制御装置(宇津木計器納入)の盤内とし、盤内の空きスペース縦 500mm×横 400mm×高さ 200mm の大きさに収まるよう設計することができた。また動揺計 3 機種 of 動作精度も良好であり、喫水値、GNSS アンテナ、Wi-Fi 接続アダプタ等、接続機器類との接続も問題はなく、期待通りの試作機を設計、製作することができた。

3.2 試験機の実船搭載

ソフトウェアは実船搭載試験を行いながら改良していくこととした。

取得データと実船搭載船のログブック、国土交通省港湾局が公開している全国港湾海洋波浪情報網を併用して操船支援システムの整合性を検証した。

3.2.1 実船搭載船

実船搭載船は「ながら」、「なとり」の2隻を計画していたが、コロナの影響により、「なとり」が運航していなかったため、機器設置は「ながら」のみとなった。「ながら」以下、本船の外観を図 3-15 に、諸元を表 3-3 に示す。



図 3-15 内航コンテナ船「ながら」

表 3-3 ながら諸元

全長	136.3 m
全幅	21.0 m
喫水	6.0 m
総トン数	7432 ton
最大積載量	670 TEU

「なとり」が運航していないため、動揺計 MG200CM を「ながら」の実船搭載機へ接続し計測することにした。

MG100CS、MG200CM を同時に接続するように変更したシステム構成を図 3-16 に示す。

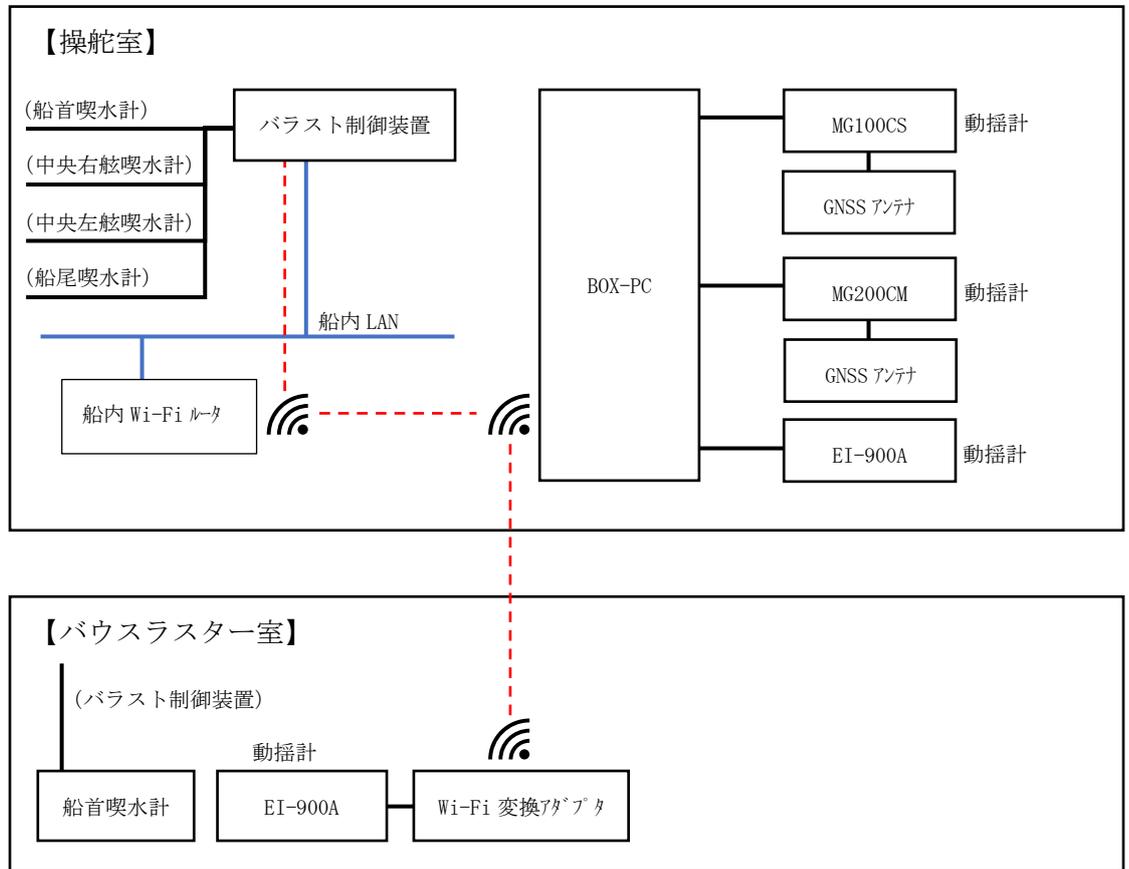


図 3-16 システム構成図 (変更 1 回目)

3.2.2 調査訪船

8月に調査訪船を行い、設置場所や設置スペース、電源有無を確認し、設置環境に問題ないことを確認した。

3.2.3 機器設置

計画よりかなり遅れることになったが、12月に実船搭載が可能となった。操舵室のバラスト制御装置（図 3-18）の盤内（図 3-17）にBOX-PC、動揺計（図 3-19 から図 3-21）を設置し、船内LANにWi-Fiで接続した。Wi-Fi 経由でのバラスト制御装置との通信は問題なく行うことが出来た。

■操舵室

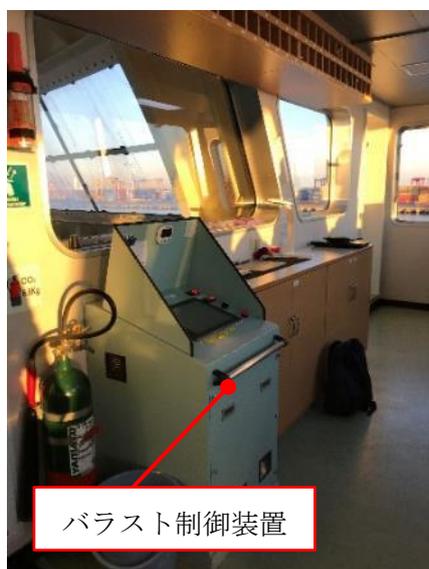


図 3-18 バラスト制御装置



図 3-17 バラスト制御装置盤内

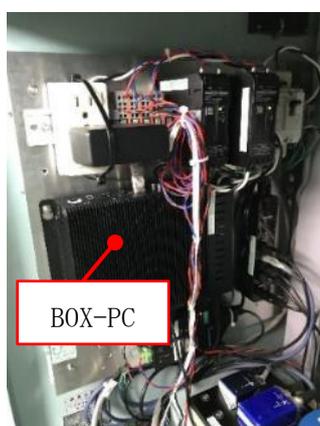


図 3-19 BOX-PC



図 3-20 動揺計



図 3-21 動揺計

船首喫水計（図 3-23）付近に動揺計と Wi-Fi 変換アダプタ（図 3-22）を設置し、操舵室にある BOX-PC と接続を試みたが、アクセスすることが出来なかった。持参したノート PC でネットワークの状況を確認したが、Wi-Fi で船内 LAN には接続できるが、操舵室にある BOX-PC には接続できない状況であった。（Wi-Fi 経由のネットワークに制限がかけられているように見えた）

■ バウスラスタ室



図 3-23 船首喫水計



図 3-22 動揺計と Wi-Fi 変換アダプタ

接続できる方法はないか船内を調べたところ、同じフロアの休憩室（図 3-24）に未使用の有線 LAN ポートがあることが判明した。本船の許可を得て、持参していたノート PC を設置（図 3-25）し接続を試みた。

■ 休憩室



図 3-24 休憩室



図 3-25 休憩室設置場所

有線 LAN ポート (図 3-26) にノート PC (図 3-27) を接続したところ、動揺計と通信できることが分かった。そのため急遽、構成を変更し、船首喫水計付近の動揺計は休憩室に設置したノート PC に接続し、ノート PC でロギングすることとした。ノート PC は BOX-PC に時刻同期させ、ロギングした時刻が極力合うようにした。

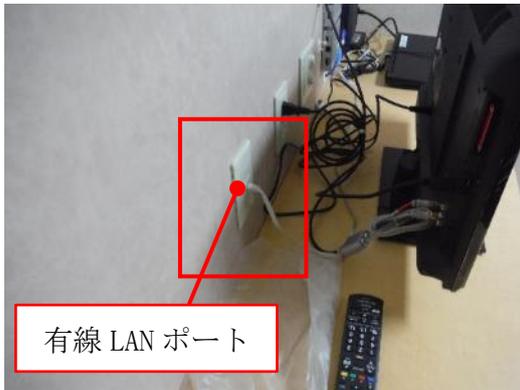


図 3-26 休憩室有線 LAN



図 3-27 休憩室設置ノート PC

休憩室にノート PC を設置するように変更したシステム構成を図 3-28 に示す。

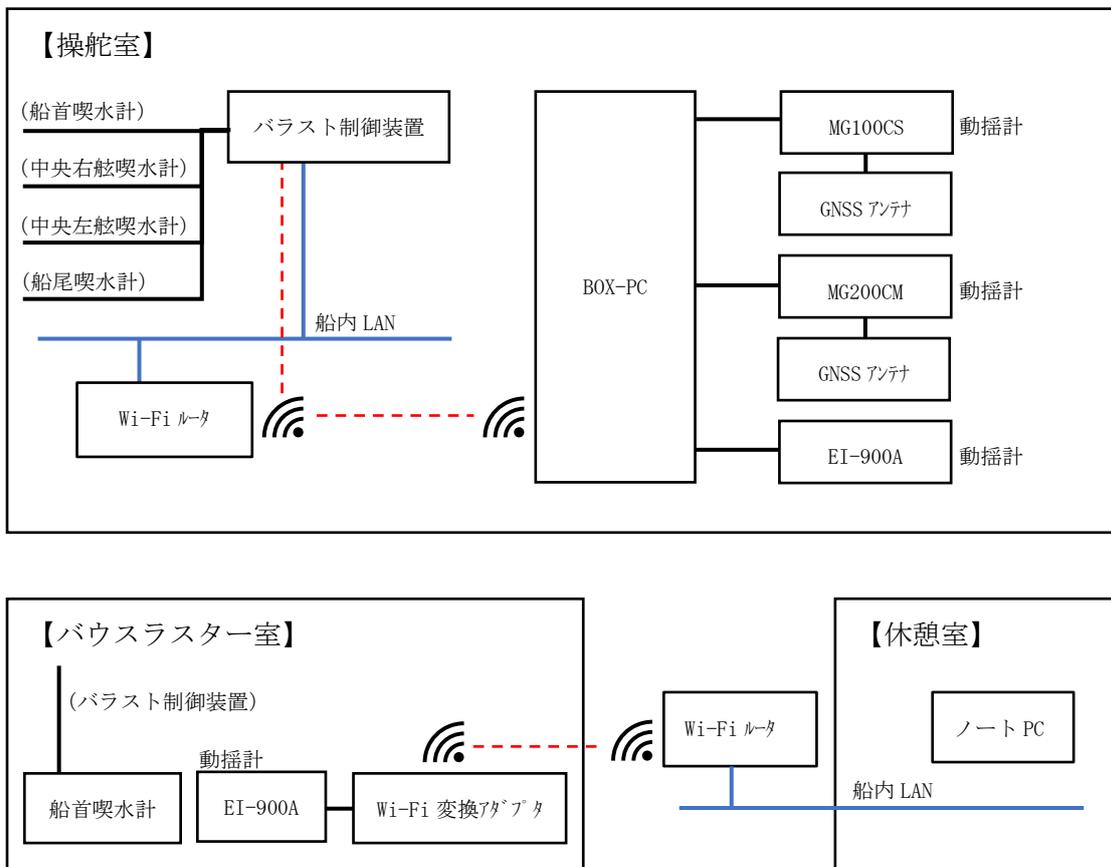


図 3-28 システム構成図 (変更 2 回目)

3.2.4 計測データの取得

1) 初回計測データの取得

機器設置後、1回目のデータ取得のため訪船し、ロギングの状況を確認した。休憩室に設置したノート PC を確認したところロギングが出来ていなかった。ネットワークの状況を確認したところ、ノート PC と動揺計が導通しておらず、両機器の再起動等を試みたが導通しなかった。この状況は想定していたため、動揺計は操舵室に設置したものを使用することとした。操舵室に設置した BOX-PC は4点喫水値、動揺計3台、GNSS アンテナの情報はロギングできていることを確認した。

船首喫水計付近に設置した動揺計は使用しないように変更したシステム構成を図 3-29 に示す。

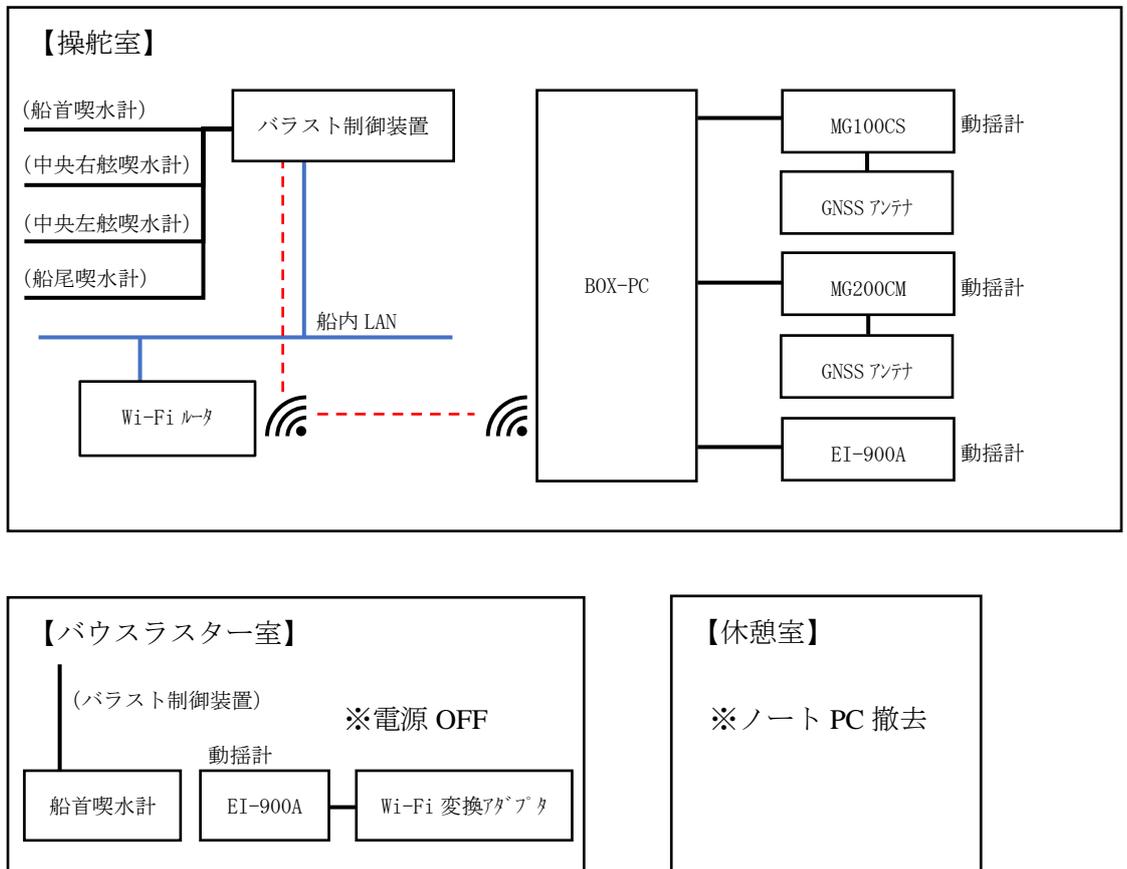


図 3-29 システム構成図 (変更 3 回目)

2) 2回目以降のロギングデータの取得

2回目以降は変更したシステム構成で正常にロギングを行うことが確認出来た。

3.2.5 計測データの検証

1) GNSS 計測値の確認

GNSS アンテナが計測した位置情報は正常に記録されていた。受信環境による影響が稀に受信不能となる時間帯があったが、時間の経過により自動的に復帰し、位置情報の記録は継続して取得することが出来た。これにより GPS 波浪計との比較が問題なく行えることが確認できた。

2) 動揺計計測値の確認

各動揺計が計測した値の確認を行った。2020年12月8日～2021年3月9日間のデータから比較した。横揺角の結果を図 3-30、縦揺れ角の結果を図 3-31 に示す。

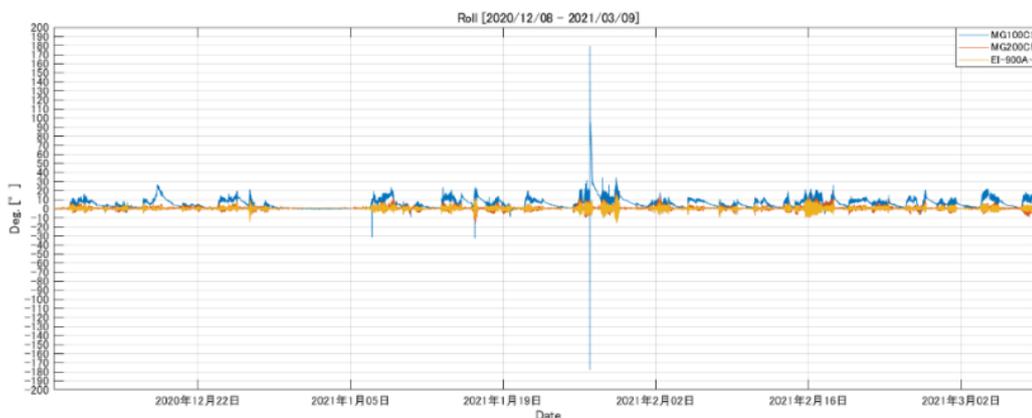


図 3-30 横揺れ角

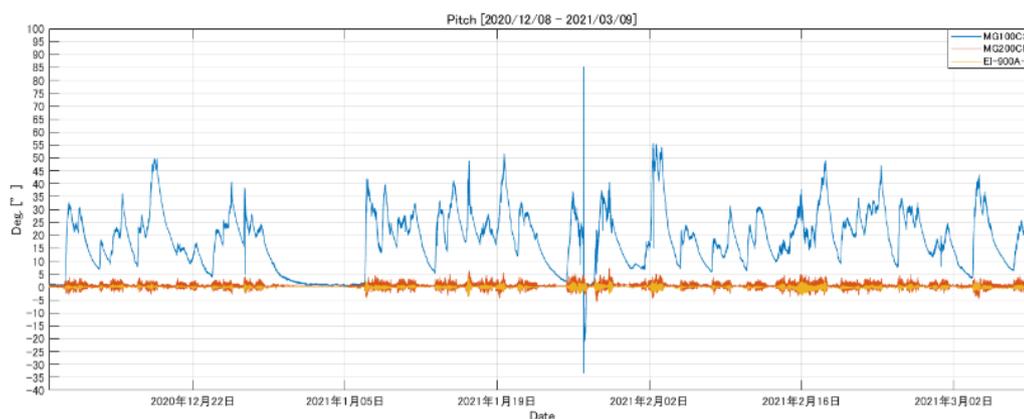


図 3-31 縦揺れ角

EI-900A、MG200CM は安定した計測ができているが、MG100CS は異常な値を示した。メーカーへ問い合わせを行ったが、動揺計自体に異常は無く、姿勢角は船舶向けに調整が必要との回答であった。上記の結果により、MG100CS はデータ解析では使用しないこととした。データの解析は将来的な製品化を見据え、当社の EI-900A を使用し、今後の実船搭載の中で EI-900A

にトラブルがあった場合に MG200CM をバックアップとして使用することにした。動揺計 EI-900A に問題ないことが確認できたため、波浪推定に必要な姿勢角の取得に問題ないことが確認できた。

3) 喫水計のデータの確認

バラスト制御装置から取得した喫水計の値を確認した。値を確認したところ、一定の時間同じ値が記録されていた。その時に取得した計測値を図 3-32 に示す。バラスト制御装置の設定を確認したところ喫水値に対して移動平均処理が行われていることが判明した。

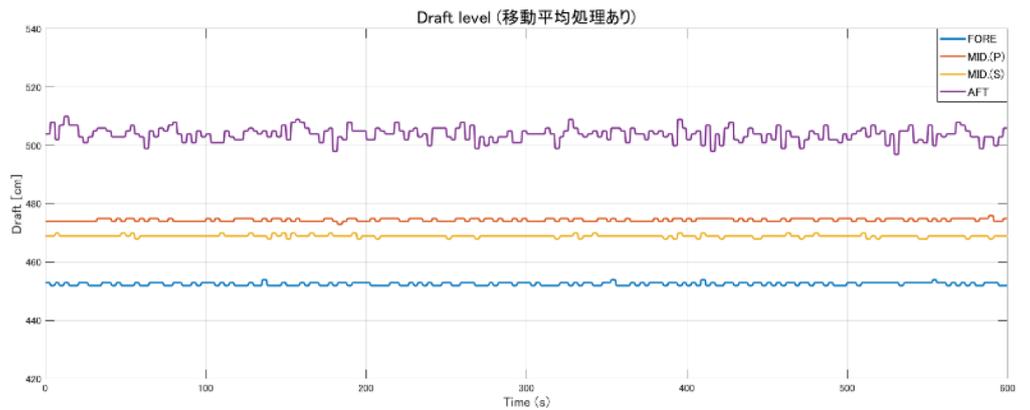


図 3-32 喫水値移動平均処理あり

波浪の推定で必要とする喫水値は移動平均ではなく、生値が必要であるため、喫水値の取得方法を見直した。バラスト制御装置は既設の装置であるため、本船の業務に影響がないようバラスト制御装置に変更は加えず、通信仕様に生値を取得する方法が存在したため、BOX-PC のソフトウェアを変更することにより取得することが出来た。ソフトウェア変更後の計測値を図 3-33 に示す。

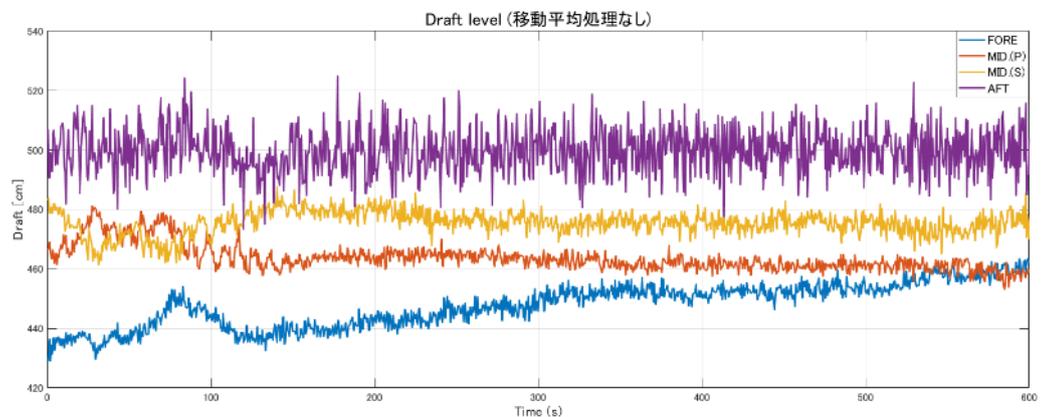


図 3-33 喫水値移動平均処理なし

ソフトウェア変更後、喫水計の生値が取得可能となった為、波浪推定に必要な喫水値の取得に問題ないことが確認できた。

3.2.6 実践搭載の成果

実船搭載は本船のネットワーク状況を確認しながら、システム構成を柔軟に変更して計測環境を整えることができた。ソフトウェアはバラスト制御装置側から取得した喫水値に移動平均処理が施されていることが判明し、通信処理を変更し生値を取得できるように改良した。試作機のデータ、本船のログブックを定期的に訪船し取得した。また国土交通省港湾局が公開している全国港湾海洋波浪情報網から対象日の波浪情報を取得し、検証に必要なデータを揃えることができた。

3.3 試験機の評価試験

3.2 で取得したデータを使用し、波高計測システムで使用する計測機器性能、波高計測値の整合性を検証した。

3.3.1 検証概要

検証の対象としたデータ期間は実船搭載機器を設置し、各計測値の値が正常であることが確認できた2021年5月29日～2021年6月25日とした。その間、実船搭載船「ながら」の航路（図 3-34）は東京から博多であった。

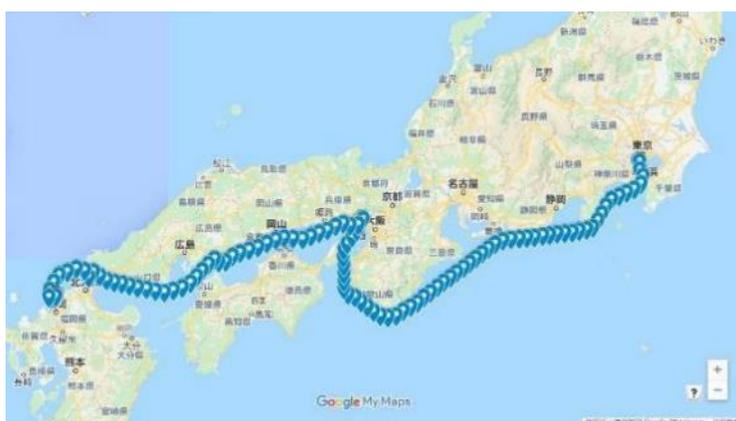


図 3-34 実船搭載船「ながら」航路

その航路で沖に設置されたナウファスの GPS 波浪計（図 3-35）は「静岡御前崎沖」と「伊勢湾口沖」であるため、その2点を比較対象とした。GPS 波浪計の位置情報を表 3-4 に示す。



図 3-35 GPS 波浪計位置

表 3-4 GPS 波浪計位置情報

GPS 波浪計	緯度	経度
静岡御前崎沖	34.4033333	138.275
伊勢湾口沖	34.3744444	137.1247222

3.3.2 波浪推定の入力データ

波浪推定に使用する入力データを表 3-5 に示す。

表 3-5 波浪推定の入力データ

機器	項目(単位)	備考
動揺計	加速度 X 軸 (deg/s)	前後加速度
動揺計	加速度 Y 軸 (deg/s)	左右加速度
動揺計	加速度 Z 軸 (deg/s)	上下加速度
動揺計	角速度 X 軸 (deg/s)	横揺れ角速度
動揺計	角速度 Y 軸 (deg/s)	縦揺れ角速度
喫水計	船首喫水値 (cm)	
喫水計	中央右舷喫水値 (cm)	
喫水計	中央左舷喫水値 (cm)	
喫水計	船尾喫水値 (cm)	
-	動揺計位置座標 (x, y)	事前に調べて入力する
-	船首喫水計位置座標 (x, y)	事前に調べて入力する

GPS 波浪計との比較用に位置情報を取得する。入力データを表 3-6 に示す。

表 3-6 位置情報取得

機器	項目		備考
GNSS アンテナ	緯度		
GNSS アンテナ	経度		

3.3.3 検証手法

1) 喫水計データ取得

船首喫水値、中央右舷喫水値、中央左舷喫水値、船尾喫水値を取得する。
喫水値は移動平均せず生値を使用する。

2) 喫水計位置における上下加速度の算出する

喫水計設置位置における上下加速度 z_p は、動揺計の設置位置における上下加速度 z_0 、縦揺れ角の角加速度 $\ddot{\theta}$ および横揺れ角の角加速度 $\ddot{\phi}$ を用いて、次の(1)式に基づいて算出できる。

$$\ddot{z}_p = \ddot{z}_0 + (x_0 - x_p)\ddot{\theta} - (y_0 - y_p)\ddot{\phi} \quad (1)$$

ここで、 x_p および y_p は喫水計設置位置の座標であり、 x_0 および y_0 は動揺計設置位置の座標である。なお、縦揺れ角の角加速度 $\ddot{\theta}$ および横揺れ角の角加速度 $\ddot{\phi}$ は、それぞれの角速度の差分演算により算出した。

3) 喫水計設置位置における上下変位を算出する

上下加速度 \ddot{z} を2回積分することによって、上下変位 z が算出できる。ここでは、井関と大津²⁾で用いられたIIRデジタルフィルタによる積分法を採用した。IIRデジタルフィルタとは、加速度から上下変位を求めるための積分法である。

変位を求めるための具体的な式は次の(2)式である。

$$z(n) = 2Az(n-1) - A^2z(n-2) + \left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 B\{\ddot{z}(n) + 2\ddot{z}(n-1) + \ddot{z}(n-2)\} \quad (2)$$

ただし、 n は時刻であり、 Δ は時間間隔であり、 A および B は次の式で与えられる。

$$A = \frac{1 - \lambda\Delta/2}{1 + \lambda\Delta/2} \quad (3)$$

$$B = \left(1 + \lambda\frac{\Delta}{2}\right)^{-2} \quad (4)$$

ここで、 λ はフィルタの時定数であり、今回の解析では0.5とした。

4) 喫水計位置における絶対水位変動を算出する

喫水計設置位置における上下加速度の時系列から平均喫水を除いて相対水位変動を算出し、喫水計設置位置における上下変位を引くことにより、絶対水位変動を求めることができる。

5) クロススペクトル解析により波高、波向き、平均周期を算出する

絶対水位変動の時系列に対して、時系列間の位相関係を周波数領域として求めるクロススペクトル解析³⁾を行えば、高石の方法⁴⁾により波高、波向きおよび平均波周期を求めることができる。

3.3.4 検証結果 1

以下に5月30日-31日の航海の検証結果を示す。

図 3-36 は航跡であり、実船搭載船は京浜港（横浜港本牧ふ頭）を出港し阪神港（神戸港ポートアイランド）に入港している。図中には、5分ごとの緯度・経度のほかに、ナウファスの静岡御前崎沖および伊勢湾口の GPS 波浪計の設置場所も示した。この図から実船搭載船は、11時40分から12時40分にかけて静岡御前崎沖のGPS波浪計の約5マイル北側を航過し、16時から16時30分にかけて伊勢湾口のGPS波浪計の約10マイル南側を航過していることがわかる。

これらの時間帯におけるGPS波浪計による観測結果を表 3-7 にまとめて示す。実船搭載船が航過した時間帯における平均は、静岡御前崎沖において有義波高約1.9m、有義波周期約5.3秒および波向きSWであり、伊勢湾口において有義波高約0.72m、有義波周期約7.0秒および波向きSであった。解析結果の精度はこれらの値との比較に基づいて行う。

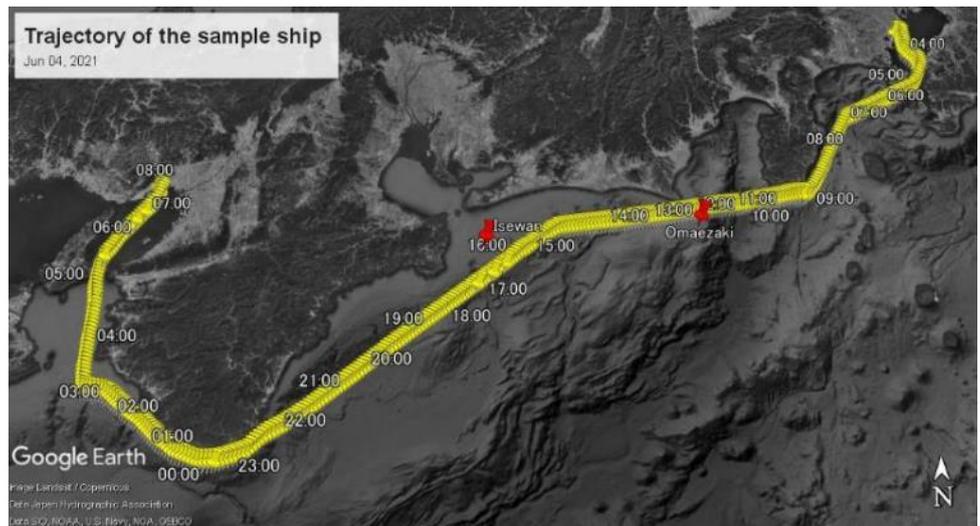


図 3-36 実船搭載船の航跡

表 3-7 GPS 波浪計による観測結果

静岡御前崎沖				伊勢湾口			
時刻	有義波高	有義波周期	波向き	時刻	有義波高	有義波周期	波向き
11:40	1.92 m	5.3 秒	SW	16:00	0.74 m	6.9 秒	S
12:00	1.90 m	5.2 秒	SW	16:20	0.69 m	7.1 秒	S
12:20	1.82 m	5.3 秒	SW				
12:40	2.01 m	5.4 秒	SW				

図 3-37 から図 3-39 に喫水計のデータを用いて推定した有義波高、有義波周期および波向きをそれぞれ示す。これらの結果は 5 分ごとの時系列に対して解析を行った結果である。図は横軸に計測開始時刻を示している。有義波高に関しては湾内においては波高が小さく本州南岸を航海する際に 1m から 2m 程度の推定結果が得られている。有義波周期に関しては、湾内や変針操船を頻繁に行っている紀伊半島周辺以降において数値に若干のばらつきが見られるが、5秒から 6秒程度の推定結果が得られている。波向きに関しては、有義波周期の結果と同様に湾内や変針操船を頻繁に行っている紀伊半島周辺以降において数値に若干のばらつきが見られるが、WSW から S の推定結果が得られている。これらの図から、本州南岸沖を航海している際のように、頻繁な変針操船を行っていないような状況下で得られた時系列を用いる限りにおいては、概ね安定した推定が実現できていると考えられる。

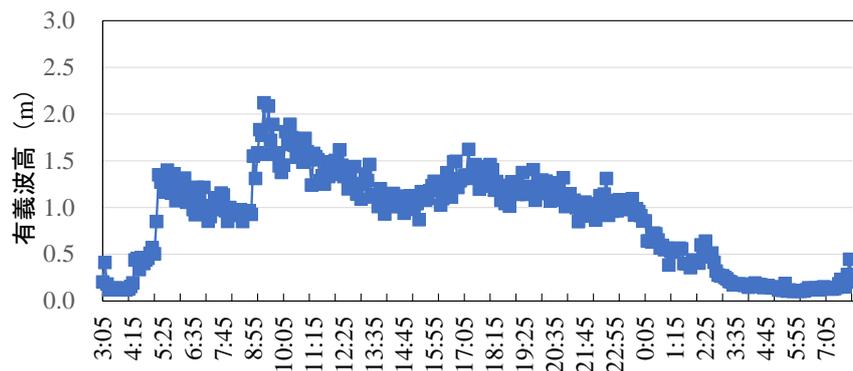


図 3-37 推定した有義波高

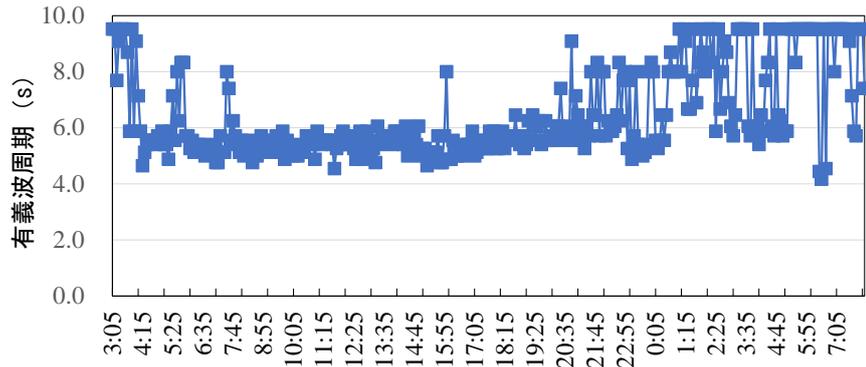


図 3-38 推定した有義波周期

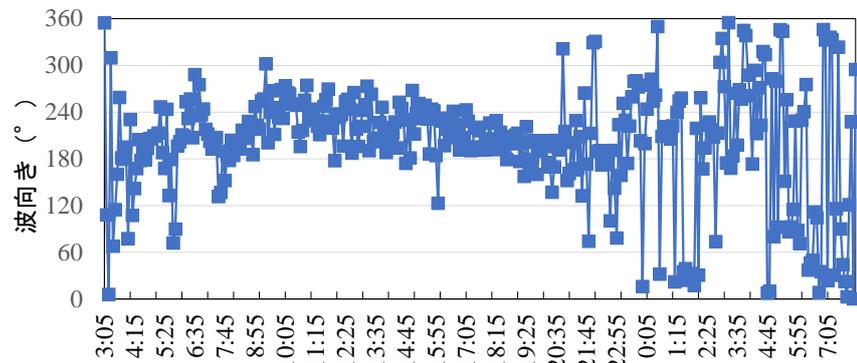


図 3-39 推定した波向き

推定結果を定量的に検討するために、静岡御前崎沖および伊勢湾口の GPS 波浪計の近辺を航海していた際の推定結果の平均値を表 3-8 にまとめて示す。表 3-7 に示した GPS 波浪計の結果と比較して、静岡御前崎沖の結果に関しては有義波高が 20%程度小さいものの有義波周期および波向きはよく一致している。静岡御前崎沖の結果における有義波高の相違に関しては、実船搭載船が GPS 波浪計よりも北を航行していることから有義波高を若干小さく推定している可能性がある。ただし、提案する方法が移動しながらデータの計測を行う、換言すると、出会う波浪の特性が場所によって異なるのに対して、GPS 波浪計は定点観測であるという点にも留意しておく必要がある。伊勢湾口の結果に関しては有義波高が若干大きく有義波周期が若干小さく波向きが 30 度程度異なっている。伊勢湾口の結果で乖離が見られるのは GPS 波浪計の設置位置と実船搭載船が航行した海域が 10 マイル程度離れていることが一因として考えられる。すなわち、実船搭載船が GPS 波浪計よりも南を航行していることから有義波高を大きく推定している可能性がある。

表 3-8 推定結果の平均値

静岡御前崎沖				伊勢湾口			
時刻	有義波高	有義波周期	波向き	時刻	有義波高	有義波周期	波向き
12:00 ～ 12:10	1.52 m	5.7 秒	221° SW	16:10 ～ 16:20	1.15 m	5.2 秒	219° SW

参考までに気象庁の沿岸波浪図（JST0900 および JST2100）⁵⁾を 図 3-40 および 図 3-41 に示しておく。沿岸波浪図は日本時間9時(JST0900)と21時(JST2100)の波浪情報が公開されている。これによれば、JST0900 から JST2100 にかけては波が減衰する方向にあることがわかる。また、波の等高線を見ると概ね今回の推定結果はこれらの値とよく一致していることがわかる。

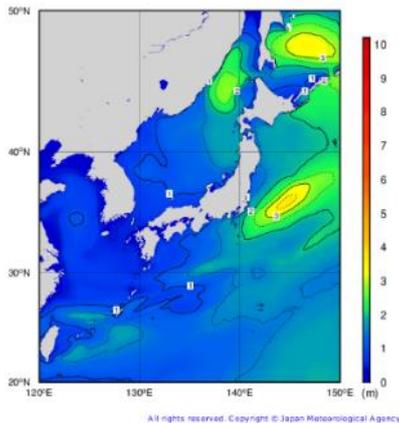


図 3-40 気象庁沿岸波浪図 (JST0900)

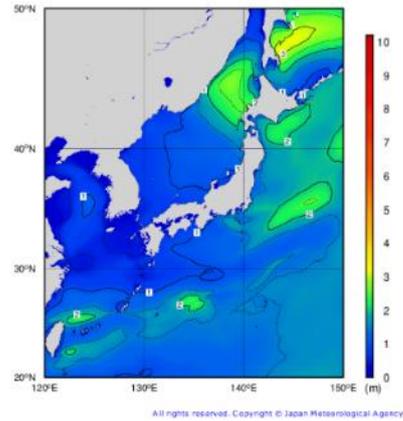


図 3-41 気象庁沿岸波浪図 (JST2100)

3.3.5 検証結果2

「3.3.4 検証結果1」の手法を用いて、静岡御前崎沖、伊勢湾口沖のGPS波浪計に最も接近した点の有義波高、有義波周期、波向きの比較を行った。比較するにあたって、GPS波浪計と実船搭載船の位置を表3-9と表3-10に纏めた。GPS波浪計に対して陸側を通過した場合、マイナス符号としている。

表 3-9 静岡御前崎沖

日付	時刻	GPS 波浪計との距離
6月4日	9:20	-4,921 m
6月7日	11:40	-10,181 m
6月12日	6:40	4,738 m
6月13日	11:40	-8,343 m
6月20日	10:40	-10,511 m
6月25日	10:40	-3,634 m

表 3-10 伊勢湾口沖

日付	時刻	GPS 波浪計との距離
6月4日	5:40	30,207 m
6月7日	16:20	13,764 m
6月12日	3:20	32,981 m
6月13日	16:00	12,931 m
6月20日	15:00	18,002 m
6月25日	6:40	16,034 m

1) 有義波高(m)比較

表 3-11 に静岡御前崎沖、表 3-12 に伊勢湾口沖の GPS 波浪計と推定結果の有義波高比較を示す。

表 3-11 静岡御前崎沖 有義波高

日付	時刻	GPS 波浪計 有義波高	推定結果 有義波高	GPS 波浪計との 差
6月4日	9:20	3.21 m	2.65 m	-17%
6月7日	11:40	1.18 m	1.47 m	25%
6月12日	6:40	1.02 m	1.29 m	26%
6月13日	11:40	0.8 m	0.73 m	-9%
6月20日	10:40	1.8 m	2.05 m	14%
6月25日	10:40	0.86 m	1.1 m	28%

表 3-12 伊勢湾口沖 有義波高

日付	時刻	GPS 波浪計 有義波高	推定結果 有義波高	GPS 波浪計との 差
6月4日	5:40	2.31 m	2.18	-6%
6月7日	16:20	1.19 m	1.55	30%
6月12日	3:20	1.05 m	1.13	8%
6月13日	16:00	0.57 m	0.55	-4%
6月20日	15:00	1.2 m	1.26	5%
6月25日	6:40	1.05 m	1.26	20%

表 3-11 静岡御前崎沖、表 3-12 伊勢湾口沖の観測点において GPS 波浪計との差が±30%以内に入る結果となった。有義波高の推定においては良好な結果を得ることが出来た。

2) 有義波周期(s)

表 3-13 に静岡御前崎沖、表 3-14 に伊勢湾口沖の GPS 波浪計と推定結果の有義波周期比較を示す。

表 3-13 静岡御前崎沖 有義波周期

日付	時刻	GPS 波浪計 有義波周期	推定結果 有義波周期	GPS 波浪計との 差
6月4日	9:20	7.4 秒	6.9 秒	-7%
6月7日	11:40	7.7 秒	5.1 秒	-34%
6月12日	6:40	6.0 秒	6.3 秒	5%
6月13日	11:40	7.5 秒	8.3 秒	11%
6月20日	10:40	6.4 秒	6.1 秒	-5%
6月25日	10:40	7.2 秒	7.1 秒	-1%

表 3-14 伊勢湾口沖 有義波周期

日付	時刻	GPS 波浪計 有義波周期	推定結果 有義波周期	GPS 波浪計との 差
6月4日	5:40	8.0 秒	6.3 秒	-21%
6月7日	16:20	8.0 秒	5.3 秒	-34%
6月12日	3:20	5.9 秒	6.5 秒	10%
6月13日	16:00	6.7 秒	8.7 秒	30%
6月20日	15:00	6.5 秒	4.8 秒	-26%
6月25日	6:40	6.8 秒	6.1 秒	-10%

表 3-13 と表 3-14 の結果から大きな乖離は見られない良好な結果と言える。

3) 波の向き

表 3-15 に静岡御前崎沖、表 3-16 に伊勢湾口沖の GPS 波浪計と推定結果の波向きの比較を示す。

表 3-15 静岡御前崎沖 波の向き

日付	時刻	GPS 波浪計 波向き	推定結果 波向き	GPS 波浪計との差 45° 以内：○
6月4日	9:20	SE	SSE	○
6月7日	11:40	ESE	WSW	×
6月12日	6:40	SE	E	○
6月13日	11:40	SE	SSE	○
6月20日	10:40	SW	SW	○
6月25日	10:40	SSW	NNW	×

表 3-16 伊勢湾口沖 波の向き

日付	時刻	GPS 波浪計 波向き	推定結果 波向き	GPS 波浪計との差 45° 以内：○
6月4日	5:40	SE	SE	○
6月7日	16:20	ESE	SW	×
6月12日	3:20	SE	SE	○
6月13日	16:00	****	SE	比較不能
6月20日	15:00	****	WSW	比較不能
6月25日	6:40	S	SE	○

「****」は GPS 波浪計の欠測値を示す。

波向きは GPS 波浪計と比較し、45° 以内を良好な結果とした。また GPS 波浪計の値は欠測値が見られた。表 3-15 と表 3-16 の結果から悪くない結果と言えるが一致しない点、欠測値により比較できない点が存在するため、波向きについては検証を重ねる必要がある。

3.3.6 検証結果3

GPS 波浪計との比較において良好である結果が得られたが、波浪推定の確かさを補強するために気象庁が公開している沿岸波浪実況図との比較を行った。気象庁の沿岸波浪実況図⁵⁾は9:00(JST)と21:00(JST)の波浪を公開している。同時刻の実船搭載船「ながら」の推定波浪と比較した。沿岸波浪実況図の観測地点を図3-42と表3-17に示す。

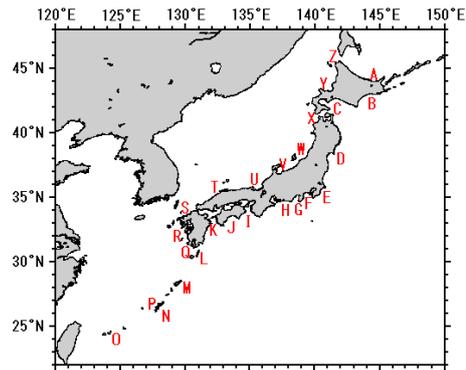


図 3-42 沿岸代表点

表 3-17 沿岸代表点の一覧表

記号	場所	北緯	東経	記号	場所	北緯	東経
A	網走沖	44° 15′	144° 30′	N	沖縄島沖	26° 00′	128° 00′
B	釧路沖	42° 30′	144° 10′	O	石垣島沖	24° 30′	124° 35′
C	津軽海峡	41° 40′	141° 40′	P	沖縄島沖	26° 40′	127° 30′
D	金華山沖	38° 10′	141° 50′	Q	薩摩半島沖	31° 00′	130° 15′
E	房総半島沖	35° 20′	140° 45′	R	天草灘	32° 30′	129° 20′
F	相模湾	34° 50′	139° 30′	S	玄界灘	34° 15′	130° 00′
G	伊豆半島沖	34° 20′	138° 50′	T	島根半島沖	35° 45′	132° 45′
H	遠州灘	34° 20′	137° 30′	U	若狭湾	35° 45′	135° 35′
I	紀伊水道	33° 40′	134° 50′	V	富山湾	37° 30′	138° 00′
J	土佐湾	33° 10′	133° 30′	W	酒田沖	39° 00′	139° 00′
K	豊後水道	32° 50′	132° 15′	X	津軽海峡	41° 10′	139° 50′
L	種子島東方沖	30° 30′	131° 30′	Y	石狩湾	43° 40′	140° 45′
M	奄美大島沖	28° 05′	129° 45′	Z	宗谷海峡	45° 45′	141° 30′

1) 6月7日午前9:00の波浪推定結果

6月7日午前9:00頃、実船搭載船「ながら」は東京湾から神戸港へ向かう途中、伊豆半島沖（図 3-43）を航行していた。

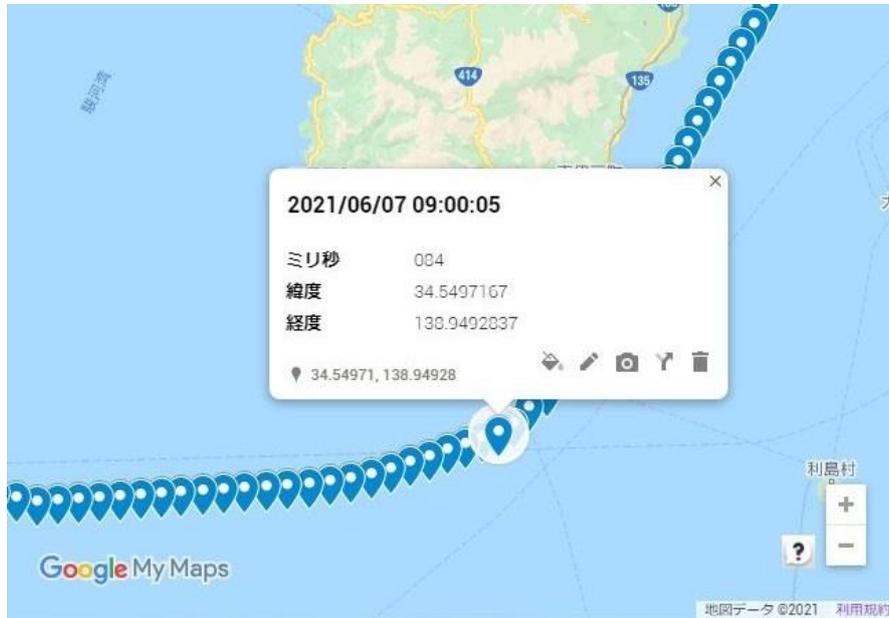


図 3-43 6月7日午前9:00航路

6月7日午前9時前後10分間、5分間隔の波浪推定結果を表 3-18 に示す。

表 3-18 波浪推定結果

時刻	有義波高(m)	有義波周期(s)	波向き(°)	波向き方針
8:50	1.22	5.3	219	SW
8:55	1.39	5.1	224	SW
9:00	1.40	5.7	221	SW
9:05	1.86	5.4	243	WSW
9:10	1.59	5.4	233	SW

2) 6月7日午前9:00の気象庁の沿岸波浪実況図

6月7日午前9:00の沿岸波浪実況図を図3-44に、沿岸代表点の波浪を表3-19に示す。

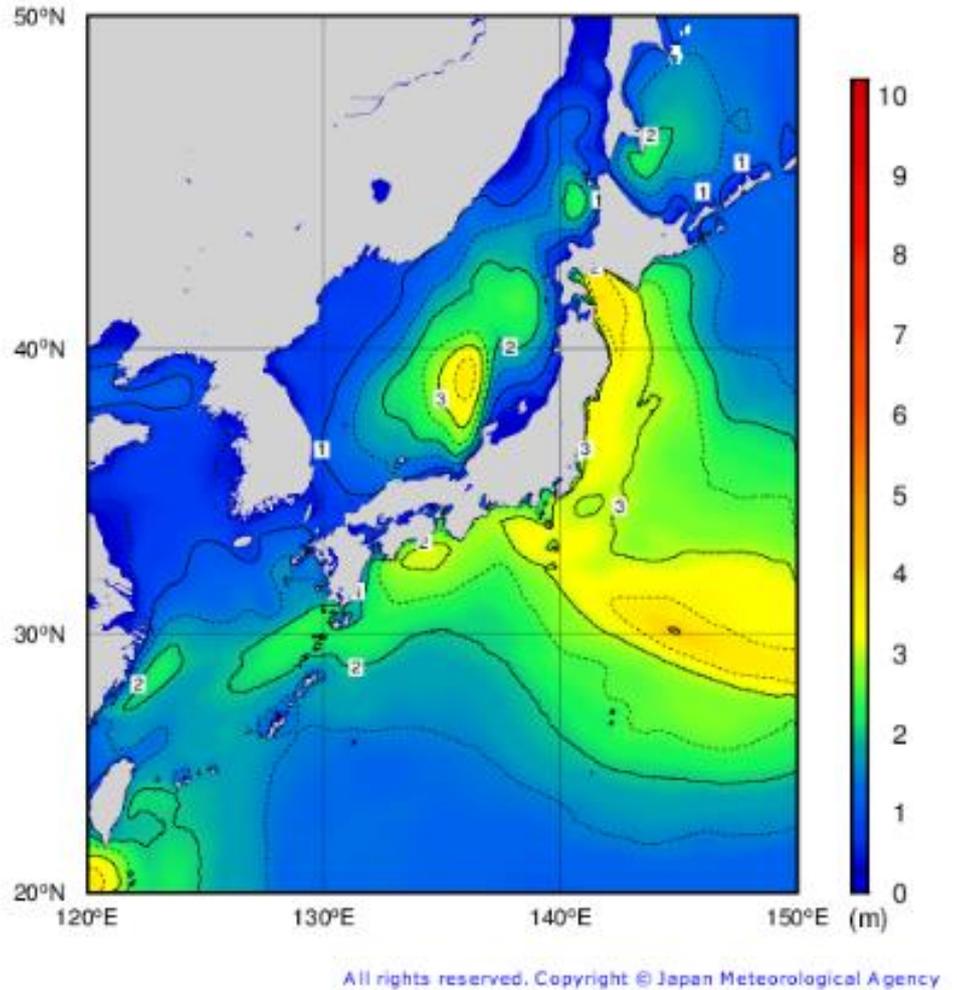


図 3-44 沿岸波浪実況図

表 3-19 沿岸代表点波浪実況

沿岸代表点	時刻	有義波高(m)	有義波周期(s)	波向き
G:伊豆半島沖	9:00	1.4	8	S

実船搭載船「ながら」は伊豆半島沖を航行中であり、気象庁波浪実況図の沿岸代表点「伊豆半島沖」の近くを通過している。沿岸代表点の波浪実況と比較し、有義波周期に乖離は見られるものの有義波高、波向きは良好な結果を示している。

3) 6月12日午前9:00の波浪推定結果

6月12日午前9:00頃、実船搭載船「ながら」は神戸港から東京湾へ向かう途中、伊豆半島沖（図 3-45）を航行していた。

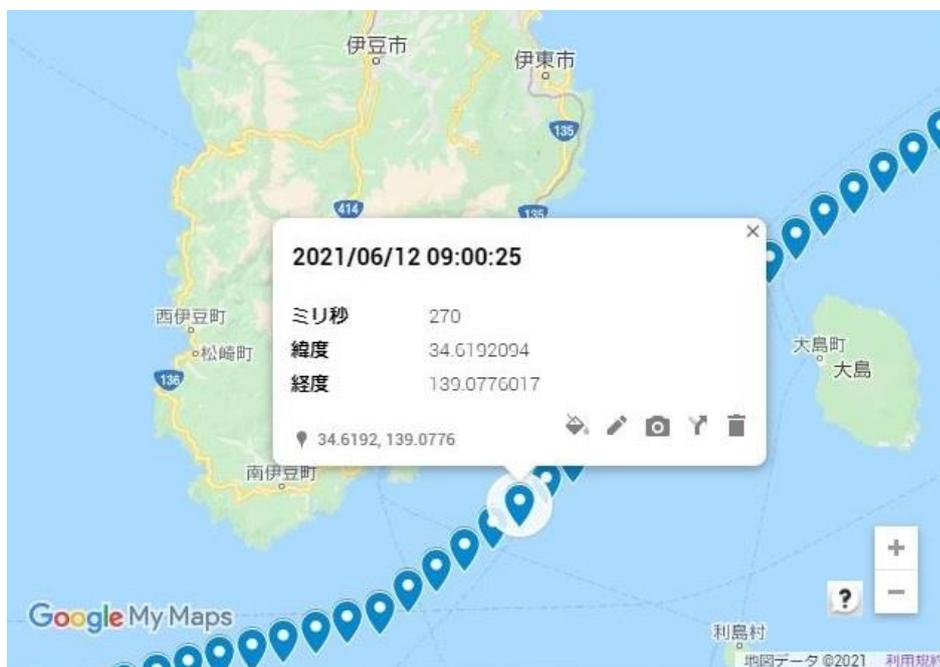


図 3-45 6月12日 JST9:00 航路

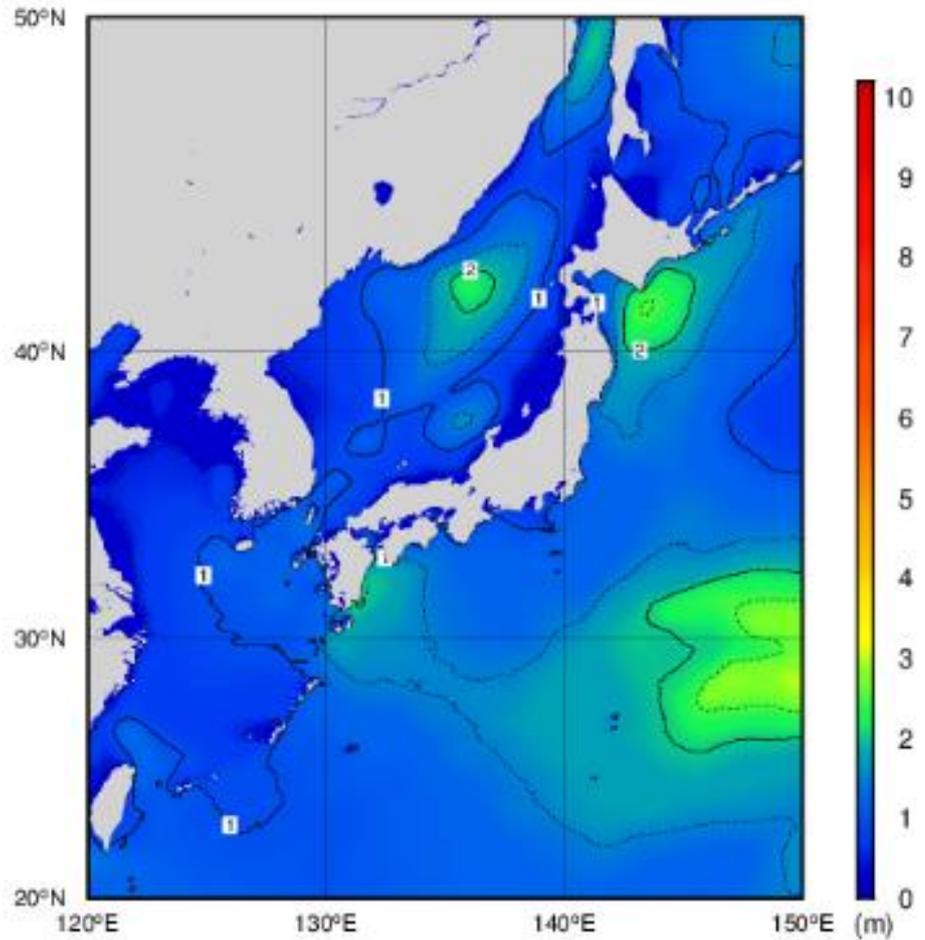
6月12日午前9時前後10分間、5分間隔の波浪推定結果を表 3-20 に示す。

表 3-20 波浪推定結果

時刻	有義波高(m)	有義波周期(s)	波向き(°)	波向き方位
8:50	0.84	6.3	95	E
8:55	0.93	6.3	133	SE
9:00	0.97	6.5	118	ESE
9:05	1.11	6.5	104	ESE
9:10	0.79	7.7	307	NW

4) 6月12日午前9:00の気象庁の沿岸波浪実況図

6月12日午前9:00の沿岸波浪実況図を図3-46に、沿岸代表点の波浪を表3-21に示す。



All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

図 3-46 沿岸波浪実況図

表 3-21 沿岸代表点波浪実況

沿岸代表点	時刻	有義波高(m)	有義波周期(s)	波向き
G:伊豆半島沖	9:00	0.8	7	ESE

実船搭載船「ながら」は伊豆半島沖を航行中であり、気象庁波浪実況図の沿岸代表点「伊豆半島沖」の近くを通過している。沿岸代表点の波浪実況と比較し、有義波高、有義波周期、波向きは良好な結果を示している。

3.3.7 試験機の評価試験の成果

実船搭載で取得したデータを使用し、波高計測システムで使用する計測機器性能、波高計測値の整合性を検証することができた。GPS 波浪計と比較できるポイントで計測した有義波高については、14回計測した平均値が、19.1%となり、±30%以内に収まっていることを確認した。また、有義周期についても、14回計測した平均値が、16.4%となり、こちらも±30%以内に収まっていることを確認した。波向きについても、11回計測し、9回が45°以内に収まっている（不一致率18.2%）ことを確認した。従って、今年度の目標を達成することができた。

3.4 報告書の作成

2020年度の実施内容に基づいて、報告書を作成した。

4 目標の達成状況

4.1 2020年度の目標に対する達成状況

GPS 波浪計との比較は良好な結果を得ることができ、GPS 波浪計との比較において±30%の範囲に収まる精度を達成することが出来た。気象庁の沿岸波浪実況図との比較も試みたが、こちらの結果も概ね一致する結果を得た。これらの結果から提案する手法により波浪の推定が可能であると言える。ただし推定した波向きについてはGPS 波浪計と大きく乖離しているデータも確認できた。この原因については2021年度の事業の中でデータの解析を進めて行く。

4.2 本事業の最終目標に対する達成状況

試験機を製作し、実船搭載の計測データが回収でき解析結果を得ることが出来た。解析結果は良好であり2021年度に予定している燃費改善効果の立証、安全指標、燃費改善指標の確立へ繋げることが出来る。6ヶ月の事業期間延長があった上ではあるが2020年度に計画した作業はすべて実施することが出来た。しかし、2020年度の6ヶ月の事業期間延長により2021年度の開始も既に遅れが生じている。またコロナ禍が続いており、2021年度も不透明な状況が続くと思われるが、2021年度も事業期間の延長を前提とすれば最終目標は達成出来る見込みである。

5 事業内容の実施概要

5.1 操船支援システムの試験機の設計／製作

設置場所や配線経路、ネットワーク状況の確認のため訪船調査を行い、設置場所はバラスト制御装置（宇津木計器納入）の盤内とし、盤内の空きスペース縦 500mm×横 400mm×高さ 200mm の大きさに収まるよう設計することができた。また動揺計 3 機種 of 動作精度も良好であり、喫水値、GNSS アンテナ、Wi-Fi 接続アダプタ等、接続機器類との接続も問題はなく、期待通りの試作機を設計、製作することができた。

5.2 試験機の実船搭載

実船搭載は本船のネットワーク状況を確認しながら、システム構成を柔軟に変更して計測環境を整えることができた。ソフトウェアはバラスト制御装置側から取得した喫水値に移動平均処理が施されていることが判明し、通信処理を変更し生値を取得できるように改良した。試作機のデータ、本船のログブックを定期的に訪船し取得した。また国土交通省港湾局が公開している全国港湾海洋波浪情報網から対象日の波浪情報を取得し、検証に必要なデータを揃えることができた。

5.3 試験機の評価試験

実船搭載で取得したデータを使用し、波高計測システムで使用する計測機器性能、波高計測値の整合性を検証することができた。GPS 波浪計と比較できるポイントで計測した有義波高については、14 回計測した平均値が、19.1% となり、±30% 以内に収まっていることを確認した。また、有義周期についても、14 回計測した平均値が、16.4% となり、こちらも±30% 以内に収まっていることを確認した。波向きについても、11 回計測し、9 回が 45° 以内に収まっている（不一致率 18.2%）ことを確認した。従って、今年度の目標を達成することができた。

5.4 報告書の作成

令和 2 年度の実施内容について、報告書を作成することができた。

6 今後の予定

2020 年度の活動の中で波浪の推定が良好であることが確認できた。2021 年度は推定した波浪データや機関データを用いて、燃費改善効果の立証、安全指標、燃費改善指標の確立がテーマとなる。引き続き実船搭載船からデータを回収しながら、各々の立証、検証を進めていく。システム構成も試験機から製品としての構成に変更を行っていく、現在の PC1 台の構成からサーバ機、クライアント機の構成に変更し、1 台のサーバ機に複数台のクライアント機が接続するサーバクライアント構成とし、サーバ機で収集・処理したデータをクライアント機でリアルタイムに表示可能とする。また波浪の推定については GPS 波浪計との比較を行ったが、GPS 波浪計設置位置付近を実船搭載船が航行しないと比

較できないなど制限があった。また気象も荒天との遭遇が少なかったため、荒天での検証を重ねていく必要がある。検証方法を見直しながら引き続き検証を重ねていく。

7 まとめ

2020年度は新型コロナウイルスの影響により、部材入荷の遅れや、実船搭載船の動静が不透明になるなど、計画が大幅に遅れることになった。特に部材入荷遅れの影響は大きく、試験機の製作が計画より5ヶ月遅れ、結果的に6ヶ月の事業期間の延長を行うことになった。その中で実船搭載を行いデータの収集、解析まで漕ぎつけることが出来た。解析したデータは良好な結果を得ることが出来たが、荒天との遭遇が少なかったため検証の回数を増やすことが必要であると感じた。しかし、計測方法の異なる気象庁の沿岸波浪図に対しても良好な結果であったため、波浪推定の確かさは確認することが出来たと言える。

第二部 令和3年度(2021年度)

8 事業の目標

8.1 本事業の最終目標

燃費改善指標により燃料消費量を航海平均で5%以上削減する。

9 2021年度の実施内容

9.1 燃費改善効果の立証

縦揺れのログデータから荒天予測を行い、荒天時と好天時の燃料消費量をシミュレーションにより比較した。

例えば、予測せずに荒天海域を航行した場合、波により縦揺れが大きくなる中、主機回転数は一定のまま航行して燃費が悪くなる。予め荒天予測ができれば縦揺れが大きくなる前に主機回転数を落とすことによりエネルギーロスを防止することが可能である。

燃費改善効果の立証は昨年度より実船搭載の協力を得ている井本商運株式会社が運航する内航コンテナ船「ながら」以下、本船の実海域データを使用した。

9.1.1 燃料改善シミュレーションソフトウェアの設計

大きな縦揺れの中、主機回転数を一定のまま航行した場合と、回転数を変動させた場合の燃料消費変化量を推定するシミュレーションソフトウェアの設計を行った。

回転数変動をした場合の燃料消費量は、主機回転数から回帰式を用いて算出する。そのために実船でロギングした2021年12月から2022年4月までの約5か月分のデータより回帰式を求めた。

尚、本船は通常運航に於いて主機110回転以上で航行しているため、ログデータより主機回転数110回転以上のデータを抜粋して算出することにした。

図9-1は縦揺れ角度をログデータより最適と判断した5段階に分けてモデル化したグラフである。縦揺れ角度と主機回転数、主機出力の相関図を図9-2に示し、黒丸は海上公試の時の計測結果である。

グラフでは主機回転数をM/E shaft Rev(X軸)、主機出力をEP(Y軸)、縦揺れ角度をPitchとして表記している。

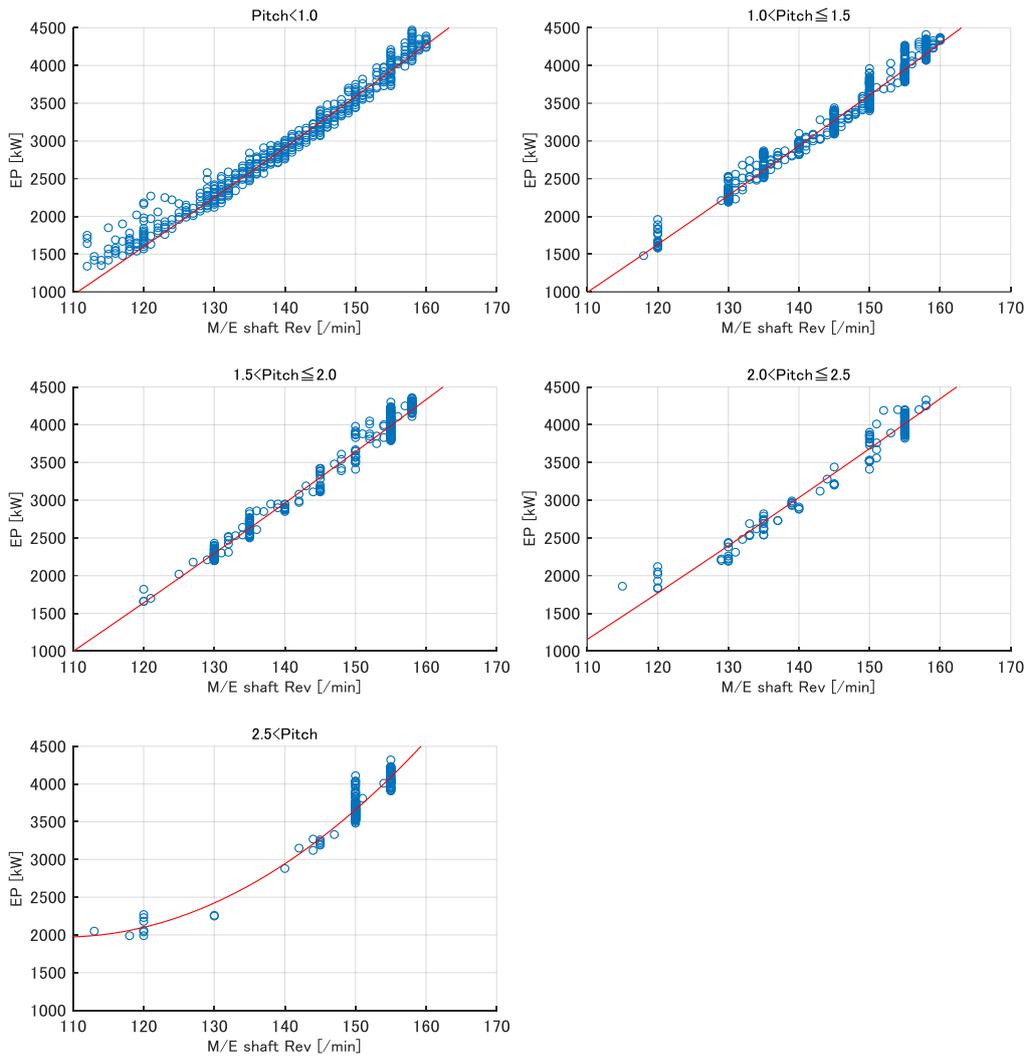


図 9-1 縦揺れ角ごとの回帰モデル

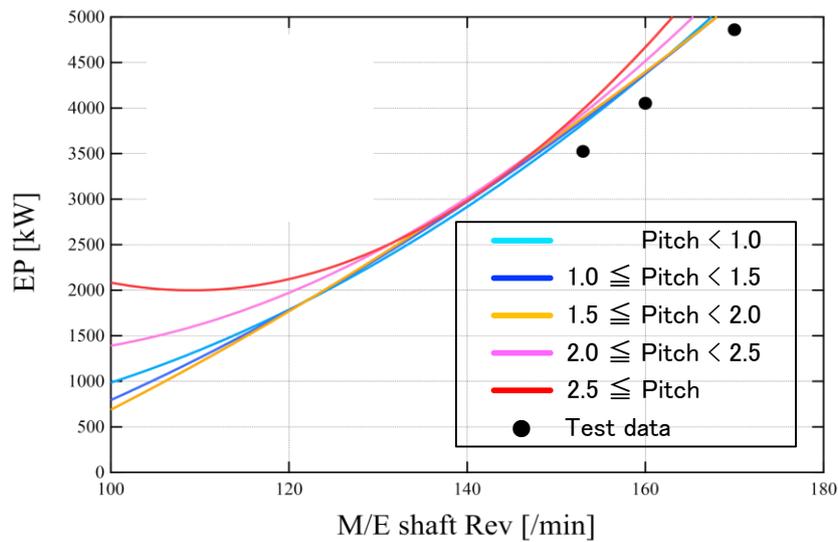


図 9-2 縦揺れ角度と主機回転数-出力の相関図

図 9-2 の 140 回転-出力 3000kW 付近に注目すると、回帰式に差が無く、判断が困難であることが分かり、縦揺れ角度ではなく縦揺れとの相関が強い縦揺れ加速度を使用して回帰式を求めた。

図 9-3 は縦揺れ加速度をログデータより最適と判断した 6 段階に分けてモデル化したグラフである。グラフでは縦揺れ加速度を Z として表記している。

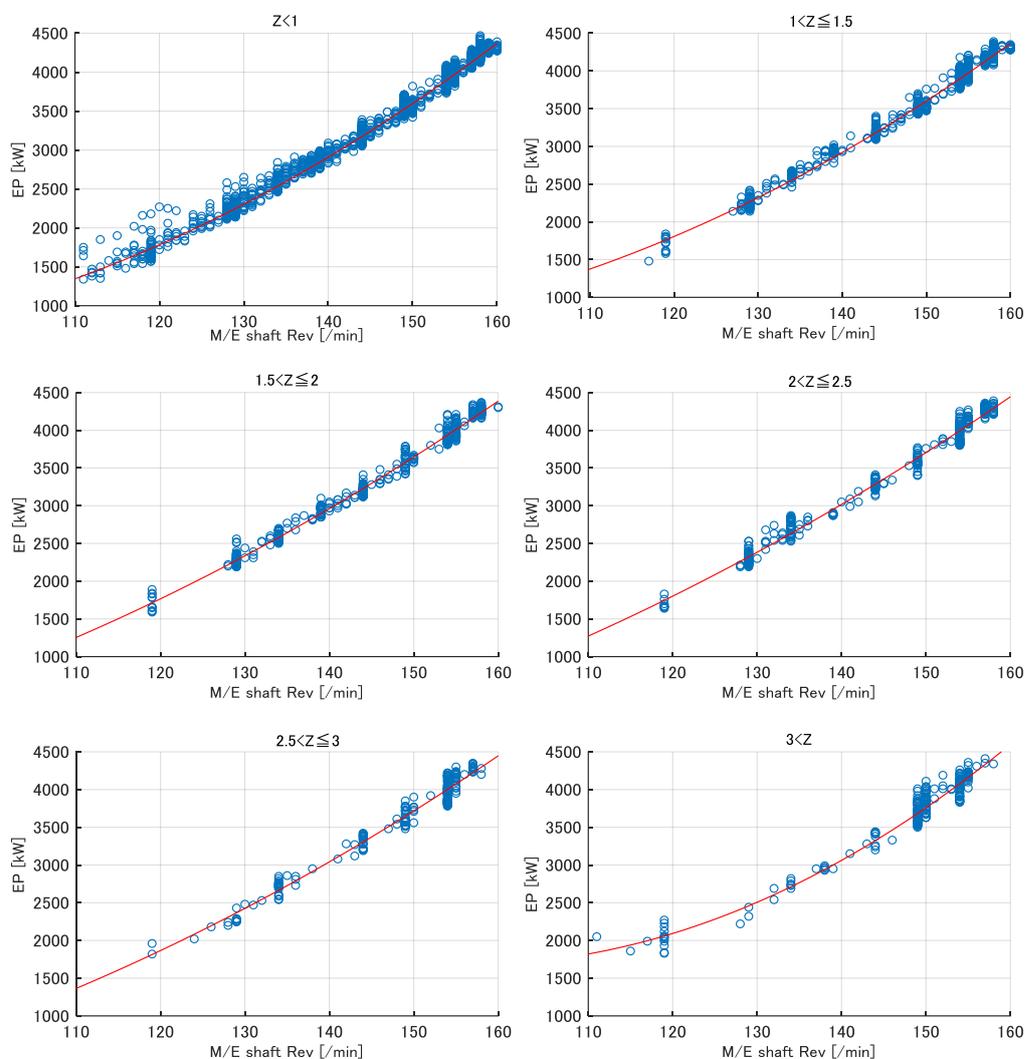


図 9-3 縦揺れ加速度ごとの回帰モデル

縦揺れ角度と主機回転数、主機出力の相関図を図 9-4 に示す。

縦揺れ加速度が大きいほど主機回転数に対し主機出力が大きくなっていることがわかる。

140 回転-出力 3000kW 付近に注目すると縦揺れ角度で判定するよりも回帰式に差があるため判定しやすいことが判明した。

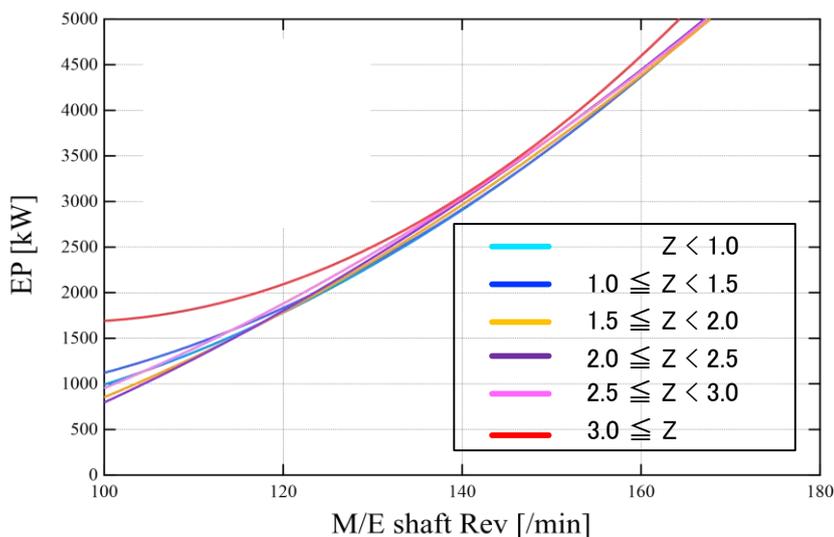


図 9-4 縦揺れ加速度と主機回転数-出力の相関図

これらのモデルは式 (1) ~ (6) の回帰式で表される。

$Z < 1.0$ の場合

$$y = 0.4198x^2 - 52.851x + 2079.2 \quad \dots (1)$$

$1.0 \leq Z < 1.5$ の場合

$$y = 0.4172x^2 - 52.844x + 2139.9 \quad \dots (2)$$

$1.5 \leq Z < 2.0$ の場合

$$y = 0.2857x^2 - 14.49x + 608.97 \quad \dots (3)$$

$2.0 \leq Z < 2.5$ の場合

$$y = 0.2631x^2 - 7.6136x + 1073.4 \quad \dots (4)$$

$2.5 \leq Z < 3.0$ の場合

$$y = 0.2869x^2 - 15.806x + 368.35 \quad \dots (5)$$

$3.0 \leq Z$ の場合

$$y = 0.7094x^2 - 136.01x + 8198.3 \quad \dots (6)$$

前述の結果より、燃費改善シミュレーションは Z 方向加速度を 6 段階で評価して設計をすることにした。

図 9-5 は燃費改善シミュレーションのフローチャートであり、本船では数ケース観測された荒天時の機関データの実測値、上下加速度の変動実測値の特性を分析した。この結果、実海域では上下加速の変動値に応じ、主機回転数を 5 または 10 回転変動した操船を多く行っていたことが判明した。これを参考に、燃費改善シミュレーションでも 5 または 10 回転の 2 通りで回転数を落とした場合のモデルを構築し、シミュレーションを行うことにした。

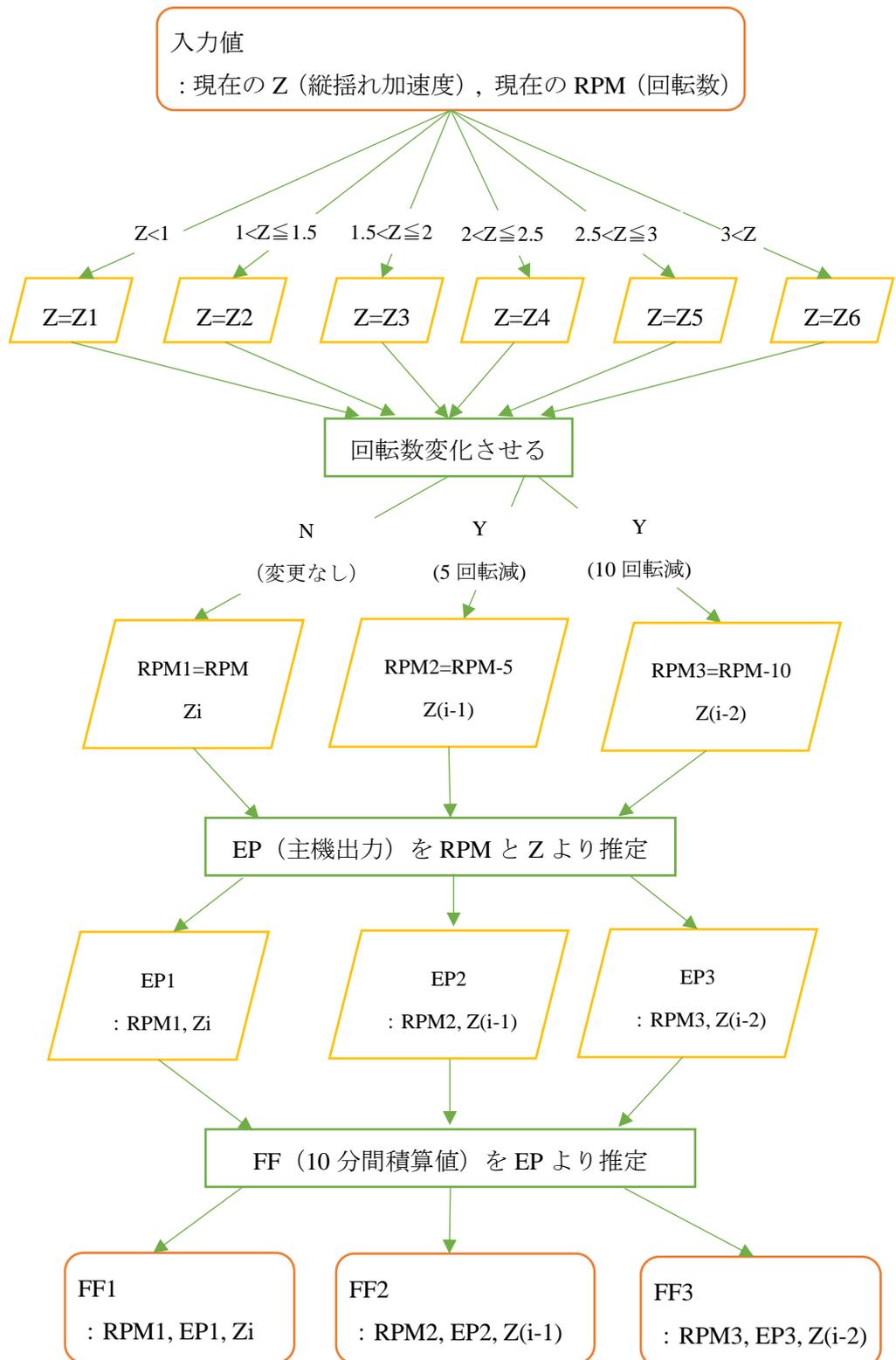


図 9-5 燃費改善シミュレーションの流れ

9.1.2 燃料改善シミュレーションの結果

燃費改善シミュレーションは2022年8月29日から11月30日までの本船の実海域データを使用した。この期間の航路は全て京浜－北九州航路であった。

表 9-1 は2022年8月29日から11月30日の期間より抜粋した航路である。

尚、表 9-1 の航路は実船搭載したGNSSで取得した位置情報をもとに記載した。

荒天遭遇の判別は、実海域データの縦揺れ、横揺れの値が一定角度以上かつ気象庁が公開している波浪図をもとに荒天海域か否かでピックアップを行った。

表 9-1 航路一覧

No	Port	出港 [JST]	Port	入港 [JST]
1	神戸	2022/08/29 20:57:00	博多	2022/08/30 16:20:00
2	博多	2022/08/31 08:53:00	北九州	2022/08/31 12:09:00
3	北九州	2022/08/31 15:06:00	神戸	2022/09/01 08:25:00
4	神戸	2022/09/01 18:05:00	横浜	2022/09/02 19:15:00
5	横浜	2022/09/02 23:19:00	神戸	2022/09/04 02:27:00
6	神戸	2022/09/06 11:08:00	博多	2022/09/07 07:49:00
7	博多	2022/09/07 14:16:00	北九州	2022/09/07 17:23:00
8	北九州	2022/09/07 20:34:00	神戸	2022/09/08 14:05:00
9	神戸	2022/09/08 18:01:00	横浜	2022/09/11 14:49:00
10	横浜	2022/09/11 19:25:00	神戸	2022/09/12 16:37:00
11	神戸	2022/09/13 07:14:00	博多	2022/09/14 11:27:00
12	博多	2022/09/14 17:13:00	神戸	2022/09/15 13:40:00
13	神戸	2022/09/15 20:15:00	東京	2022/09/17 07:54:00
14	東京	2022/09/17 12:19:00	横浜	2022/09/17 13:42:00
15	横浜	2022/09/17 18:18:00	神戸	2022/09/22 07:42:00
16	神戸	2022/09/22 19:30:00	東京	2022/09/23 22:26:00
17	東京	2022/09/24 05:48:00	横浜	2022/09/24 08:18:00
18	横浜	2022/09/24 16:34:00	神戸	2022/09/26 07:44:00
19	神戸	2022/09/26 17:56:00	博多	2022/09/27 22:13:00
20	博多	2022/09/28 09:32:00	神戸	2022/09/29 07:34:00
21	神戸	2022/09/29 16:57:00	東京	2022/09/30 20:34:00
22	東京	2022/10/01 06:15:00	横浜	2022/10/01 12:38:00
23	横浜	2022/10/01 15:56:00	神戸	2022/10/03 07:38:00
24	神戸	2022/10/03 20:40:00	博多	2022/10/04 16:41:00
25	博多	2022/10/04 22:21:00	神戸	2022/10/06 07:40:00
26	神戸	2022/10/06 15:47:00	横浜	2022/10/08 12:40:00
27	横浜	2022/10/08 15:54:00	神戸	2022/10/10 07:49:00
28	神戸	2022/10/10 12:11:00	博多	2022/10/11 17:08:00

29	博多	2022/10/12 09:21:00	神戸	2022/10/13 07:40:00
30	神戸	2022/10/13 15:30:00	横浜	2022/10/15 12:45:00
31	横浜	2022/10/15 17:05:00	東京	2022/10/15 20:28:00
32	東京	2022/10/16 00:25:00	神戸	2022/10/17 07:33:00
33	神戸	2022/10/17 22:55:00	博多	2022/10/18 21:21:00
34	博多	2022/10/19 09:26:00	神戸	2022/10/20 07:32:00
35	神戸	2022/10/20 18:37:00	横浜	2022/10/21 19:36:00
36	横浜	2022/10/21 22:27:00	東京	2022/10/22 07:35:00
37	東京	2022/10/22 12:21:00	横浜	2022/10/22 13:36:00
38	横浜	2022/10/22 15:02:00	神戸	2022/10/23 18:22:00
39	神戸	2022/10/24 11:37:00	北九州	2022/10/26 07:37:00
40	北九州	2022/10/26 10:23:00	博多	2022/10/26 15:41:00
41	博多	2022/10/27 08:50:00	神戸	2022/10/28 10:48:00
42	神戸	2022/10/28 21:00:00	横浜	2022/10/31 00:45:00
43	横浜	2022/10/31 02:58:00	神戸	2022/11/01 07:37:00
44	神戸	2022/11/01 16:58:00	博多	2022/11/02 13:27:00
45	博多	2022/11/03 08:20:00	神戸	2022/11/04 07:35:00
46	神戸	2022/11/04 15:44:00	横浜	2022/11/05 15:37:00
47	横浜	2022/11/05 20:35:00	神戸	2022/11/07 07:38:00
48	神戸	2022/11/07 18:07:00	博多	2022/11/09 03:42:00
49	博多	2022/11/09 11:19:00	神戸	2022/11/10 07:36:00
50	神戸	2022/11/10 16:45:00	横浜	2022/11/11 18:45:00
51	横浜	2022/11/12 02:49:00	東京	2022/11/12 07:33:00
52	東京	2022/11/12 16:15:00	神戸	2022/11/14 07:25:00
53	神戸	2022/11/14 20:13:00	博多	2022/11/15 16:59:00
54	博多	2022/11/16 08:15:00	神戸	2022/11/17 07:42:00
55	神戸	2022/11/17 16:49:00	横浜	2022/11/18 18:38:00
56	横浜	2022/11/18 23:59:00	東京	2022/11/19 07:48:00
57	東京	2022/11/19 12:04:00	神戸	2022/11/20 13:59:00
58	神戸	2022/11/21 18:06:00	博多	2022/11/22 15:54:00
59	博多	2022/11/22 21:53:00	神戸	2022/11/24 07:34:00
60	神戸	2022/11/24 18:07:00	東京	2022/11/25 19:28:00
61	東京	2022/11/26 06:21:00	横浜	2022/11/26 08:28:00
62	横浜	2022/11/26 11:51:00	神戸	2022/11/28 07:49:00
63	神戸	2022/11/28 19:58:00	北九州	2022/11/29 12:07:00
64	北九州	2022/11/29 15:41:00	博多	2022/11/29 18:46:00
65	博多	2022/11/30 03:08:00	神戸	2022/12/02 07:37:00

気象庁の沿岸波浪図と照合した結果、表 9-1 の No26 の航海データが荒天遭遇していた為、実海域での燃料消費量とシミュレーションの結果を比較した。

図 9-6 と図 9-7 は 10 月 6 日 21 時、10 月 7 日 21 時の沿岸波浪図であり、伊勢湾沖と下田沖で波高が 2m を超えていることがわかる。

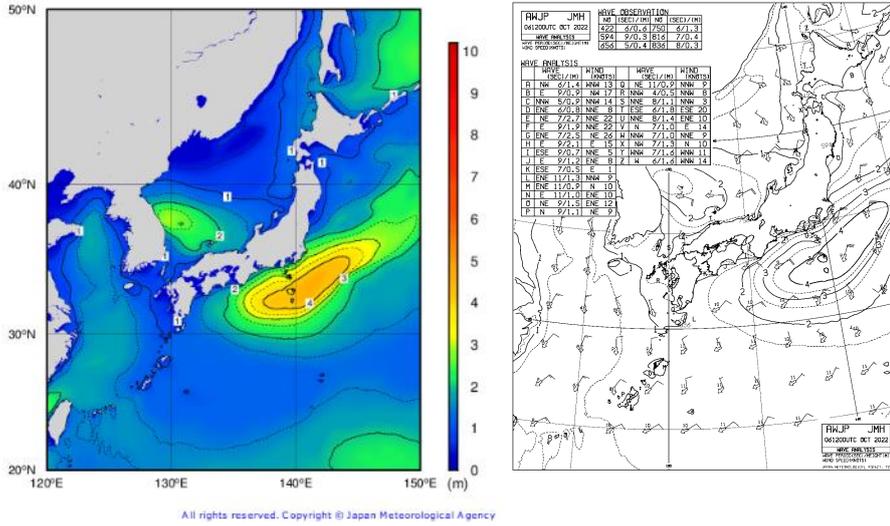


図 9-6 気象庁沿岸波浪図
(JST 2022/10/06 2100)

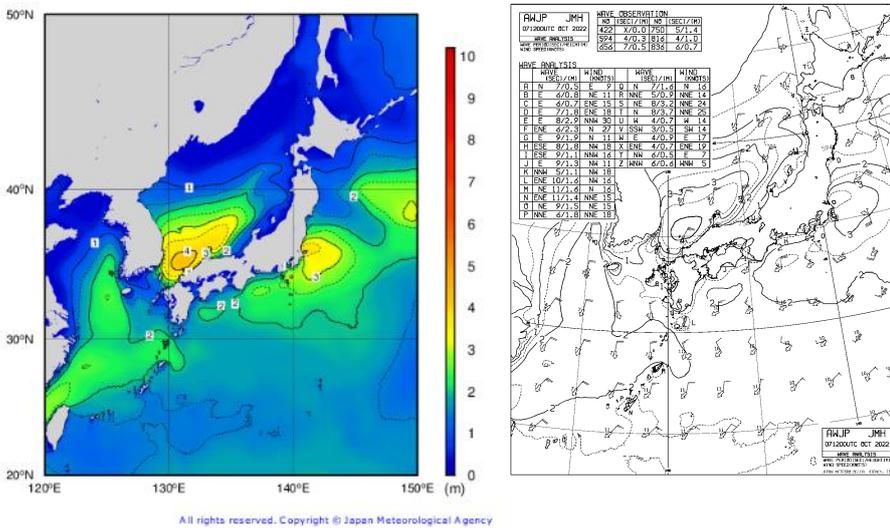


図 9-7 気象庁沿岸波浪図
(JST 2022/10/07 2100)

図 9-8 は本船に搭載した GNSS アンテナで取得した座標をプロットした航跡図である。

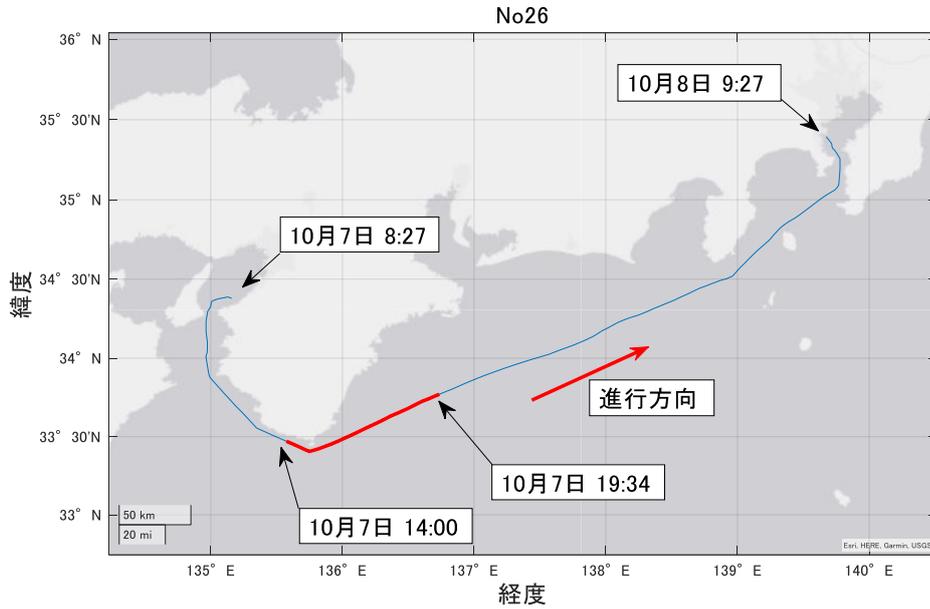


図 9-8 航跡図 No26 神戸→横浜 10/7 8:27～10/8 9:27

図 9-9 は実海域の横揺れグラフであり、横揺れが $\pm 4^\circ$ ほどであったことが分かる。また、図 9-10 は縦揺れグラフであり、徐々に縦揺れが大きくなり、ピーク時は 3° を超えており、その後徐々に縦揺れが減少していくことがわかる。

図 9-8 の赤線で示す箇所は、徐々に縦または横揺れが大きくなる航跡を示し、同様に図 9-9、図 9-10 の赤枠部はこの時の船体動揺、さらに図 9-11 の赤枠部は船速を示す。

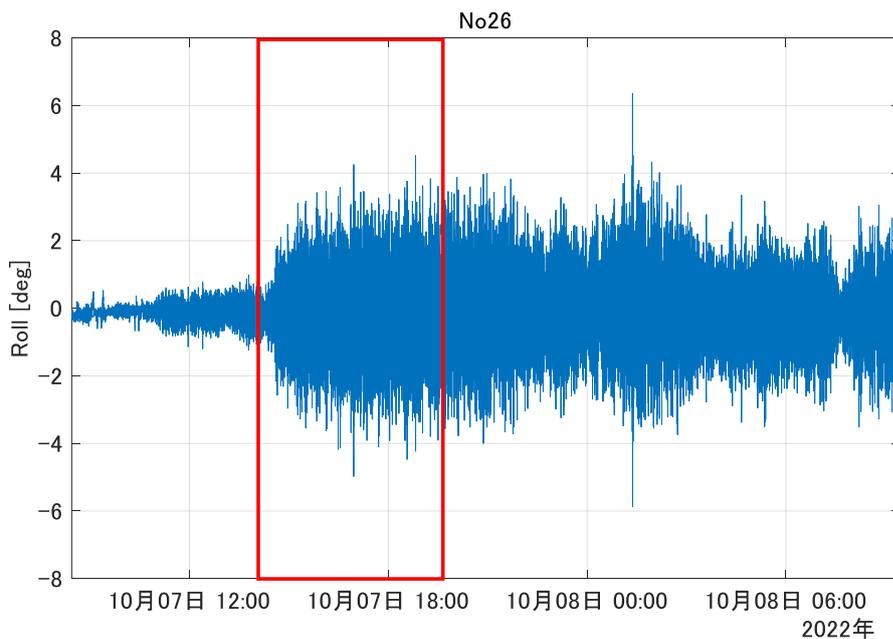


図 9-9 横揺れグラフ

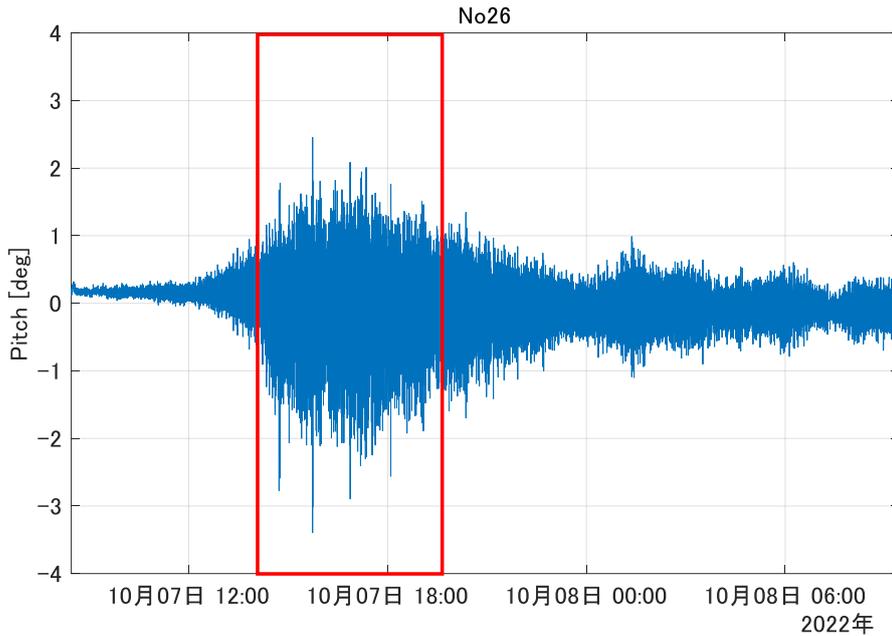


図 9-10 縦揺れグラフ

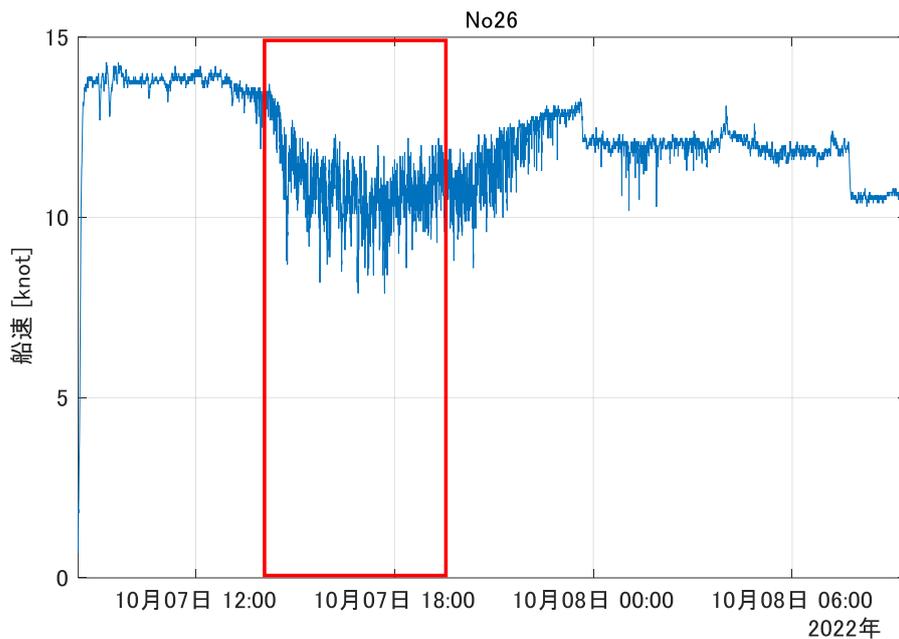


図 9-11 船速

図 9-11 より、縦揺れまたは横揺れの影響により船速が 4knot ほど低下していた。

図 9-12 はこの時の主機出力と、この時の船速をもとに平水時の主機出力を推定した結果を比較したグラフである。平水時の主機出力は速度の 3 乗に比例することから実測した船速を 3 乗して算出した。

図 9-11、図 9-12 を比較すると、赤枠箇所で 4knot ほど船速が落ちているが主機出力の実測値が平水時推定値と比較すると極端に下がっており出力が不安定であることが分かる。

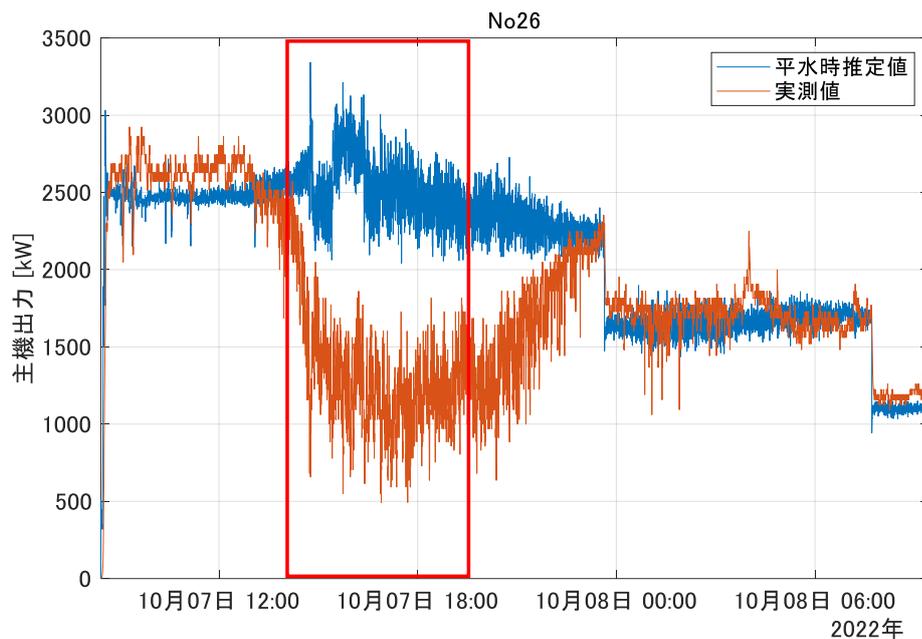


図 9-12 主機出力値の比較

図 9-13 は主機回転数の推移であり、10月7日22時30分頃より主機回転数を徐々に10回転ほど落とした後、平水時の出力と概ね一致する傾向が見て取れる。

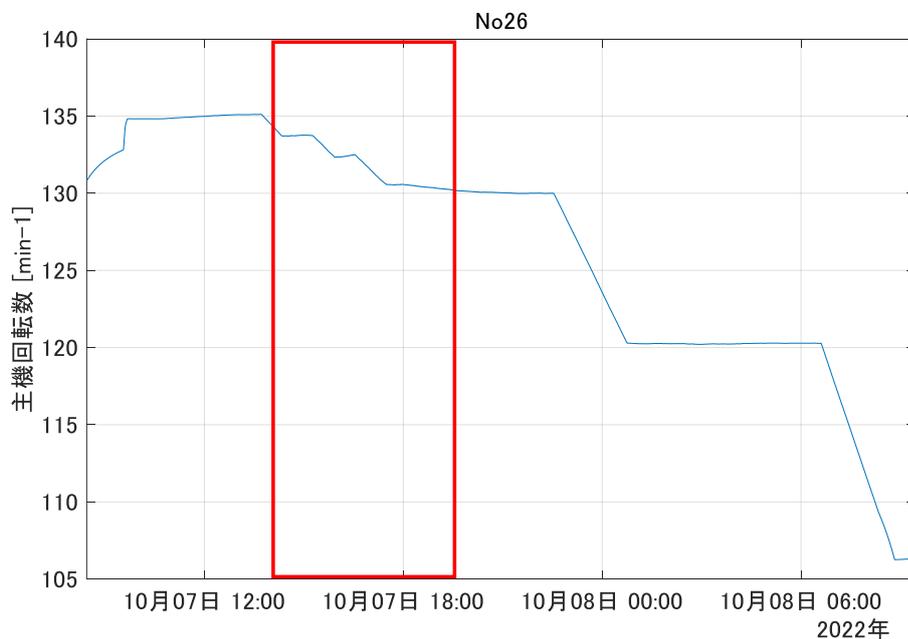


図 9-13 主機回転数の推移

図 9-14 は機関データより取得した1時間当たりの燃料消費量の推移であり、平水時の海域から荒天海域に突入してから一時的に燃料消費量が50~80L上昇していることが分かる。

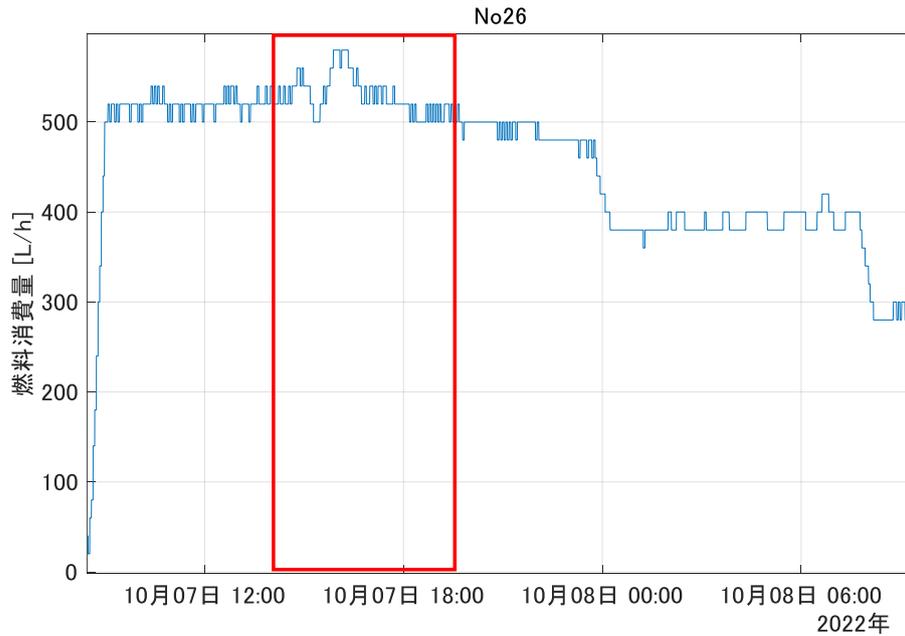


図 9-14 燃料消費量

次に、荒天海域に入る手前で回転数を落として運航した場合、燃料消費量にどれほどの変化があったのか、燃費改善シミュレーションを行い評価した。

図 9-15 は同じ航路にて主機回転数を荒天海域に入る手前で5回転または10回転落とした場合の燃料消費量のシミュレーション結果である。橙線が回転数を変動せずに航行した場合の推定結果、黄色線は主機回転数を5回転落とした場合、紫線は10回転落とした場合の燃料消費量の推定結果である。

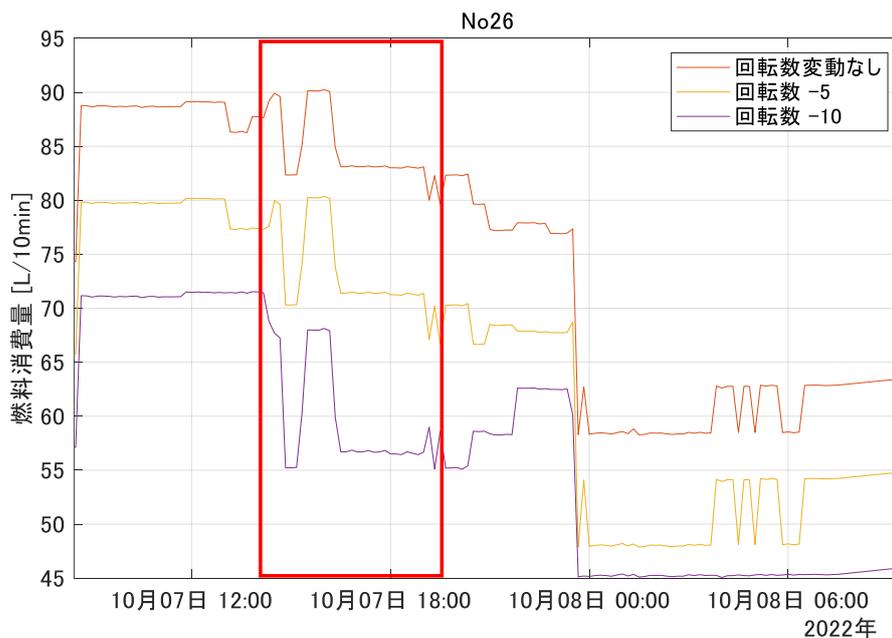


図 9-15 シミュレーション結果

シミュレーションの結果、主機回転数を5回転落とすと10分当たり約10Lの燃料が削減でき、10回転落とすとさらに燃料消費量を抑えることが可能であることが分かった。

航行中に大きな縦揺れに遭遇した場合、図 9-14 の赤枠箇所のように突発的ではあるが燃料消費量が一時的に増えるため、将来の波浪状況を予測することが出来れば事前に主機回転数を落とし、効率的な運航が可能である。

9.1.3 荒天予測から荒天時と好天時の燃料消費量を比較した結果

次に荒天を予測することにより予め主機回転数を落として航行した場合、どれほど燃料消費量に変化が生じるか検証した。

荒天と好天の判断は、気象海象の変動が顕著に表れる波高を基準にし、この開発に於いてはビューフォート6に相当する3m以上の波高を荒天として判断した。基準とする波高は前年度の事業で評価を実施した波高計測システムで計測した値を用いることにし、波高の予測は推定した波高の時系列解析により求めることにした。

図 9-16 は図 9-8 から抜粋した航跡で、神戸港を出港して潮岬へ向かう途中の約40分の航跡であり、図 9-17 はこの時の縦揺れの時系列であり、図 9-18 は横揺れの時系列である。これから大きな縦揺れ、横揺れに遭遇するときの航路であった。

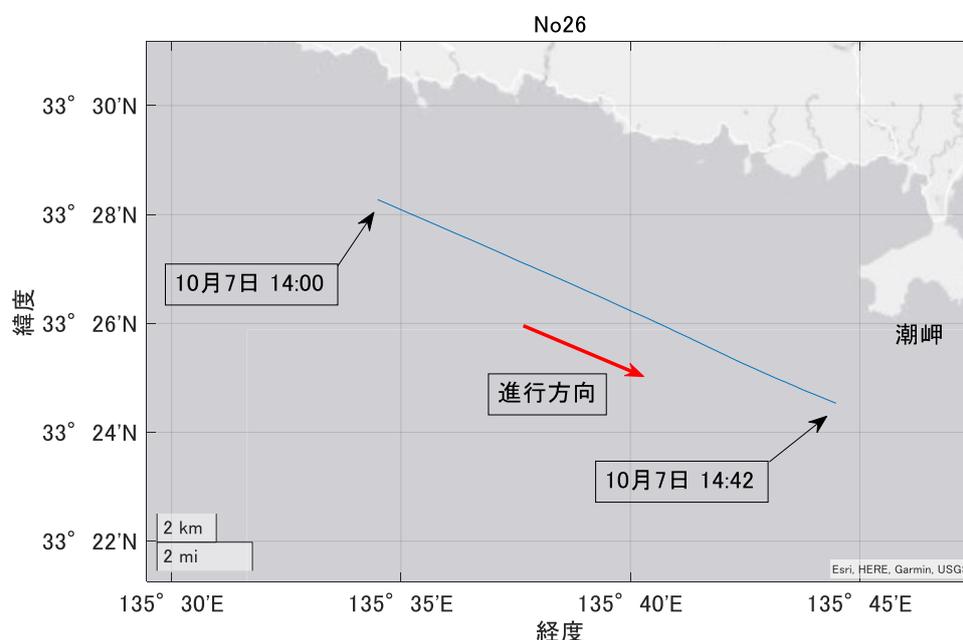


図 9-16 No26 神戸→横浜 10/7 14:00～14:42

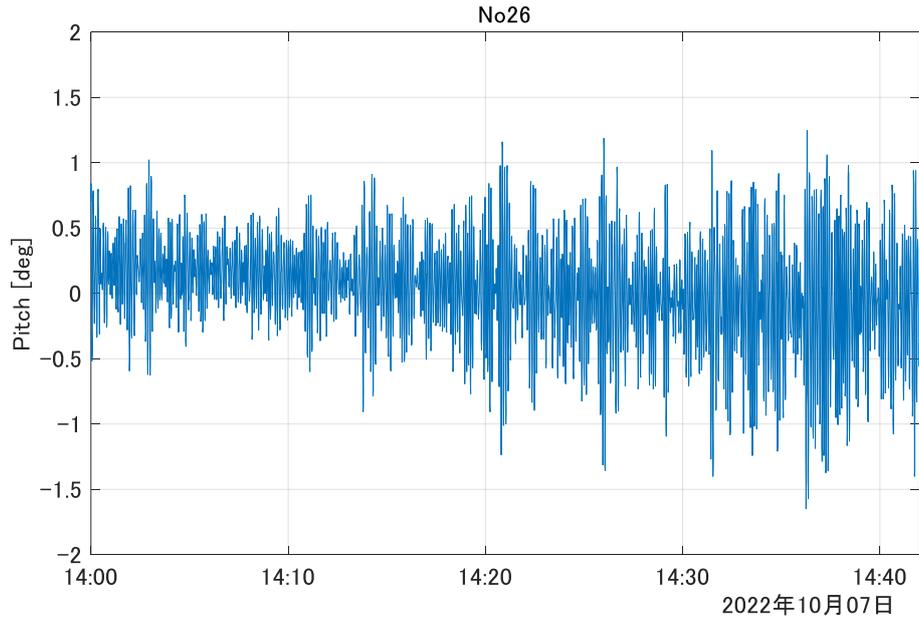


図 9-17 縦揺れの時系列

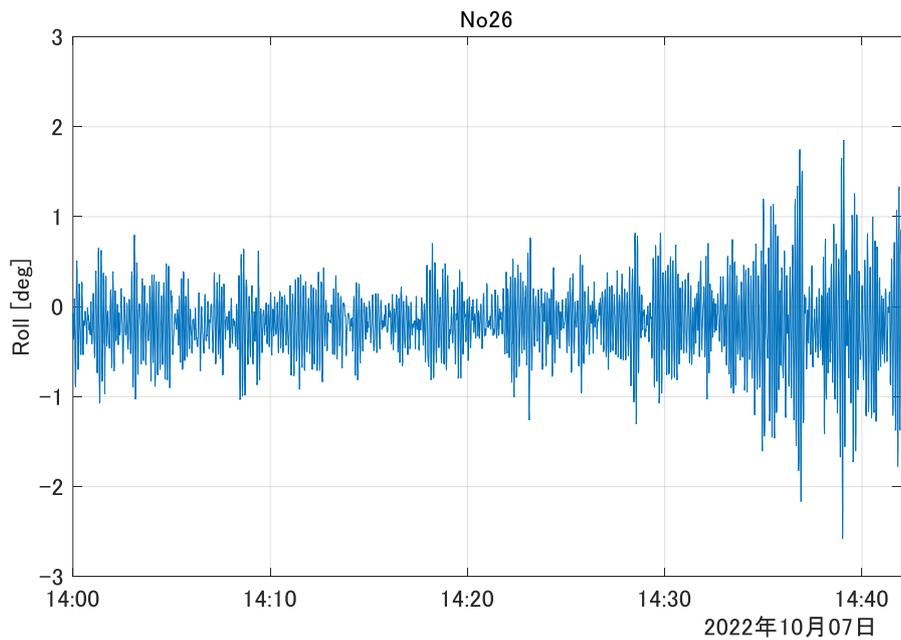


図 9-18 横揺れの時系列

図 9-19 は図 9-16 の航跡より 14 時を始点に 30 分間推定した波高と、14 時 10 分から 20 分後まで予測した波高を比較した結果であり、推定値と予測値の相関が強いことがわかる。

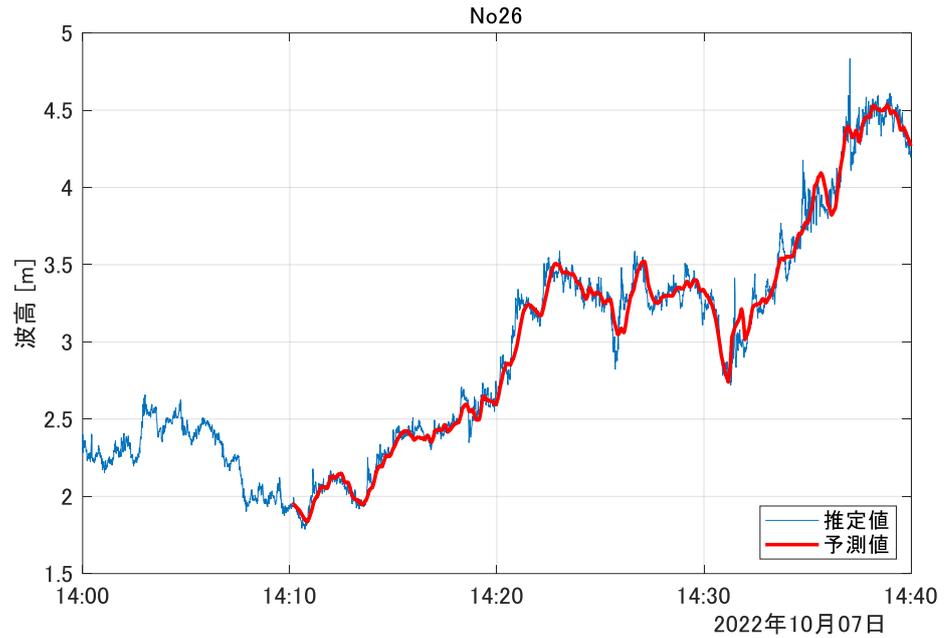


図 9-19 推定波高と予測値の比較

図 9-20 は推定した波高と予測した波高を比較した誤差率であり、本事業では予測値の誤差精度を推定した波高の±20%とした為、予測した波高が精度範囲内に収まっていることがわかる。

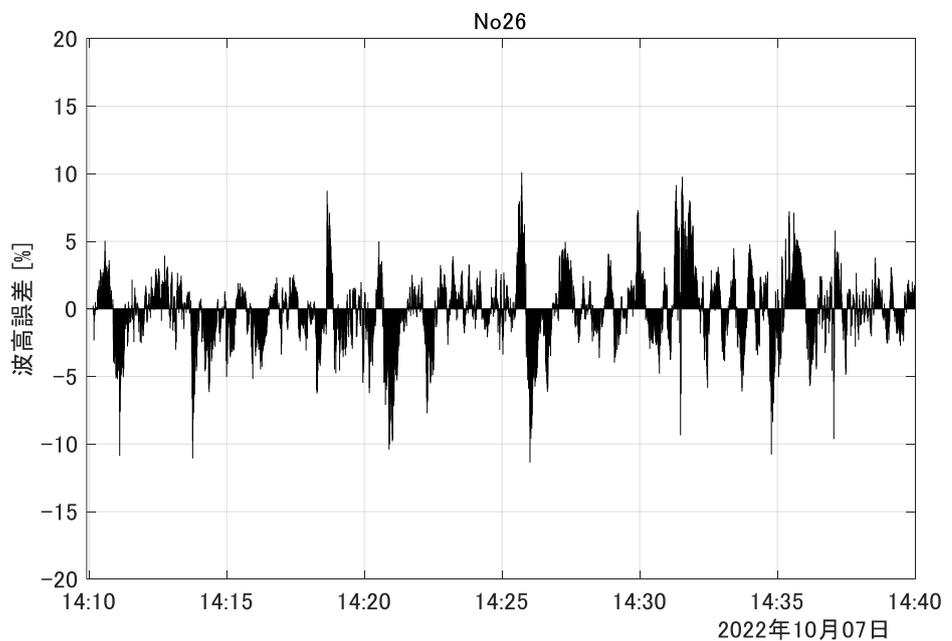


図 9-20 波高推定値と予測値の誤差

図 9-21 は図 9-16 の航跡で示す時刻の波浪図である。

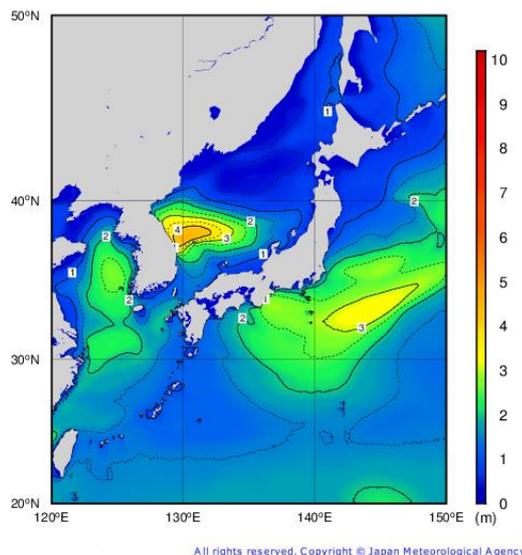


図 9-21 波浪図

図 9-22 は図 9-19 で予測した波高から今後荒天に遭遇することを捉えた場合に予め回転数を 5 回転または 10 回転落とした場合における 40 分間の燃費改善シミュレーション結果であり、図 9-23 は実測した主機回転数の推移を表す。

図 9-20 の波高からも、14 時 10 分より徐々に波高が高くなり、図 9-22 の通り 14:30 から燃料消費量の実測値が急激に上がっている。事前に回転数を 5 回転落とすことにより 14 時 30 分以降 10 分あたり約 10 リットル以上の燃料を削減できる結果となった。また、回転数を 10 回転落とした場合は 14 時 10 分以降燃料消費量が徐々に低下していき、14 時から 14 時 40 分までの間で回転数を変動しない場合と比較して約 95L の燃料削減ができることがわかった。

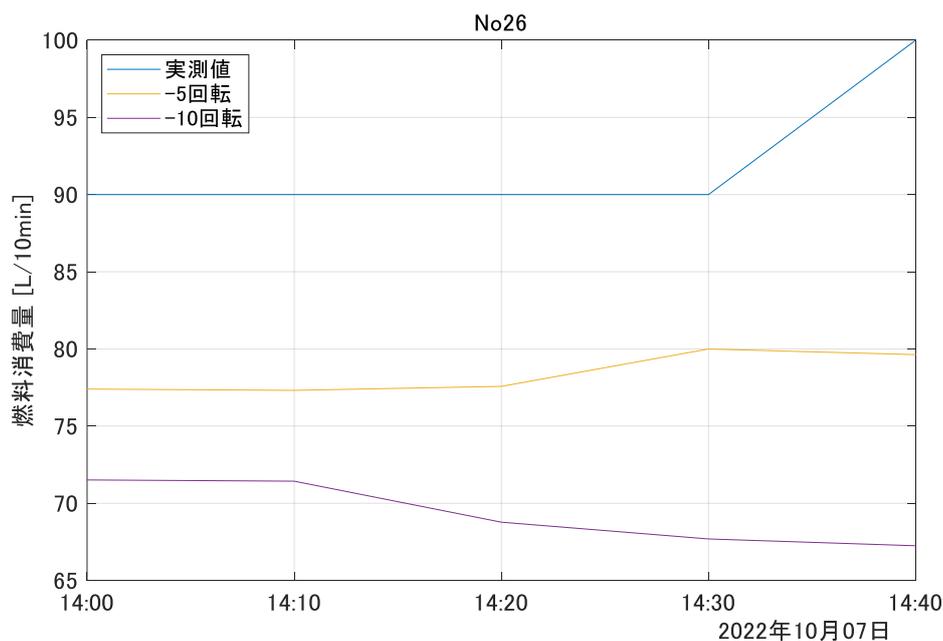


図 9-22 燃料変化量の推移

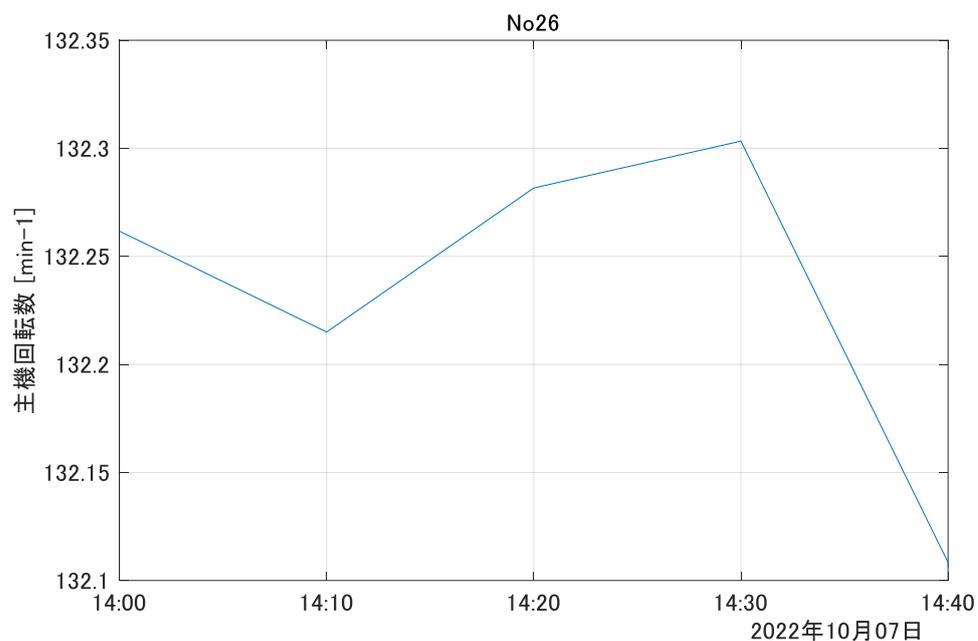


図 9-23 主機回転数の推移

次に、平水時に回転数を変動させた場合に、燃費改善シミュレーションでどのような結果になるのか調査を行った。

図 9-24 は表 9-1 No.16 の東京湾に向かう途中の航跡図、図 9-25 は 9 月 23 日 9 時または 21 時における波浪図であり、東京湾周辺は平穏であることがわかる。

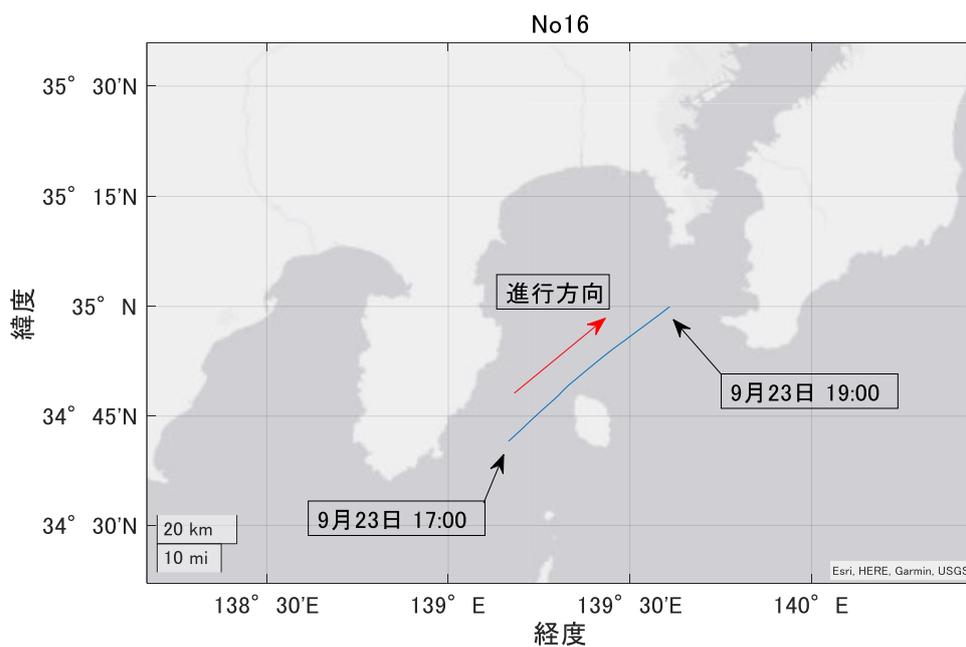


図 9-24 No.16 神戸→東京 9/23 17:00~19:00

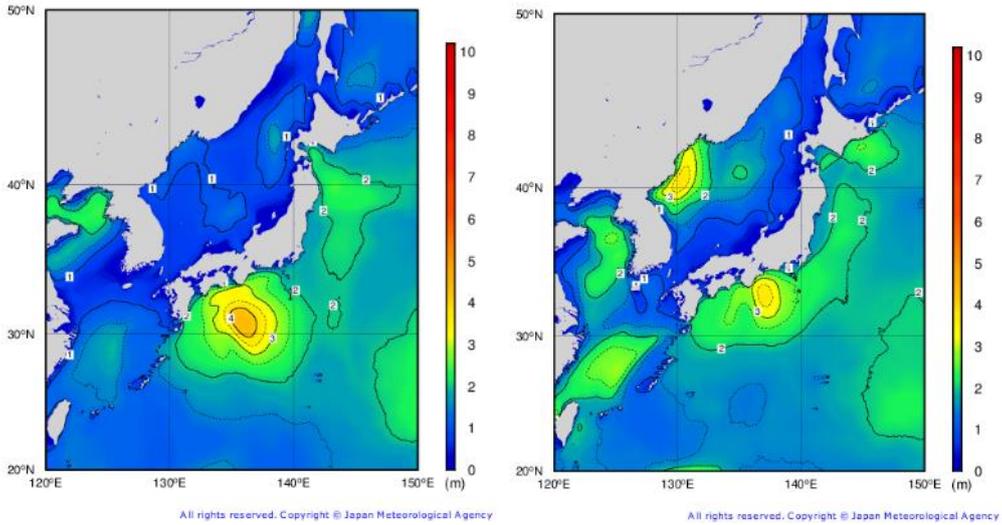


図 9-25 9月23日9時(左)と21時(右)における波浪図

9月23日17時～19時における主機回転数、主機出力、船速の推移が図9-26～図9-28であり、実測した船速から算出した平水時の主機出力と、実際の主機回転数の傾向が概ね一致していることがわかる。

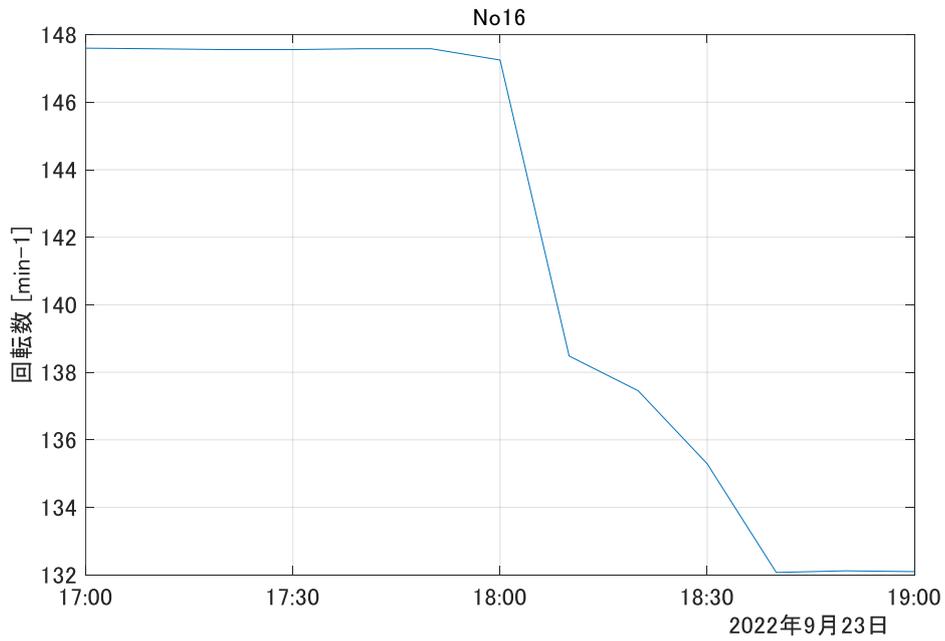


図 9-26 主機回転数の推移

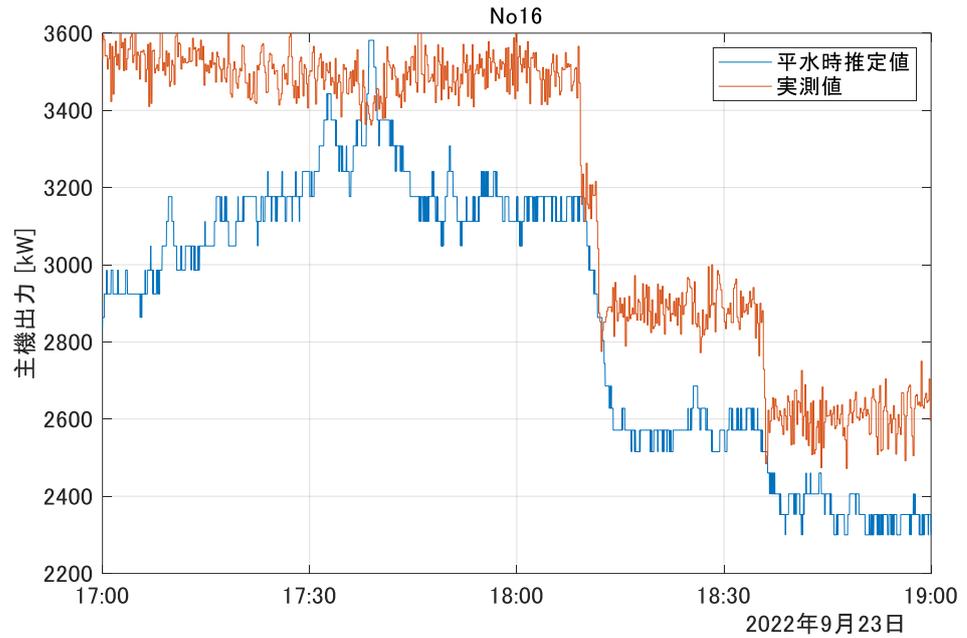


図 9-27 主機出力の推移

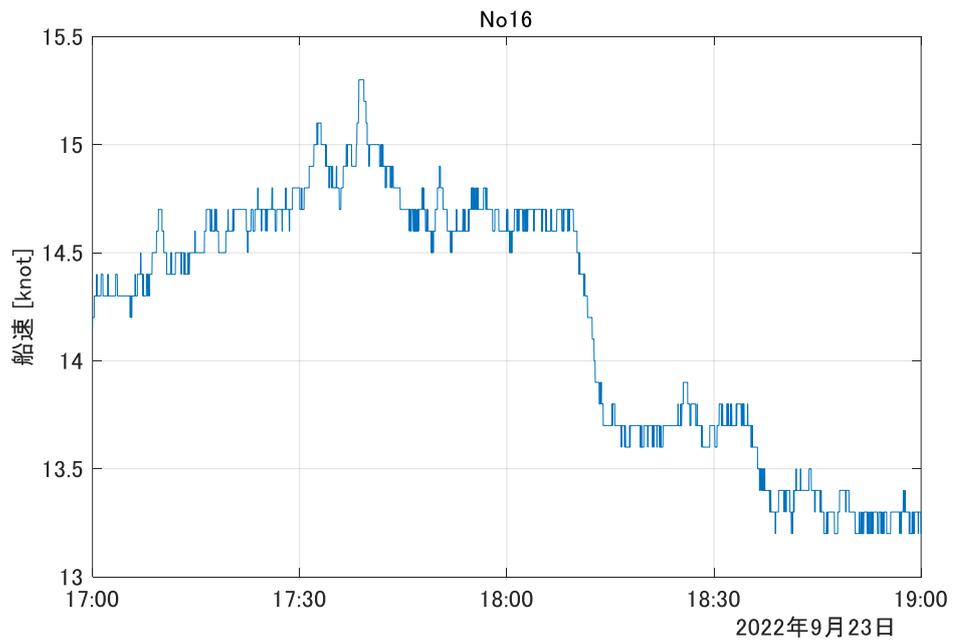


図 9-28 船速の推移

9月23日17時～19時における燃費改善シミュレーションの結果が図9-29であり、主機回転数を5回転または10回転落とした場合の燃料消費量が実測値とほぼ同じ傾きになっていることがわかる。

このような場合は回転数を落としても、比例して燃料消費量または船速が下がるため回転数を落とすことは不適切である。

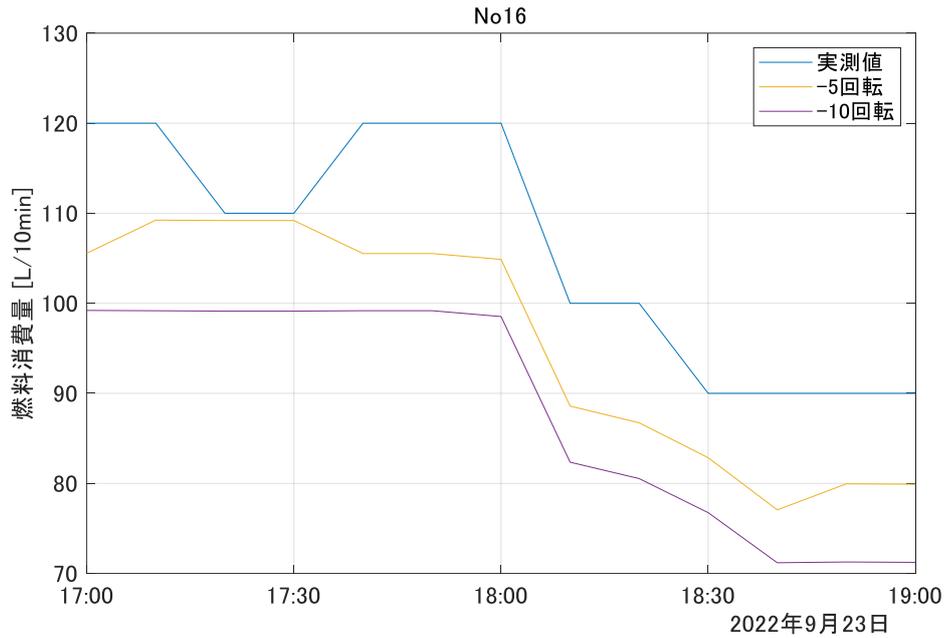


図 9-29 燃費改善シミュレーションの結果

図 9-30 は表 9-1 No4 の神戸→横浜の航跡図であり、図 9-31、図 9-32 この時の1航海あたりの縦揺れ、横揺れのグラフである。

最大で横揺れが 6° を超えていることがわかる。図 9-33 は9月1日21時と9月2日9時における気象庁波浪図であり、日本列島に低気圧が近づき天候が荒れていたことが分かる。

表 9-2 は9月2日9時における潮岬のナウファス波浪状況である。

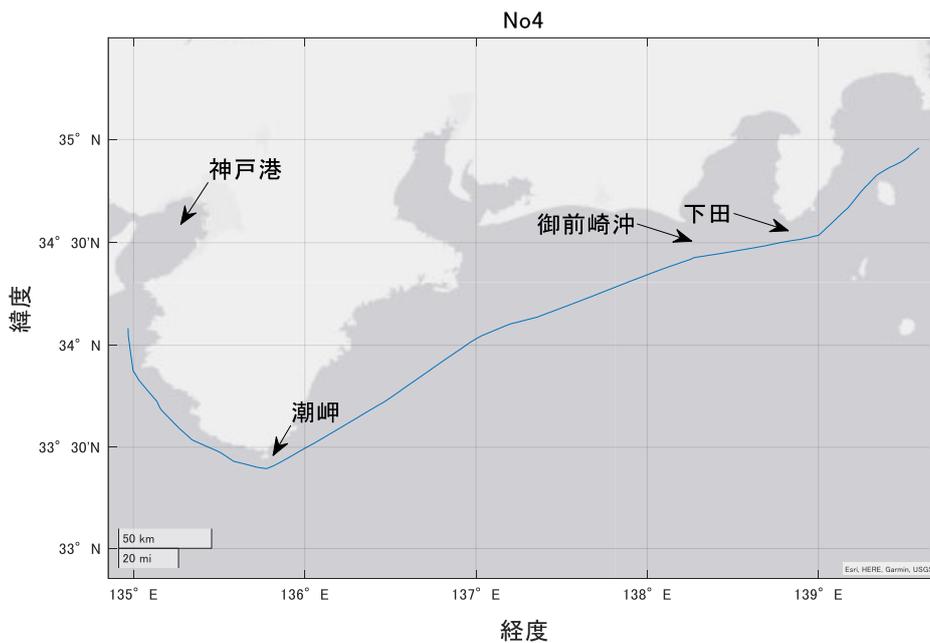


図 9-30 No4 神戸→横浜 9/1 18:05~9/2 19:15

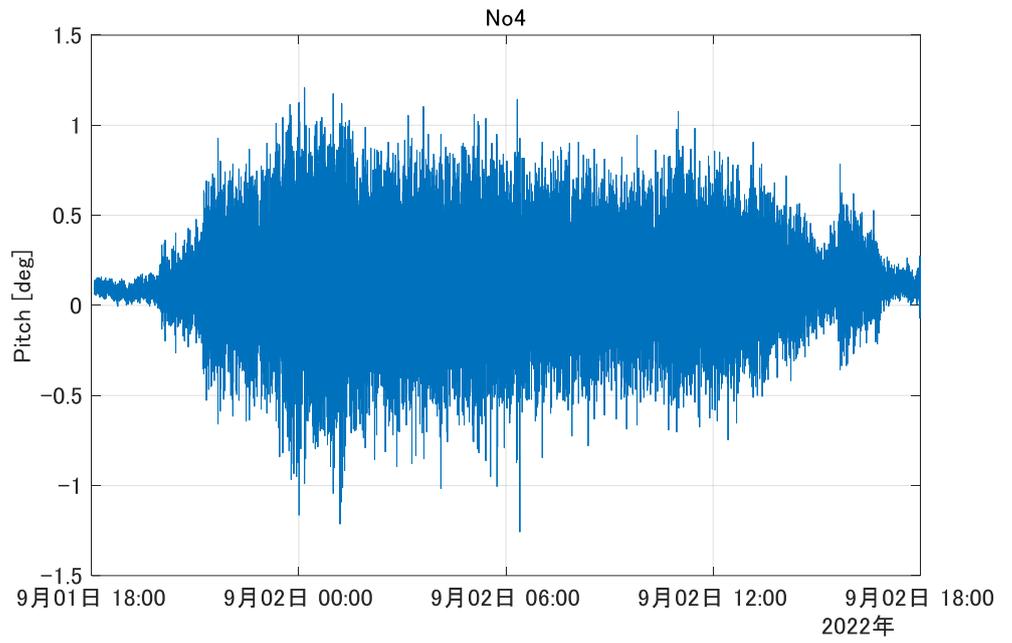


図 9-31 縦揺れ

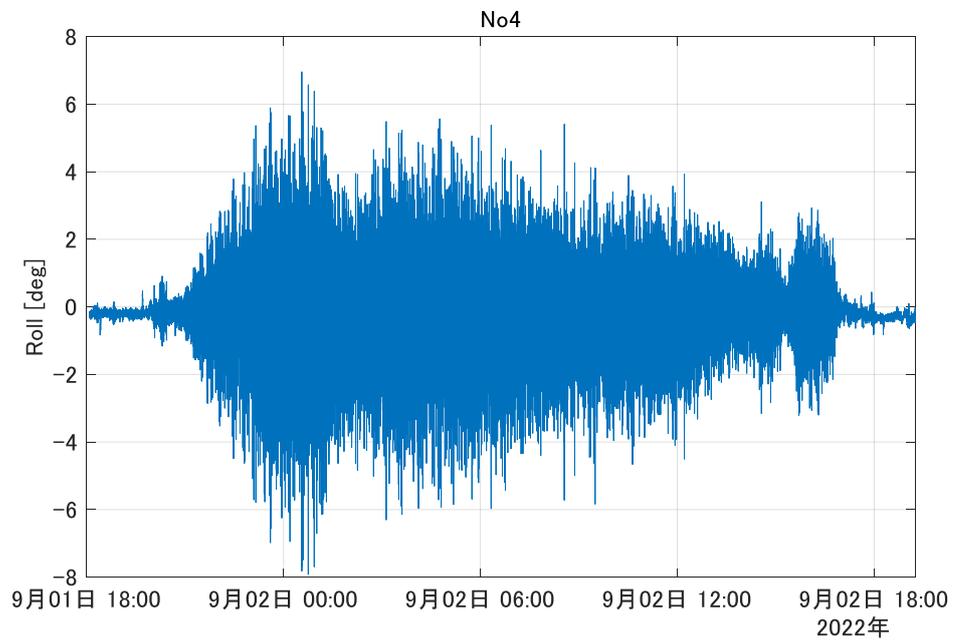


図 9-32 横揺れ

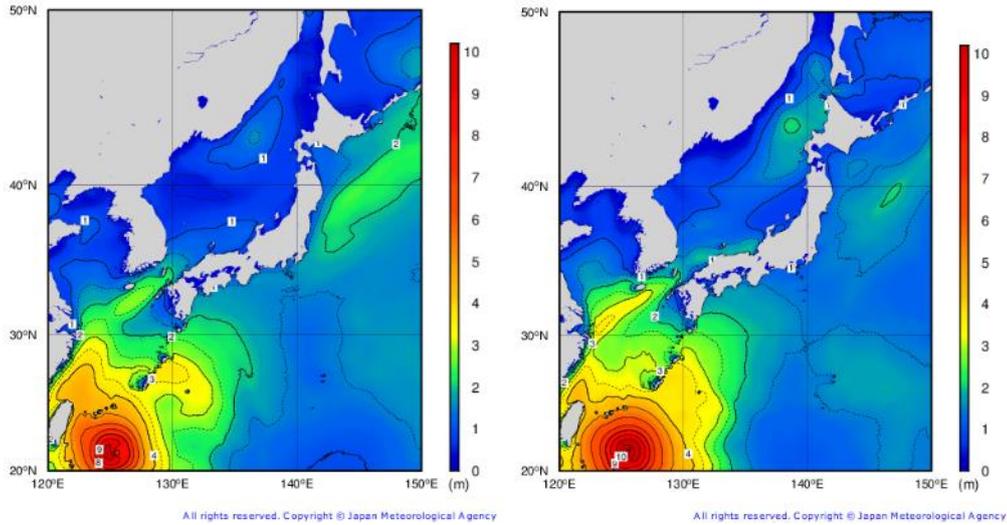


図 9-33 9月1日21時(左)と9月2日9時(右)における波浪図

表 9-2 波浪データ

日時	有義波高(m)	有義波周期(s)	波向き
9月2日09:00	1.26	8.2	SSW

荒天に遭遇していた潮岬付近から伊勢湾手前までの航路で波高予測をした結果より、予め回転数を変動した場合と変更しない場合との燃費比較を行った。図 9-34 の赤線で示す期間は潮岬を通過し伊勢湾に向かう途中約 5 時間の航跡であり、1 時 30 分から 6 時 30 分までの速力の推移が図 9-35 であり、主機回転数の推移が図 9-36 である。

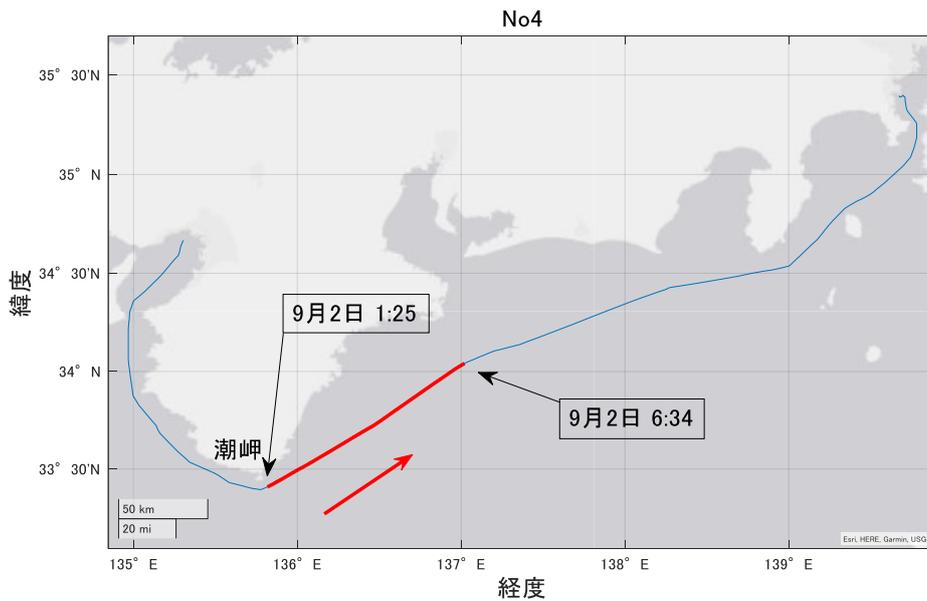


図 9-34 No4 神戸→横浜 9/1 18:05~9/2 19:15

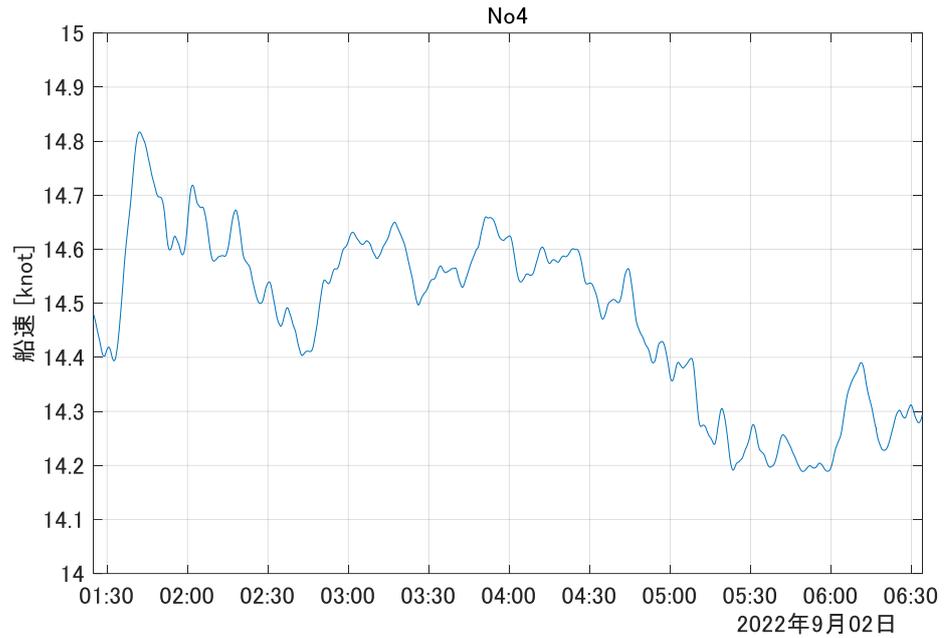


図 9-35 速力の推移

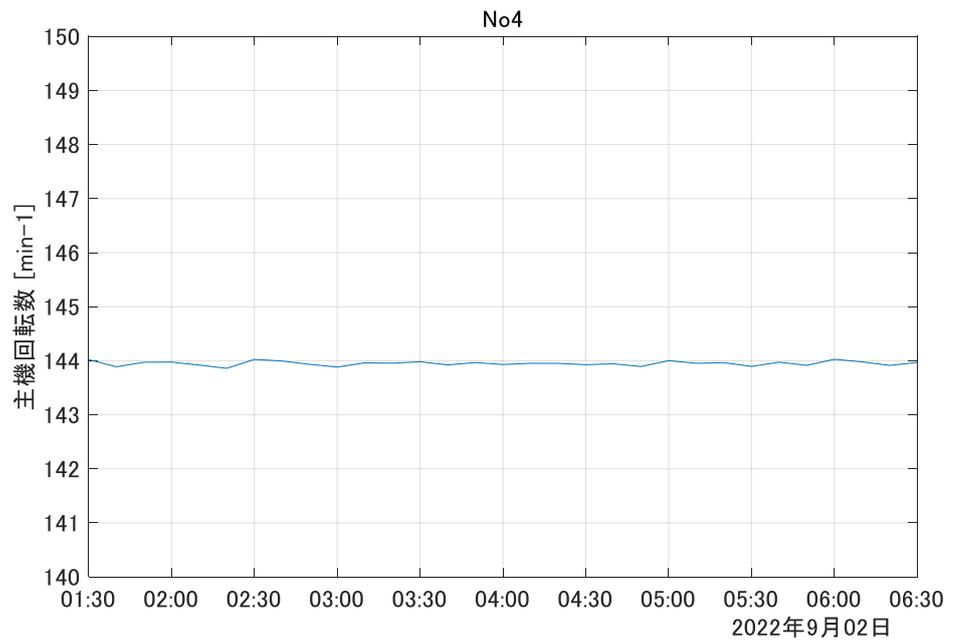


図 9-36 主機回転数

潮岬付近から北上する時点で横揺れが最大6度と大きいものの、主機回転数が144回転とほぼ一定であり、また約5時間にかけて船速14knotを保持していることから、安定した航海であったと言える。

図9-37は、図9-34の赤線で示す航跡における推定波高と約30分間の予測値であり、所々推定値より大きな値が出ているが、推定値と予測値の相関が強いことが良くわかる。

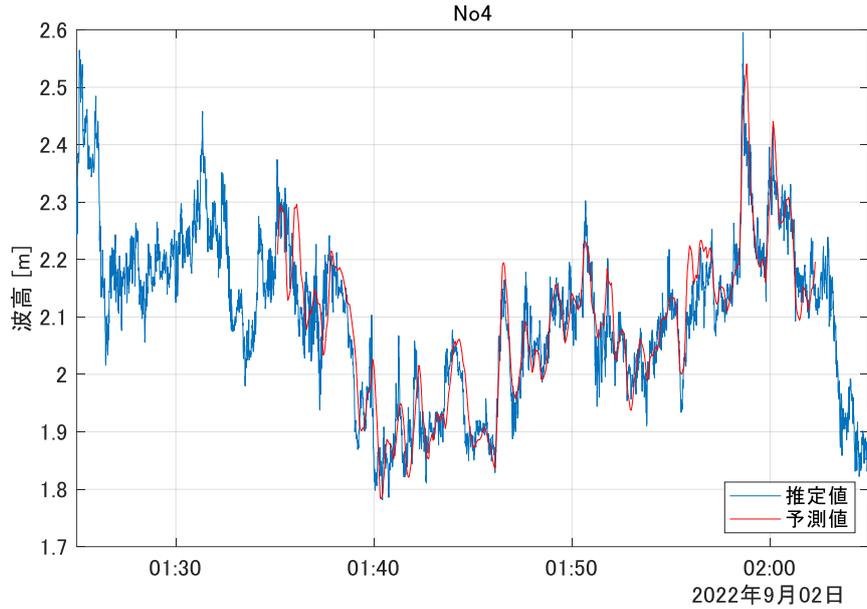


図 9-37 波高推定値と予測値の比較

図 9-38 は図 9-37 の波高推定値と予測値との誤差率である。
 本事業では予測値の誤差精度を推定した波高の±20%とした為、予測した波高が精度範囲内に収まっていた。

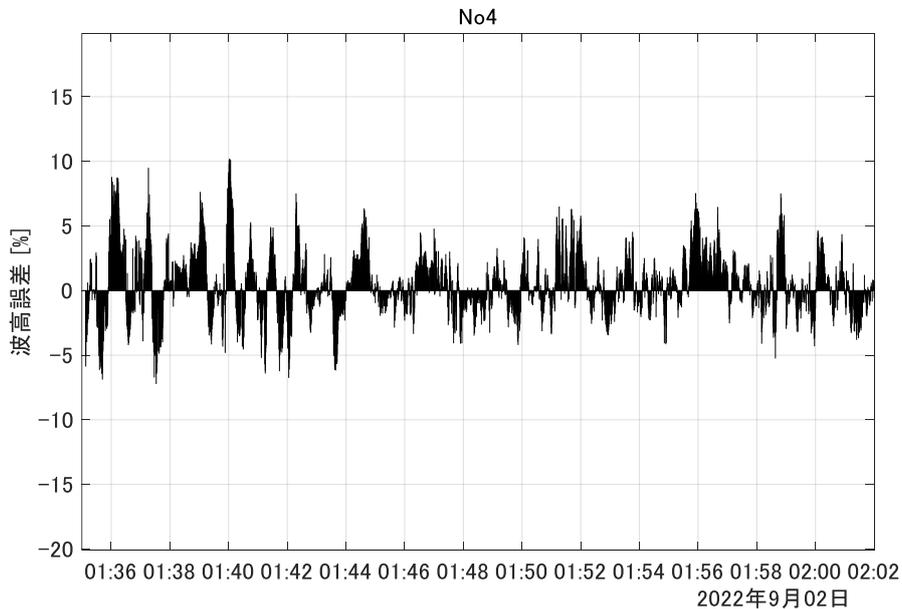


図 9-38 波高推定値と予測値の誤差

次に、事前に回転数を 5 回転または 10 回転落とした場合のシミュレーションを行い、燃料消費量にどれほどの差があるのか検証を行った。

図 9-39 は回転数を落とした時の主機出力シミュレーション結果であり、図 9-40 は燃料消費量のシミュレーション結果である。

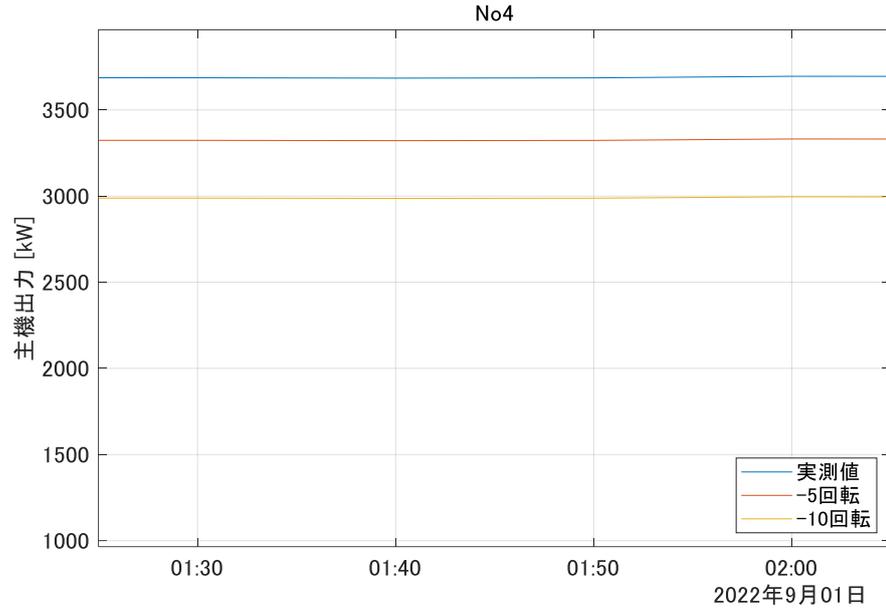


図 9-39 主機出力シミュレーション

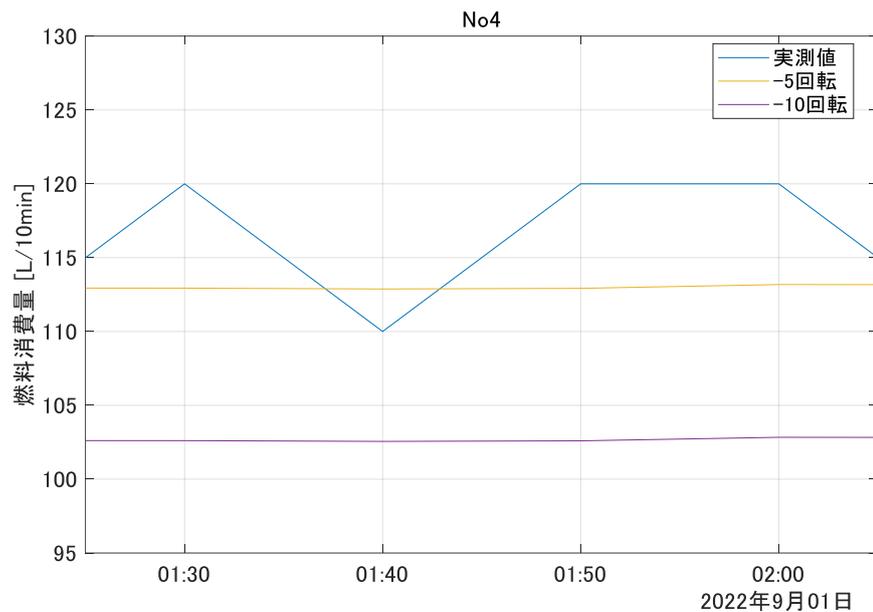


図 9-40 燃料消費量シミュレーション

前述の通り船速も一定で安定した航海であったが、図 9-40 から燃料消費量が 110L から 120L の間で変動しており、主機を 5 回転落とした場合は 113L でほぼ一定であった。

図 9-41 は図 9-34 より抜粋した、御前崎付近から東京湾に入るまでの約 4 時間 45 分の航跡であり、主機出力の推移が図 9-42、さらに船速の推移が図 9-43 である。

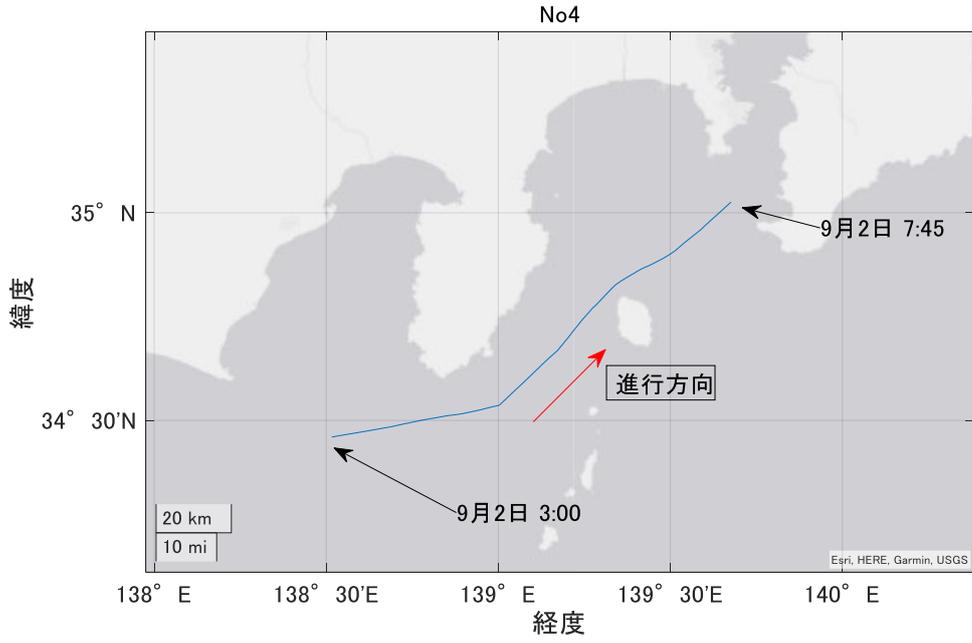


図 9-41 No.4 神戸→横浜 9/2 3:00~7:45

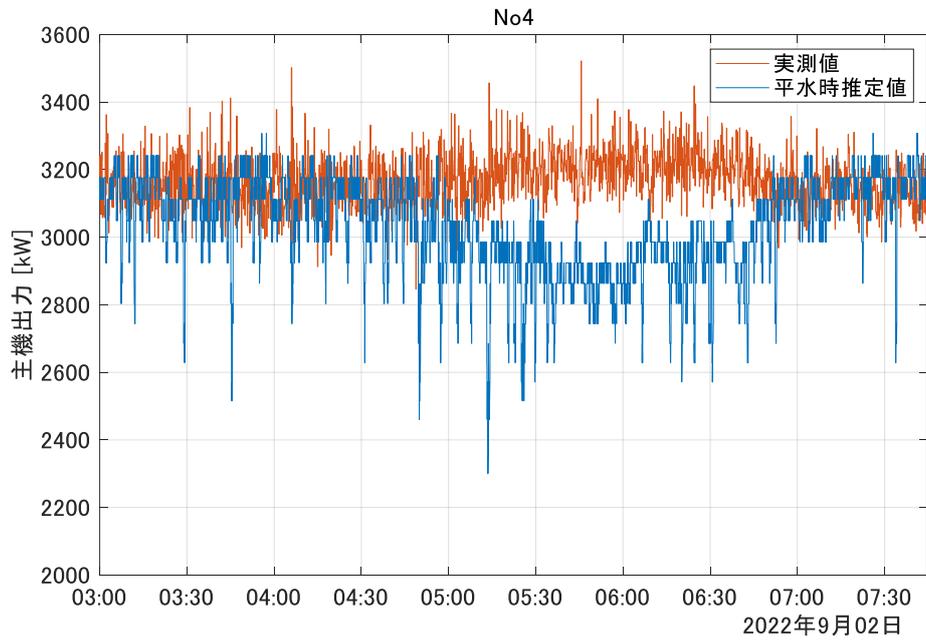


図 9-42 主機出力の推移

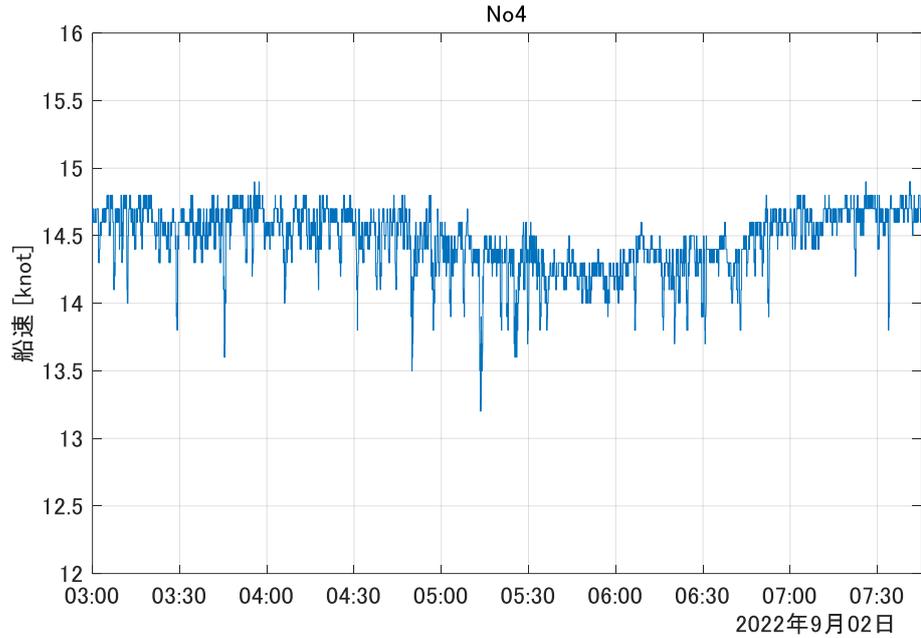


図 9-43 船速の推移

図 9-42 の主機出力を見ると、5 時 15 分から 6 時 30 分の間で平水時の主機出力と比較すると実測値が大きいことがわかる。

図 9-44 は燃料消費量の推移であり、実測値が 10 分あたり 100L~110L であった。主機回転数を 5 回転落とした場合、10 分あたり 100L の燃料消費量となり、実測値よりも安定した結果であった。

また、主機回転数を 10 回転落とした場合は 10 分あたり約 92L の燃料消費量であった。

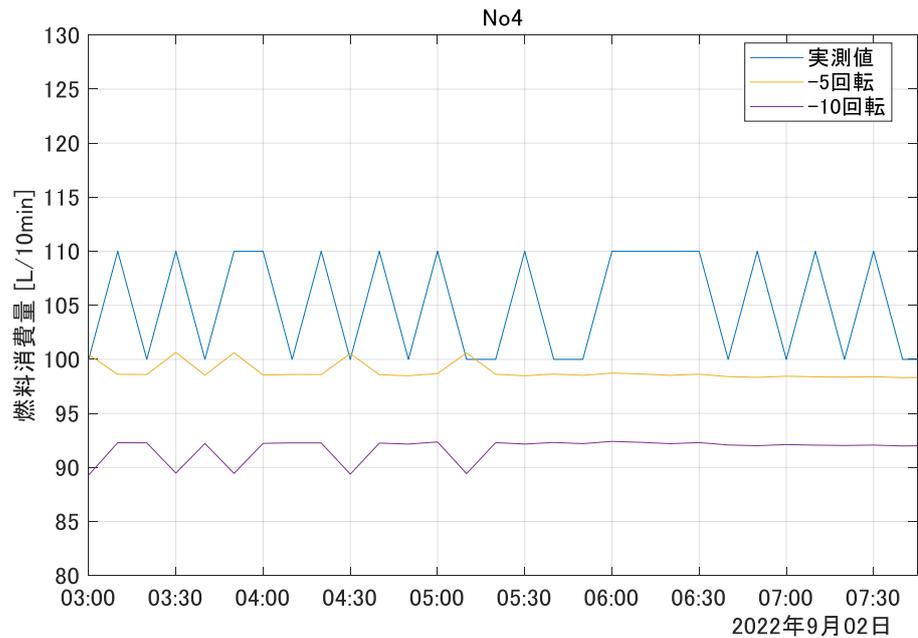


図 9-44 燃料消費量の推移

この結果、実測値の下限值が 100L であることから主機回転数を 5 回転落としても大幅な燃料削減には繋がらないため、主機回転数を 10 回転落とし、燃料消費量を 10 分あたり約 90L まで抑えたほうが効率の良い操船であることが分かる。

以上により、航海中の荒天海域において、最適な回転数に調整することで燃費削減効果を生み出すことができると分かった。

そこで、この最適な回転数への調整を今回検証した神戸から横浜までの 1 航海に適用すると、表 9-3 に示すシミュレーション結果となる。

表 9-3 燃費改善シミュレーション結果

	実測値	シミュレーション	削減量	削減率
燃料消費量	19,630L	18,346L	1,284L	6.5%

この結果より、最適な回転数に調整することで 1,284L の燃費を削減することが可能になることが分かる。なおこの削減量は、実測値から見て 6.5%の削減率となる。

従って、本事業の最終目標である燃料消費量を航海平均で 5%以上削減するという目標に対し、6.5%削減することが可能となったため、目標を達成することができた。

9.2 安全指標・燃費改善指標の確立

本船のログデータからシミュレーションを行い、荒天時でも安全航行が可能となる船体姿勢の許容縦揺れ、傾斜角、動揺などを総合的に判断するための安全指標を導き出した。また、燃費の観点から主機へ影響を及ぼす要因となる縦揺れについて、現在と将来の予測値を速力馬力曲線にプロットし、現在と将来の燃費改善指標を確立し、指標を見て効率操船の判断を可能とした。

安全指標・燃費改善指標を確立するために、昨年度より実船搭載の協力を得ている井本商運株式会社が運航する内航コンテナ船「ながら」の実海域データを使用して評価を行った。

9.2.1 安全指標の確立

効率運航操船支援システムでは、航行中リアルタイムに変動する船体運動や波浪を視覚的に運航者へ示す機能を搭載する。また、操船者の誰が見ても瞬時に判断が可能である航行中の危険度を総合評価した安全指標の表示が最大の特徴である。

安全指標は、特に海難の一因として考えられているパラメトリック横揺れ現象に着目して検証を行った。

安全指標の安全、危険判定は船体運動の時系列を使用した自己回帰モデルで算出した特性根を指標として、航行中の安全、不安定、危険の 3 段階で評価を行うことにした。

尚、特性根は効率運航操船支援システムでは Stability Index として表現し、略称として SI を使用している。

特性根は平均値と分散値を算出し、3段階の評価は以下の通りとした。

特性根平均<1	特性根分散<基準値	: 安全
特性根平均<1、	特性根分散>基準値	: 注意
特性根平均>1		: 危険

本船では特性根分散を比較する基準値を、同航路での複数航海データの平均値を基準値として設定した。

安全指標の評価は、図 9-45 の波浪図より比較的荒天航海であった表 9-1 No12 博多→神戸航路の計測データをもとに行った。

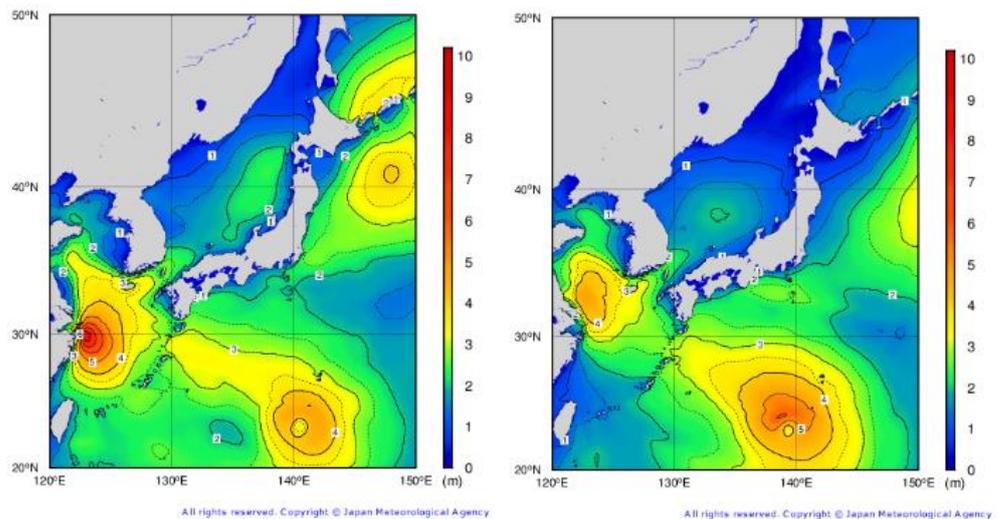


図 9-45 表 9-1 No12 博多 → 神戸航路の波浪図

図 9-46 は GNSS アンテナで取得した位置情報をプロットした航跡であり、赤丸箇所は博多港を出港して関門海峡方面へ航行中の特に横揺れが大きかったところである。表 9-4 は気象庁の沿岸波浪図より抜粋したこの時の波浪状況であり、21 時の時点で有義波高 2.4m であり、海象状況が悪く荒天であったと言える。

安全指標の評価はこの時点のログデータをもとに行い、実際の気象海象状況と算出した安全指標を比較することにした。

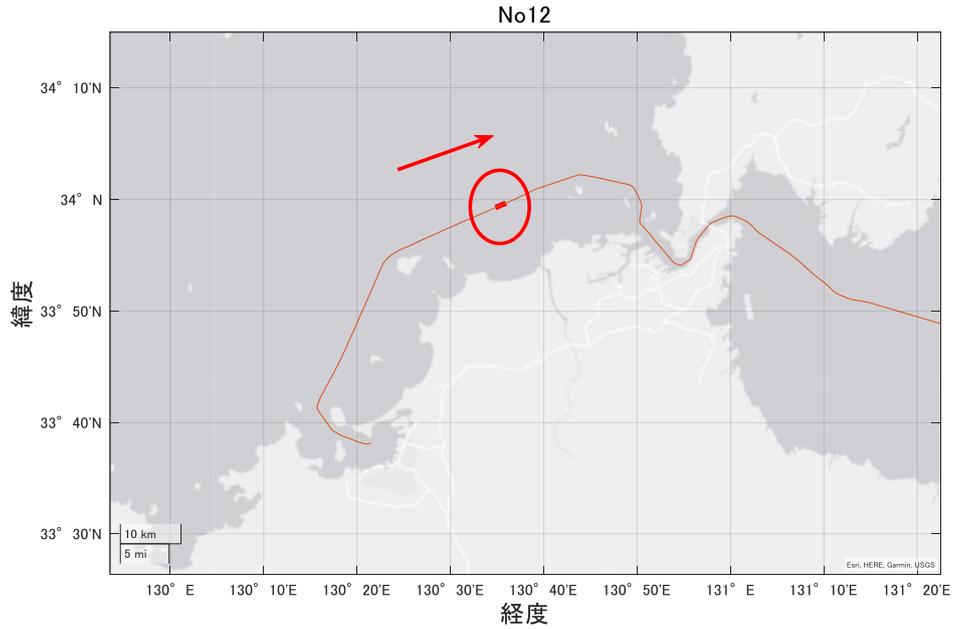


図 9-46 No12 博多→神戸 9/14 17:13~9/15 13:40

表 9-4 波浪データ

日時	有義波高 (m)	有義波周期 (s)	波向き	風向風速 (knot)
9 月 14 日 21:00	2.4	7	NE	NE 22

図 9-46 の赤丸箇所の約 7 分間における船体動揺グラフが図 9-47 であり、最大約 4 度の横揺れを受けていることがわかる。

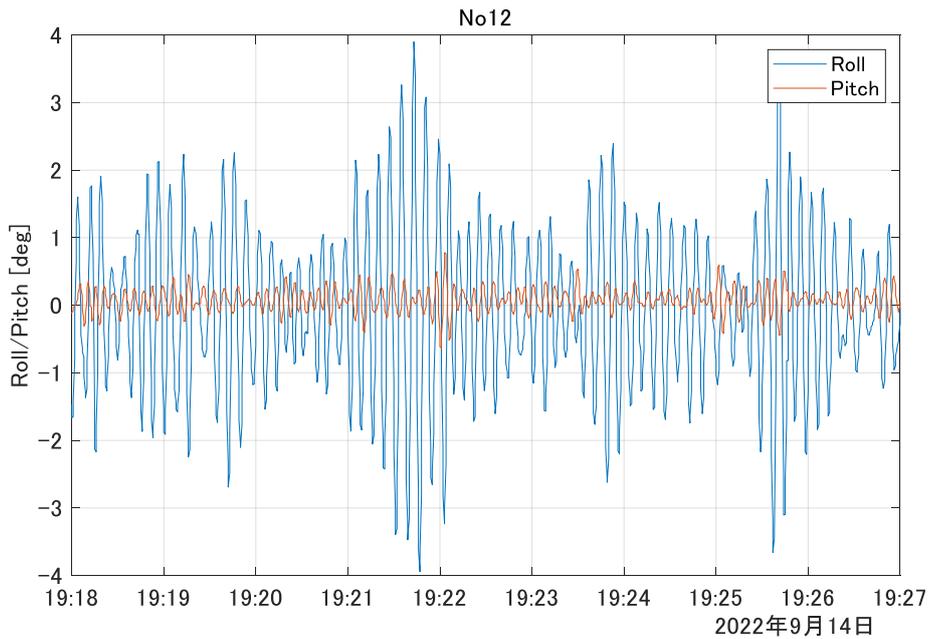


図 9-47 縦揺れと横揺れの推移変化 (約 7 分間)

図 9-48 はこの時のログデータから算出した安全指標であり、横揺れが 4 度付近に近づくと SI 分散値が閾値に近づき、SI 平均値が 1 を超えて危険状態へと推移していた。

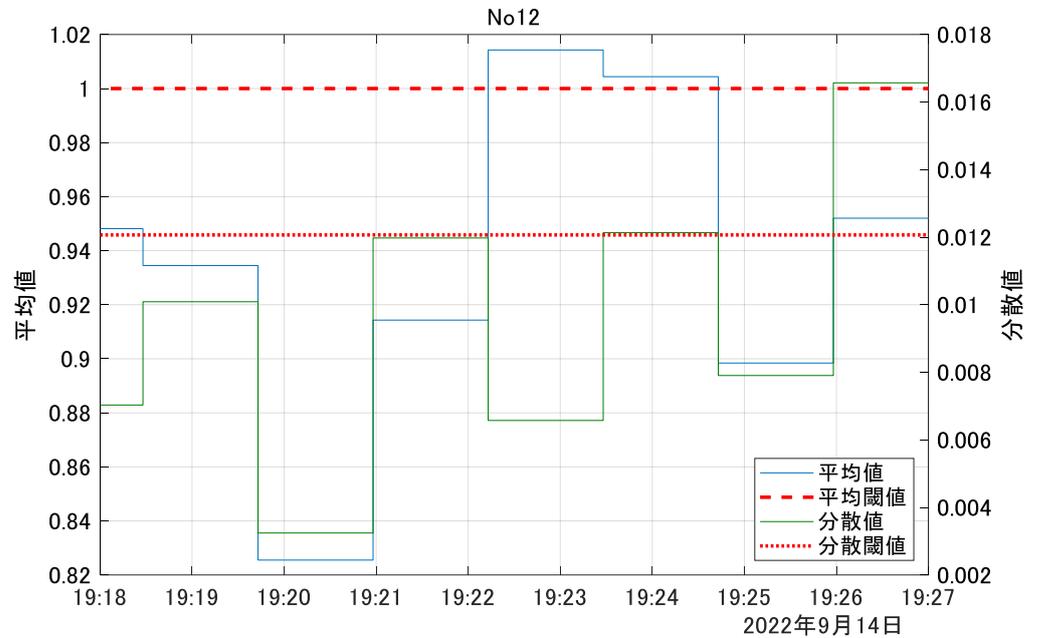


図 9-48 安全指標

図 9-49 は操船支援システムの波高推定結果であり、波高が 1.7m 付近までは SI 平均値、分散値が閾値以下であり安全を示し、波高が 1.9m に近づくと SI 分散値が閾値に近づき、波高が 2.2m を超えると SI 平均値が 1 を超えて危険と判断していることがわかる。また、この時の船速が図 9-50 であり、高波を受けた後に船速が少し減速していたことがわかる。

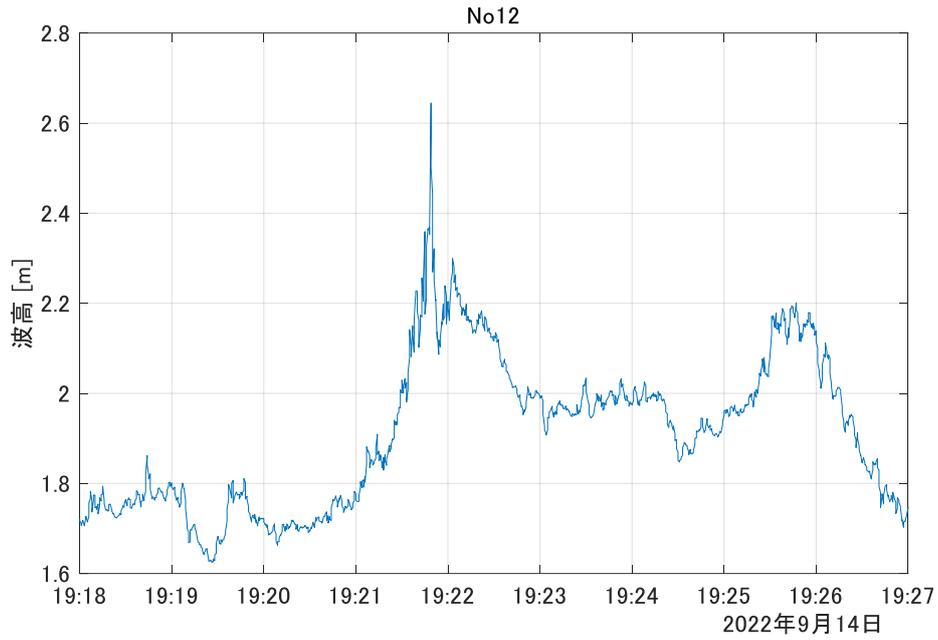


図 9-49 波高推定

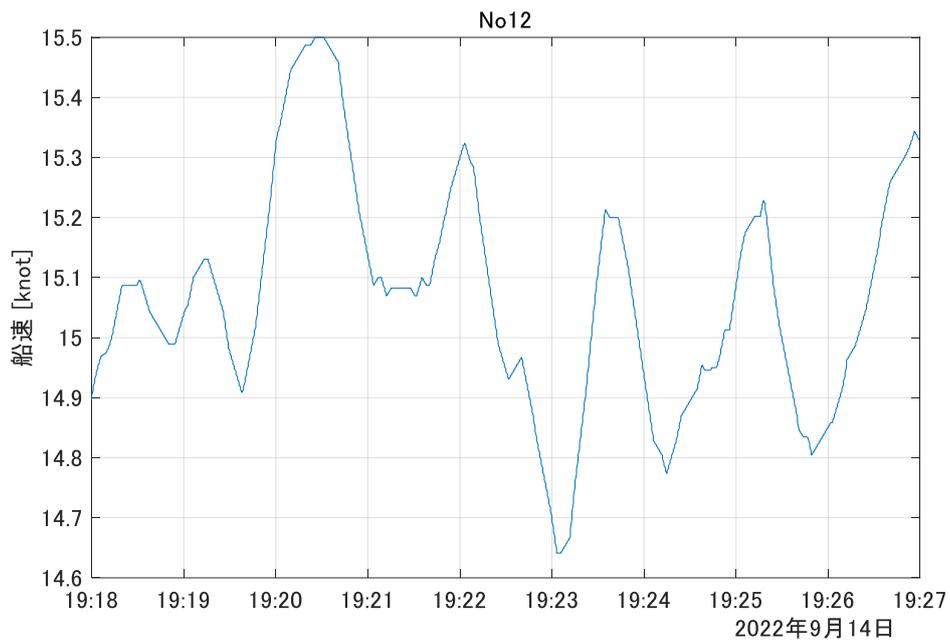


図 9-50 船速

この時は北東からの高波の影響を受けており、図 9-51 の通り左舷側の喫水変動が顕著に現れていた。

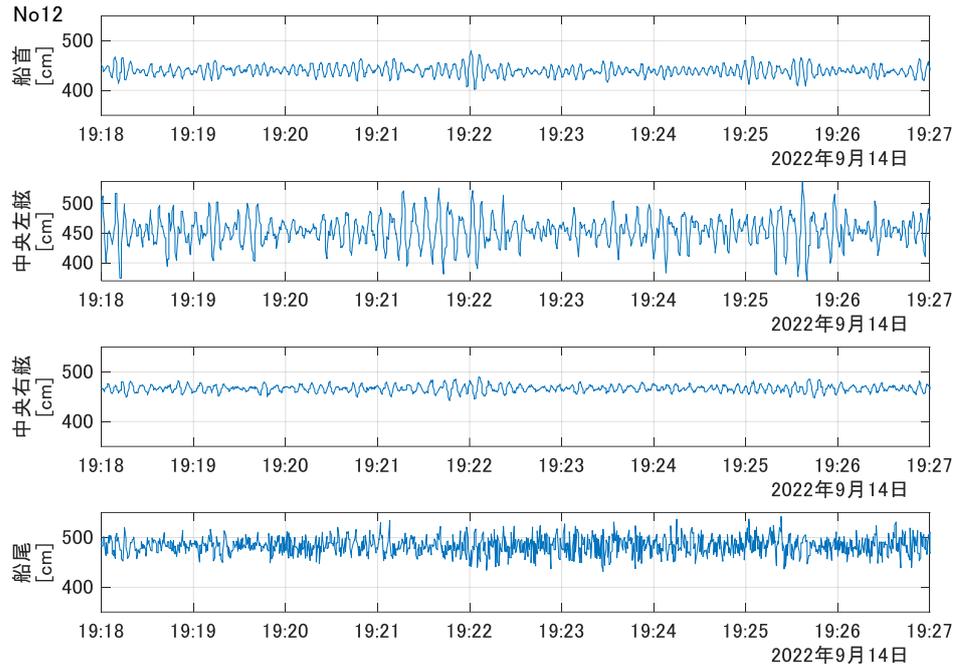


図 9-51 喫水 4 点の計測値

これらの結果より、縦揺れはそれほど大きくはないが小刻みな揺れが発生して時間と共に横揺れが大きくなる傾向から、このような状態を継続するとパラメトリック横揺れ現象へと発展する可能性があると言える。

次に、比較的平水な航海の場合に安全指標がどのような判定を行うか検証を行った。図 9-52 は表 9-1 No60 の航跡であり、前述の荒天時と比較するために縦・横揺れ角または喫水変動より比較的平水な航海であった約 7 分間のデータをもとに検証を行った。図 9-52 の赤線期間は下田沖を通過時の約 7 分間の航跡である。

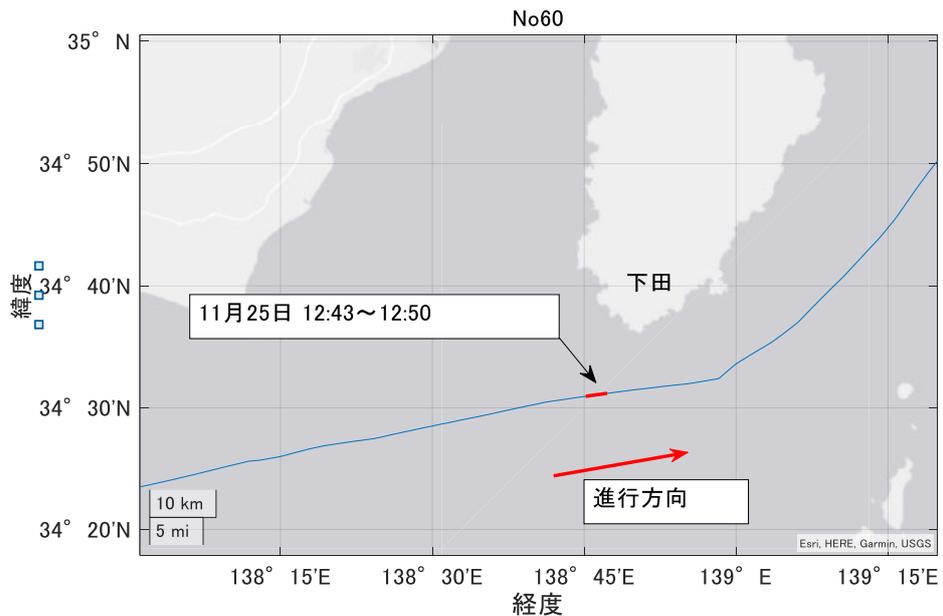


図 9-52 No60 神戸→東京 11/24 18:07～11/25 19:28

図 9-53 は 2022 年 9 月 14 日の波浪図である。

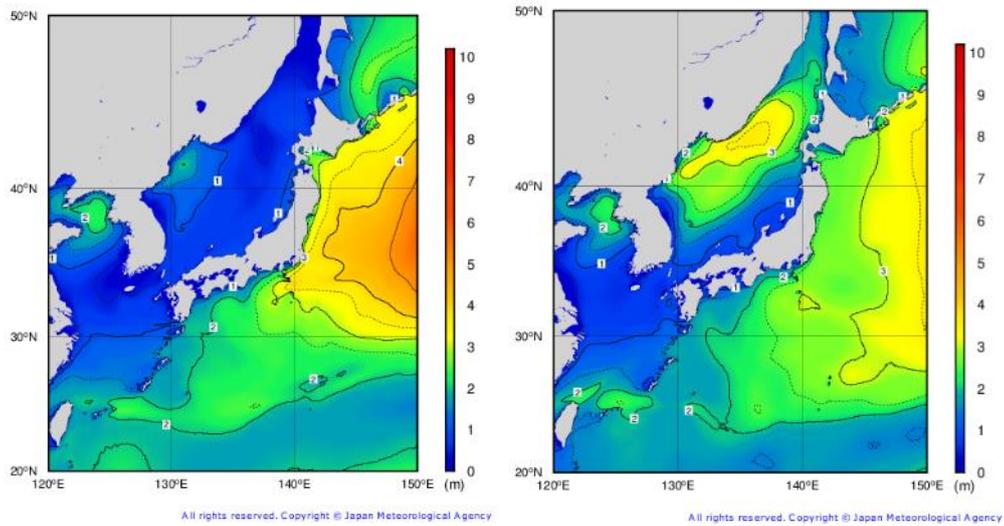


図 9-53 表 9-1 No60 神戸 → 東京航路の波浪図

図 9-54 は図 9-52 の赤線で示す期間の縦横揺れグラフであり、図 9-47 と比べると横揺れが非常に小さいことが分かる。

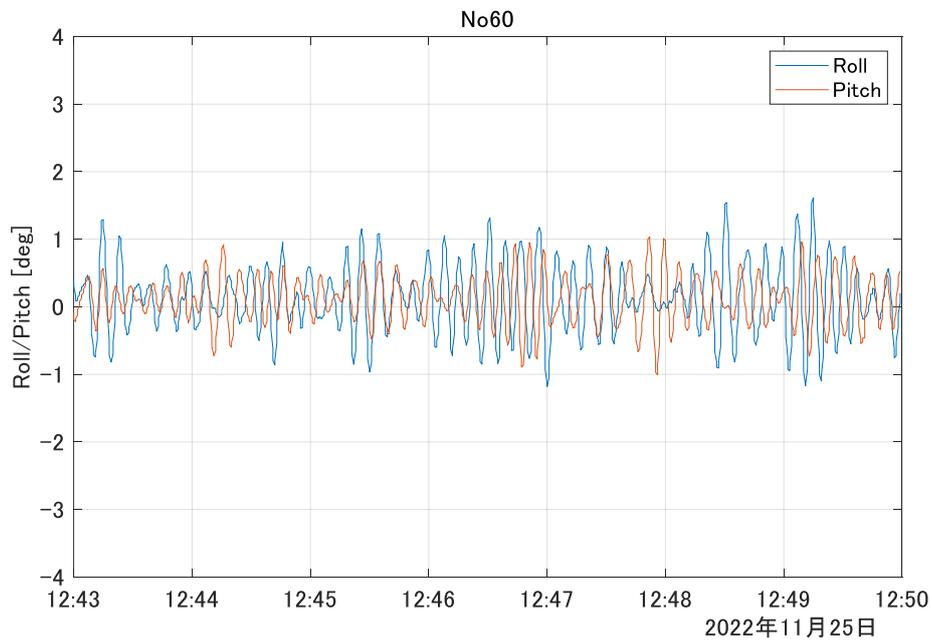


図 9-54 平水中の縦・横揺れ

図 9-55 は図 9-52 で示す期間の喫水計測値であり、図 9-51 に比べると変位が小さいことがわかる。

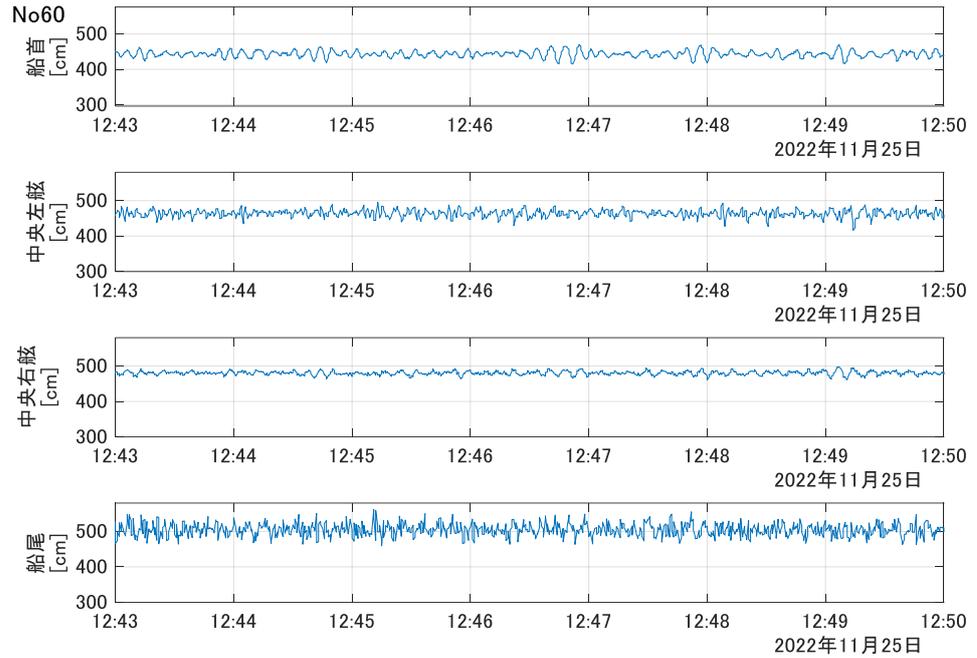


図 9-55 喫水 4 点の計測値

更に図 9-54 の縦・横揺れをもとに安全指標を求めたものが図 9-56 である。
 荒天時と比較すると SI 平均値、分散値ともに閾値より低く、安全の判定をしていることが分かる。

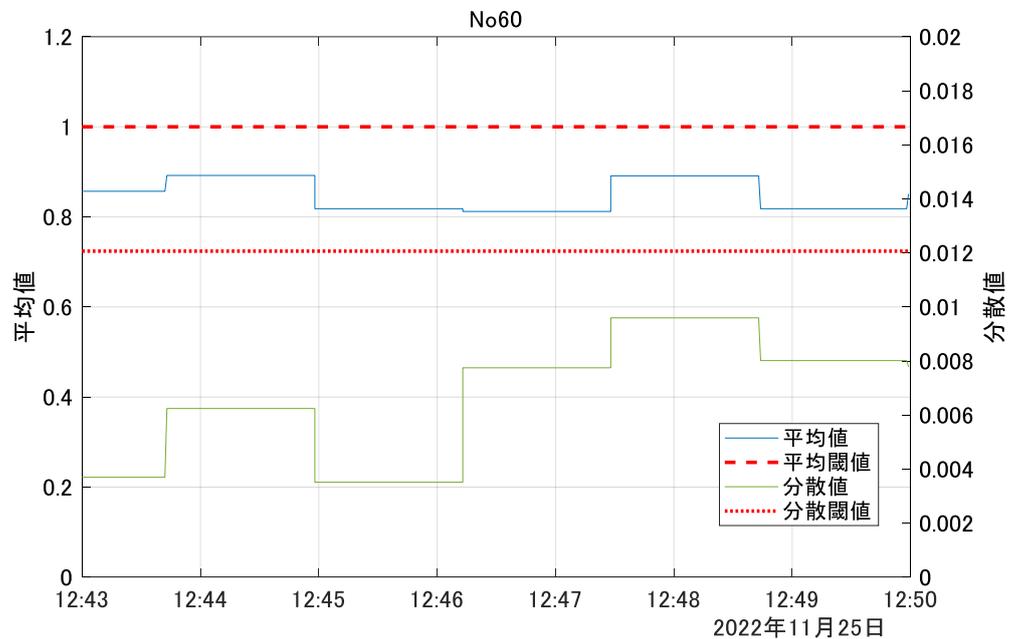


図 9-56 安全指標

検証の結果、船体の横揺れ運動や傾斜角度を総合的に評価することで、横からの高波を受けた場合などで船体が大きく揺れた場合は安全指標が注意または危険と判定し、平水時は安全と判定することを実海域データによる検証で確認する事ができ

た。

9.2.2 燃費改善指標の確立

本システムでは時々刻々変化する船速に対する馬力出力を速力馬力曲線にプロットしたグラフと、船底汚損の評価結果を示したグラフを燃費改善指標の機能として使用する。

1) 速力馬力曲線

速力馬力曲線には船種、排水量などにより変化する基準線を描き、それに対して現在の速力-馬力を示すことにより、馬力と燃費の変動を視覚的に確認する事ができるようにした。

速力馬力曲線の評価基準となる基準線は、EEDI draught の算出値を使用した。また、同じ速力での馬力増加率の表現としてシーマージン (%) を使用した。例えば平水中に対して荒天航行中は同じ速力を出そうとした場合の馬力損失が大きくなることもある。この損失を表現するために、基準線+シーマージン 25%から 150%の速力馬力曲線を描き、燃費に対する効率運航の見える化を図った。図 9-57 は速力馬力曲線の一例である。

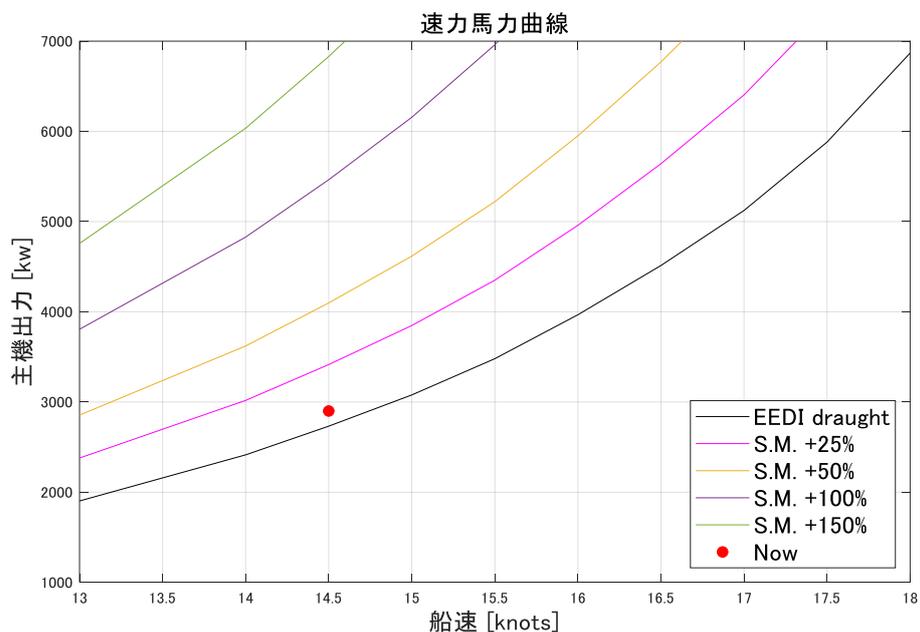


図 9-57 速力馬力曲線

2) 船底汚損の評価

船底汚損の評価は、平水中のある速度の馬力を基準として、日々変化する馬力上昇率を捉えて見える化した。

平水中と判定する項目として「縦揺れ加速度」、「横揺れ角」、「縦揺れ角」、「推定波高」とした。船速 13knots 以上で航行することを条件に各項目 10 分ごとに集計し、特定の閾値を下回ったときを平水中であると判定し、速力馬力の 10 分間の平均値をシステムのデータベースに記録した。

図 9-58 は船底汚損を月ごとに評価したグラフであり、EEDI Draught を基準とし、月を重ねるごとの変化を散布図で表現した。

これにより操船者は、例えば船底洗浄時からの船底汚損度合いを視覚的に状況把握することが可能となる。

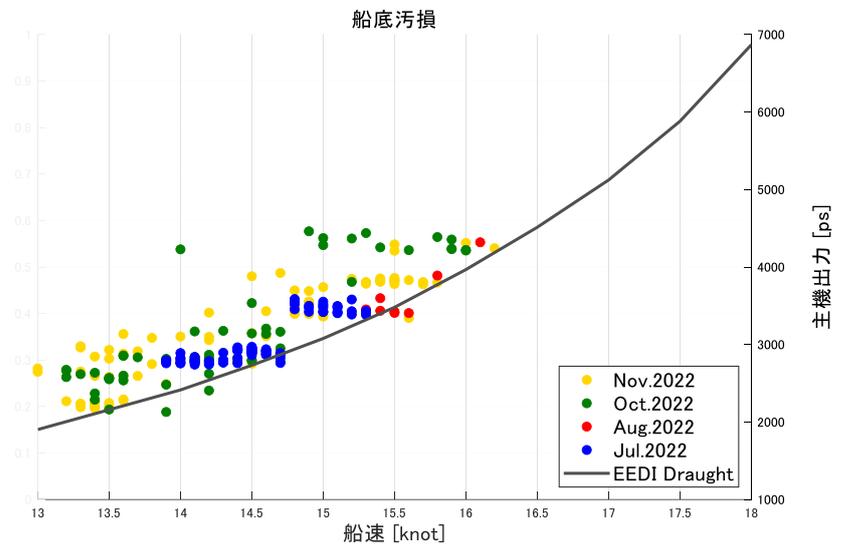


図 9-58 船底汚損

3) 機関汚損の評価

機関汚損の評価は、主機出力と主機軸馬力を比較して見える化した。

機関汚損の評価は、主機出力 (BHP) と主機軸馬力 (SHP) を比較して見える化した。10 分ごとに主機出力 (BHP) と主機軸馬力 (SHP) の 10 分間平均値をシステムのデータベースに記録した。

主機軸馬力 (SHP) に対して主機出力 (BHP) が大きくなったか以下の式で割合を示した。

$$(\text{主機出力} - \text{主機軸馬力}) / \text{主機軸馬力} \times 100$$

図 9-59 は主機出力 (BHP) と主機軸馬力 (SHP) の割合を表し、図 9-60 は年間単位の時系列グラフとして表現した。主機出力 (BHP) と主機軸馬

力（SHP）を比較して主機出力（BHP）の割合が大きくなったら機関汚損と判断する。

尚、9月13日から10月18日の期間で主機軸馬力が正常に計測できなかったため、図 9-59 ではこの期間のグラフは描画されていない。

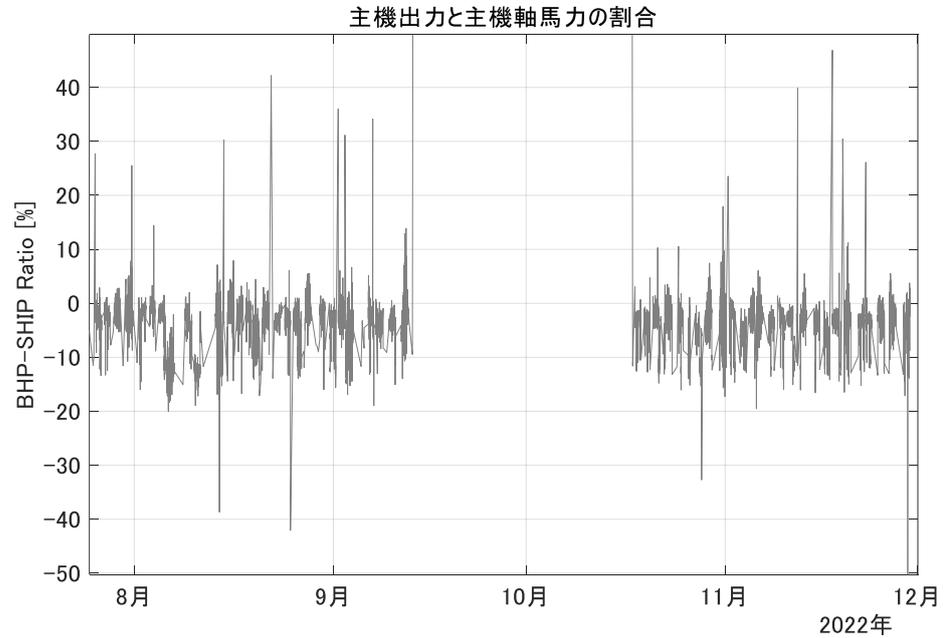


図 9-59 主機出力と軸馬力計の割合

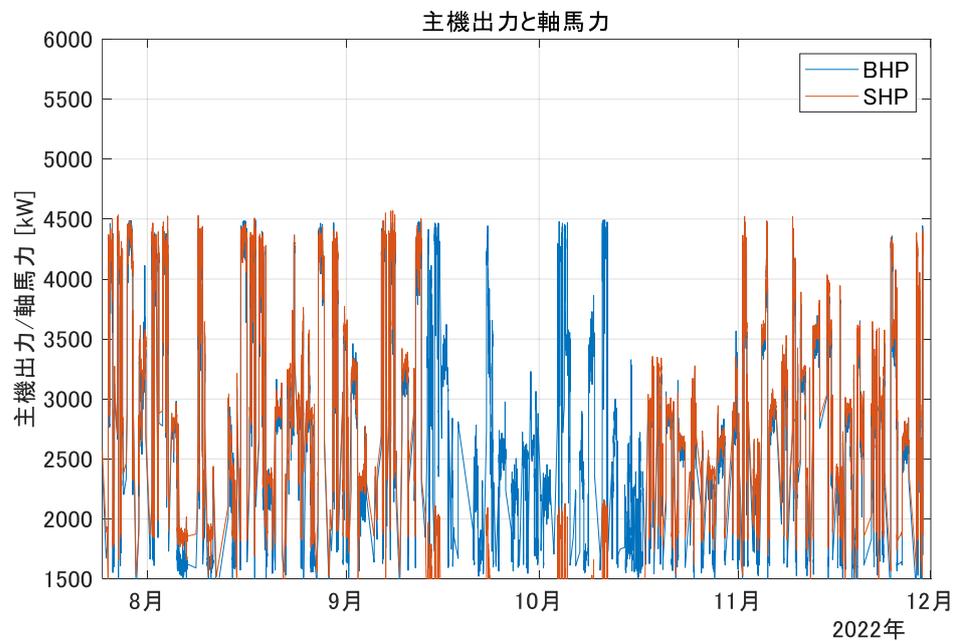


図 9-60 年間グラフ

9.3 製品版の完成

前年度の実施内容をもとに操船支援システムの試作機製作を行った。

操船支援システムは、波高計測用の喫水計、動揺計、演算ユニット、モニタで構成される。リアルタイムに縦・横揺れの計測及び波浪の予測を行い、モニタでグラフィカルに表示した。予め設定した安全指標により、今後遭遇するであろう波浪が危険と判断した際には可視可聴の警報を発令するようにした。

機関データをリアルタイムに取り込み、船体運動と波浪から導いた燃費改善指標との比較をモニタに表示した。

モニタの設置場所は操舵室、機関制御室等を想定し、必要に応じて様々な場所へ増設することが可能な設計にした。またタブレット端末で同様のモニタリングをすることも可能とした。

製品版の試作機は、昨年度より実船搭載の協力を得ている井本商運株式会社が運航する内航コンテナ船「ながら」に搭載した。

前年度に実船搭載試験を行った結果より、長期使用を想定した際の課題や演算装置の処理能力などを見直して、製品版用試作機の設計を行った。

9.3.1 システム構成図

本システムは大きく分類するとサーバ PC とクライアント PC の 2 つに分かれる。サーバ PC では「IMU 動揺センサ」、「GNSS アンテナ」、「DataLogger」、「Doppler Speed Log」、「バラスト制御装置」から各種データを取得する。取得したデータは随時データベースに格納される。クライアント PC ではサーバ PC が取得したデータを TCP/IP 通信またはデータベースを介した DB 通信で取得し、画面に表示する。リアルタイムに表示が必要なデータは TCP/IP 通信で取得し、ワントタイムや一定の周期で取得するデータについては DB 通信で取得する。

図 9-61 は本船に設置したシステム構成図である。演算部は全て操舵室に集約している。クライアント PC はノート PC とタブレット PC を用意し、船内 LAN、船内 Wi-Fi が接続できる環境であればどこでもデータを参照することができる。また LTE モジュールを使い、計測データを自動的にクラウドサービスにアップロードする。これにより計測データ収集の効率化を図った。

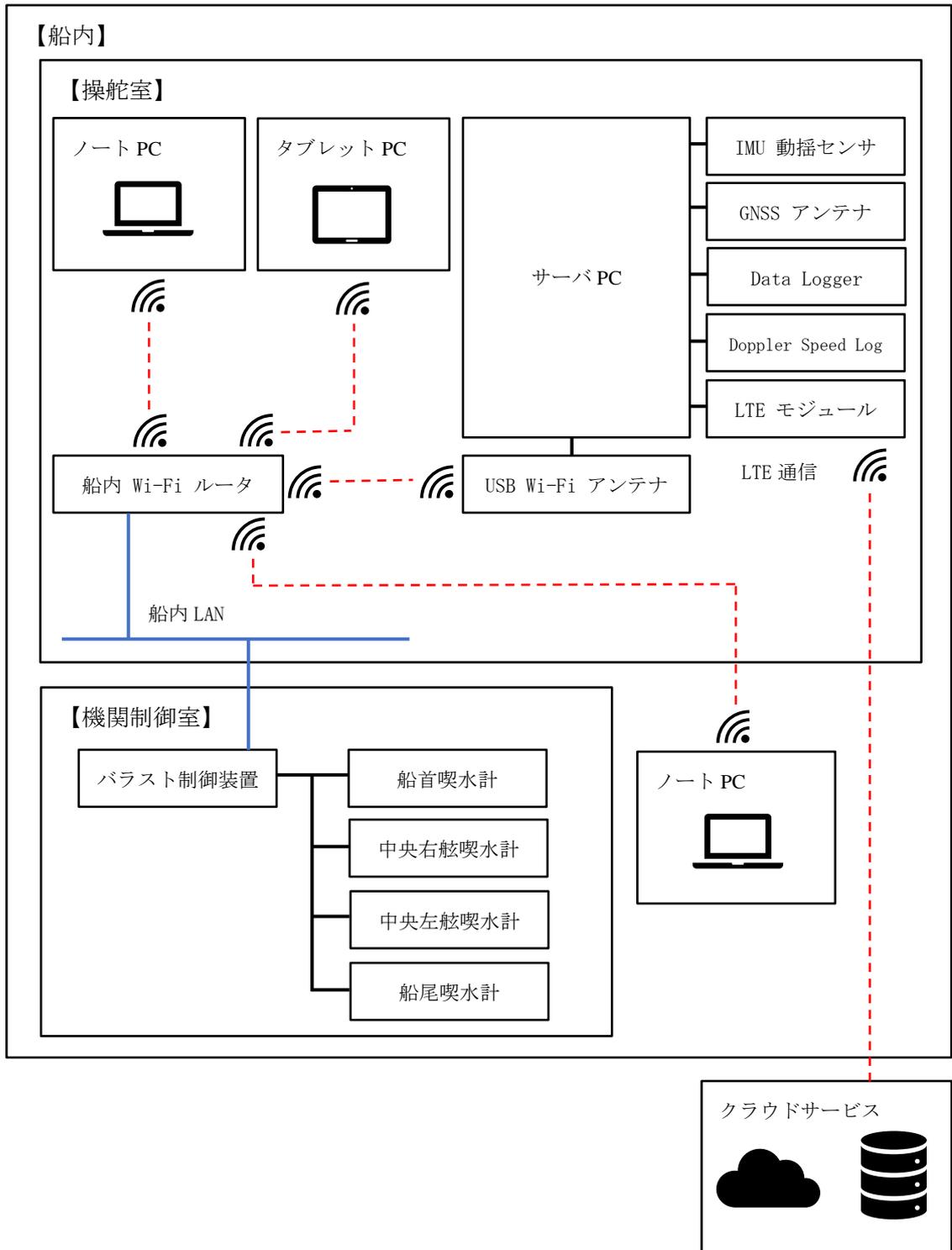


図 9-61 システム構成

図 9-62 は機器を搭載した本船の全景である。



図 9-62 実船搭載船「ながら」機器設置場所

9.3.2 製品のハードウェア設計

システム設計で作成したシステム構成図をもとにハードウェア設計を行った。

設置場所は前年度と同じくバラスト制御装置（宇津木計器納入）の盤内とし、盤内の空きスペース縦 500mm×横 400mm×高さ 200mm の大きさに収まるよう設計した。

1) ハードウェア構成

図 9-63 はシステム全体のハードウェア構成図である。

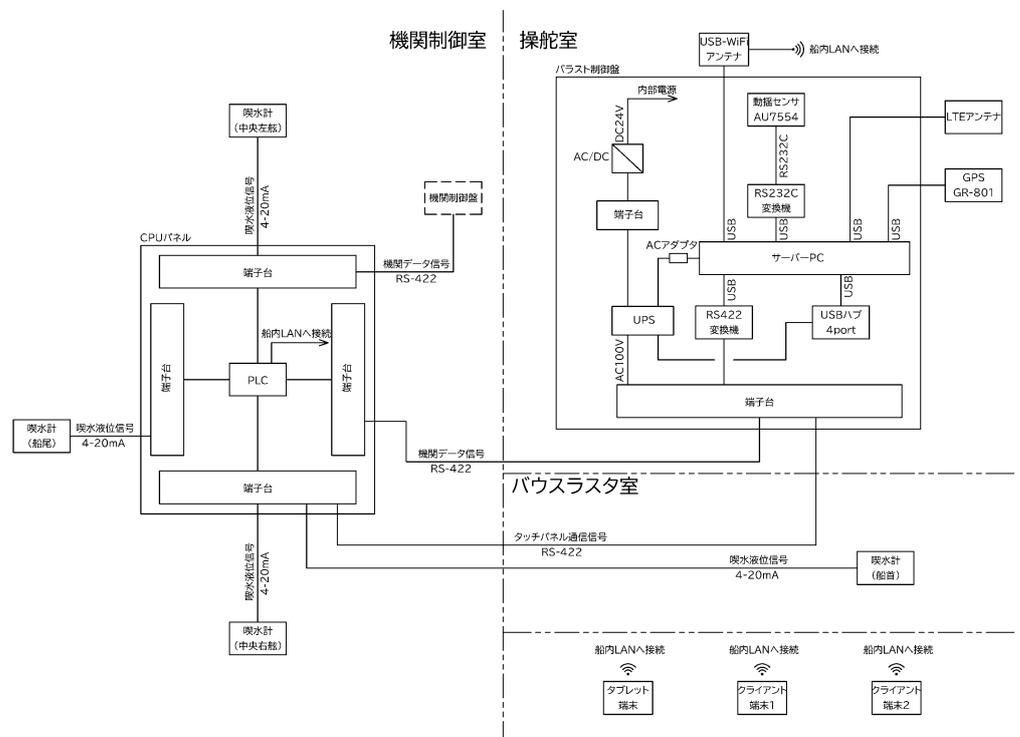


図 9-63 ハードウェア構成図

2) 構成機器一覧

製品版の構成機器一覧を表 9-5 に示す。

表 9-5 構成機器一覧

品名	型式	メーカー	数量
サーバ PC	Micro Server Gen10	HP	1
ノート PC	20Y7002CJP	Lenovo	2
タブレット PC	TFN-00012	Microsoft	1
動揺センサ	AU7554	多摩川精機	1
GNSS アンテナ	GR-801	u-blox	1
RS232C 変換器	REX-USB60F	RATOC Systems	1
RS422 変換機	UC485	ATEN	1
USB Wi-Fi アンテナ	WI-U2-433DHP	Buffalo	1
UPS	BZ50LT2	OMRON	1

※主要な構成機器のみ記載

9.3.3 製品のソフトウェア設計

9.3.1 システム構成図で作成したシステム構成図をもとにソフトウェア設計を行った。

本ソフトウェアはサーバ PC およびクライアント PC 上で動作する。

ソフトウェアの構成を図 9-64 および図 9-65 に表す。

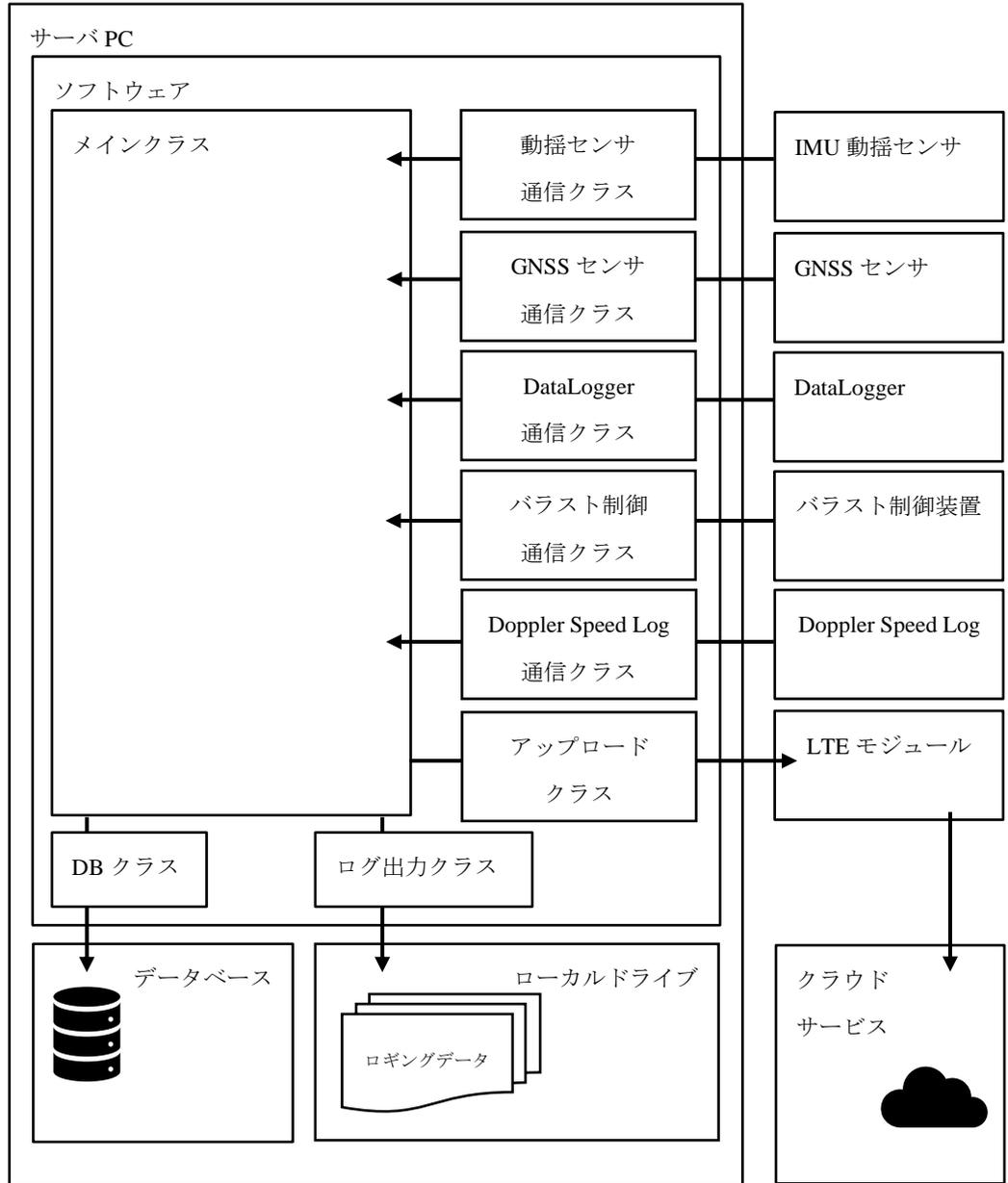


図 9-64 操船支援システム サーバーPC 構成図

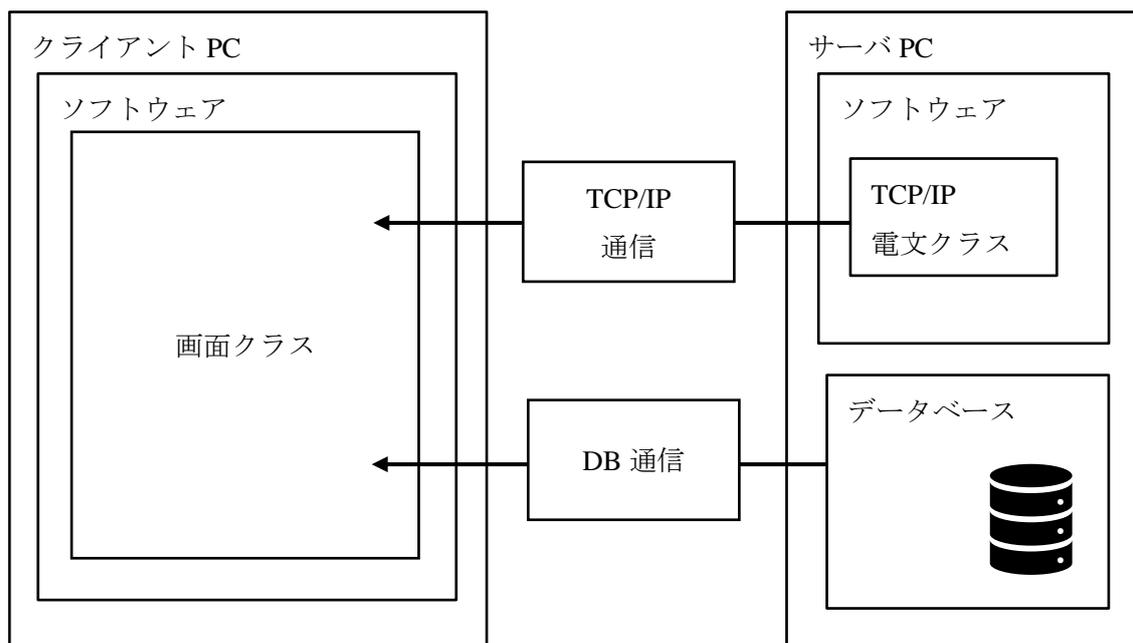


図 9-65 操船支援システム クライアント PC 構成図

9.3.4 製品概要

本製品は各種センサから取得した値をサーバ PC に集約を行い、集約したデータを元に燃費改善や安全指標の算出を行う。算出したデータはクライアント PC にて確認を行う。

1) 機器設置状況

9.3.2 ハードウェア設定をもとに本船に機器の設置を行った。設置状況を図 9-66 から図 9-75 に示す。

■ 操舵室



図 9-66 設置機器全体



図 9-67 サーバ PC



図 9-68 GNSS アンテナ



図 9-69 Wi-Fi アダプタ



図 9-70 RS422 変換器



図 9-71 RS232C 変換器



図 9-72 LTE モジュール



図 9-73 UPS

■クライアント PC



図 9-74 ノート PC



図 9-75 タブレット PC

2) 画面構成

本ソフトウェアの画面は以下の5つの画面により構成されている。

- ・安全指標画面
- ・燃費改善指標画面
- ・船底汚損画面
- ・機関汚損画面
- ・計測画面

3) 安全指標画面

本画面は計測した船体動揺のデータから横揺れ角、縦揺れ角および安全指標を表示し、安全指標が「注意」または「危険」と判断した場合に可視可聴の警報で通知する機能となっている。安全指標画面を図 9-76 に示す。



図 9-76 操船支援システム 安全指標画面

・安全指標 Stability Index:SI

本項目は SI(Avg)と SI(Var)の値によって「SAFETY (安全)」「CAUTION (注意)」「DANGER (危険)」の三段階表示を行う。三段階表示の画面項目を図 9-77 から図 9-79 に示す。

また、安全指標が注意以外の場合は表示エリアを点滅させ、警報音を鳴らして警告する。

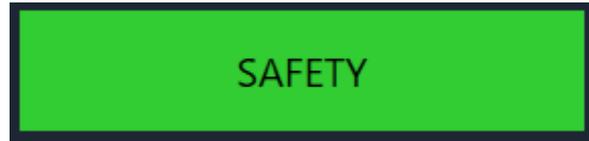


図 9-77 安全指標 (SAFETY)



図 9-78 安全指標 (CAUTION)



図 9-79 安全指標 (DANGER)

・安全指標の表示条件

安全指標の表示条件を表 9-6 に示す。

表 9-6 安全指標表示条件

表示項目	条件 1	条件 2	アラーム
SAFETY	SI(Avg) < 1 かつ	SI(Var) < 1	OFF
CAUTION	SI(Avg) < 1 かつ	SI(Var) ≥ 1	ON
DANGER	SI(Avg) ≥ 1	なし	ON

- ・安全指標 SI (Avg)

SI の平均を表示する。安全指標 SI (Avg) の画面項目を図 9-80 に示す。緑のバーが現在値を示し、縦の黒線が閾値を示す。



図 9-80 安全指標 SI (Avg)

- ・安全指標 SI (Var)

SI の分散を表示する。安全指標 SI (Var) の画面項目を図 9-81 に示す。緑のバーが現在値を示し、縦の黒線が閾値を示す。



図 9-81 安全指標 SI (Var)

- ・横揺れ角

現在の左右舷方向の傾斜角（横揺れ角）を表示する。横揺れ角の画面項目を図 9-82 に示す。



図 9-82 横揺れ角

- ・縦揺れ角

現在の船首尾方向の傾斜角（縦揺れ角）を表示する。縦揺れ角の画面項目を図 9-83 に示す。



図 9-83 縦揺れ角

・横揺れ角サイクルタイム

横揺れの周期を時系列に表示する。横揺れ角サイクルタイムの画面項目を図 9-84 に示す。



図 9-84 横揺れ角サイクルタイム

・縦揺れサイクルタイム

縦揺れの周期を時系列に表示する。縦揺れ角サイクルタイムの画面項目を図 9-85 に示す。



図 9-85 縦揺れ角サイクルタイム

・Wave Height (推定波高)

推定した現在の波高を表示する。推定波高の画面項目を図 9-86 に示す。



図 9-86 Wave Height

・Wave Period (推定波周期)

推定した現在の波周期を表示する。推定波周期の画面項目を図 9-87 に示す。

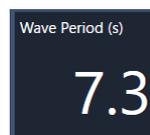


図 9-87 Wave Period

・ Wave Direction (推定波向き)

推定した現在の波向きを表示する。推定波向きの画面項目を図 9-88 に示す。



図 9-88 Wave Direction

・ 推定波高グラフ

推定した波高をグラフに時系列で表示する。推定波高グラフの画面項目を図 9-89 に示す。



図 9-89 推定波高グラフ

・予測波高グラフ

予測した波高をグラフに時系列で表示する。予測波高グラフの画面項目を図 9-90 に示す。

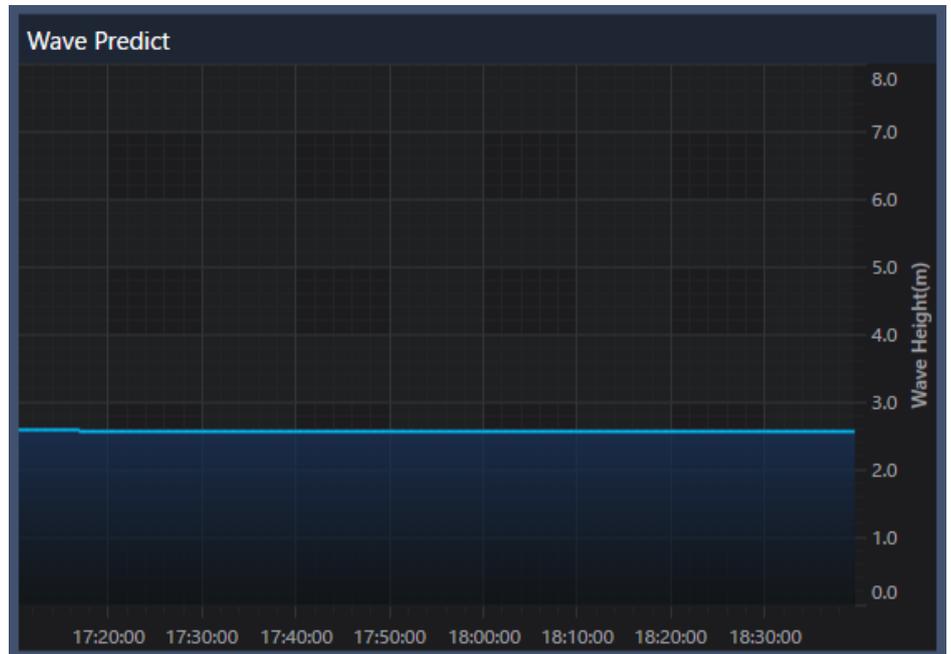


図 9-90 予測波高グラフ

4) 燃費改善指標画面

本画面は速力馬力曲線および GHG メーターを表示し、現在の航行が効率運転か否か判断するための情報を提供する。燃費改善指標画面を図 9-91 に示す。



図 9-91 操船支援システム 燃費改善指標画面

・速力馬力曲線グラフ

平水時の速力馬力のデータとして本船の海上公試運転時の EEDI Draught の値をベースとし、S. M. +25%から S. M. +150%の 4 段階にエリアを分け、現在の速力馬力をプロットすることにより、効率的な運転になっているかを判断する。速力馬力曲線グラフの画面項目を図 9-92 に、速力馬力曲線グラフの表示項目を表 9-7 に示す。

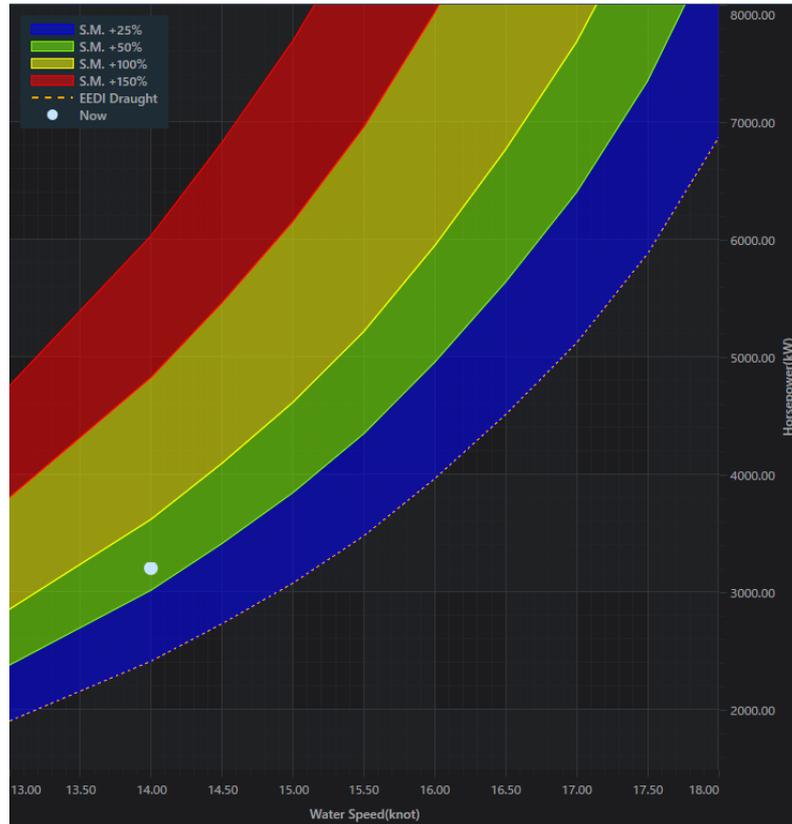


図 9-92 操船支援システム 速力馬力曲線グラフ

表 9-7 速力馬力曲線グラフの表示項目

表示項目名	表示内容
S. M. +25%	EEDI Draught を基準とした S. M. (シーマージン) を表示する。
S. M. +50%	
S. M. +100%	
S. M. +150%	
EEDI Draught	EEDI Draught の速力および馬力を表示する。
Now	現在の速力、馬力を表示する。

・GHG メーター（現在値）

燃費実績の格付け制度である CII の計算値を算出し、GHG メーターとして、現在の CII レーティングを表示する。GHG メーター（現在値）の画面項目を図 9-93 に示す。

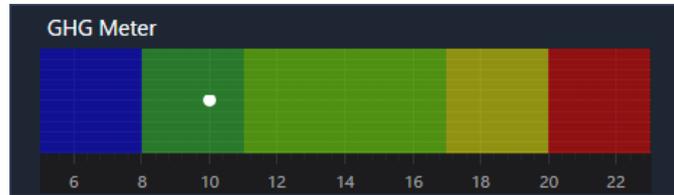


図 9-93 GHG メーター（現在値）

・GHG メーター（履歴）

現在および過去の GHG メーターの値を時系列で表示する。GHG メーター（履歴）の画面項目を図 9-94 に示す。

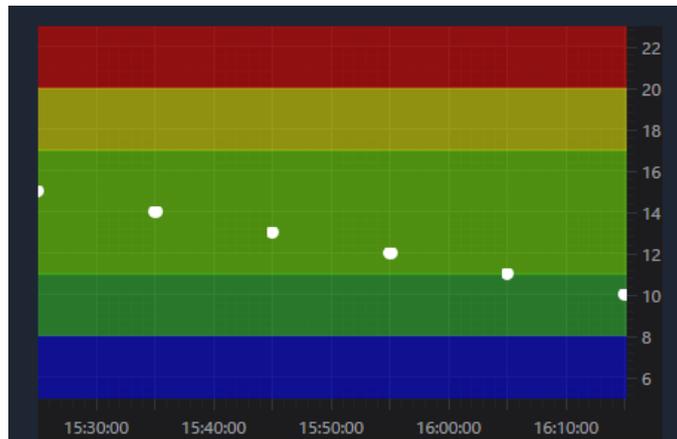


図 9-94 GHG メーター（履歴）

・速力馬力燃料消費情報

現在の速力、馬力、燃料消費情報を表示する。速力馬力燃料消費情報の画面項目を図 9-95 に示す。

ITEM	VALUE	UNIT
対地船速	13.8	knot
対水船速	14.0	knot
主機回転数	120.0	min-1
主機出力	3250.0	kW
主機軸馬力	3170.0	kW
主機負荷率	52.2	%
主機燃料油消費量 (A重油)	28830.0	L/h
主機燃料油消費量 (C重油)	13700790.0	L/h
発電機燃料油消費量 (A重油)	674966.0	L/h
発電機燃料油消費量 (C重油)	3148483.0	L/h

図 9-95 速力馬力燃料消費情報

5) 船底汚損画面

本画面では船底の汚損情報について表示する。船底汚損画面を図 9-96 に示す。



図 9-96 操船支援システム 船底汚損画面

・船底汚損グラフ

船底汚損情報をグラフとして表示する。船底汚損グラフの画面項目を図 9-97 に示す。

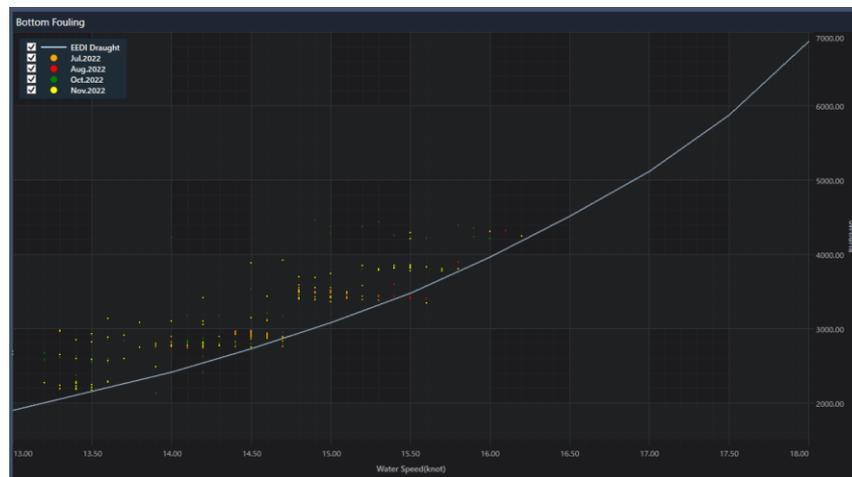


図 9-97 船底汚損グラフ

・船底汚損リスト

船底汚損データをリスト表示する。船底汚損リストの画面項目を図 9-98 に示す。

DateTime	Speed(Knots)	BHP(KW)	Acc.Z-Axis(m/s ²)	Roll(deg)	Pitch(deg)	WaveHeight(m)	ID
2022/07/24 0:00:00	15	3423	-9.637451171875	-0.2581787109375	0.1263427734375	0.672578839497789	642eb99a-29a8-438d-
2022/07/24 0:10:00	14.9	3422	-9.94873046875	-0.439453125	0.0054931640625	0.419054787336479	cac575cb-4d81-4402-
2022/07/24 0:20:00	14.8	3587	-9.7564697265625	0.15380859375	0.0054931640625	0.360036530680434	ef54b2b3-238a-49d5-

図 9-98 船底汚損リスト

6) 機関汚損画面

本画面では機関の汚損情報について表示する。機関汚損画面を図 9-99 に示す。



図 9-99 操船支援システム 機関汚損画面

・主機出力割合グラフ

主機軸馬力に対する主機出力の割合を時系列表示し、機関汚損を判断する情報を表示する。主機出力割合グラフの画面項目を図 9-100 に示す。

$(\text{主機出力} - \text{主機軸馬力}) / \text{主機軸馬力} (\%)$



図 9-100 主機出力割合グラフ

・主機出力主機軸馬力グラフ

主機出力 (BHP) と主機軸馬力 (SHP) の時系列データを表示する。主機出力主機軸馬力グラフの画面項目を図 9-101 に示す。

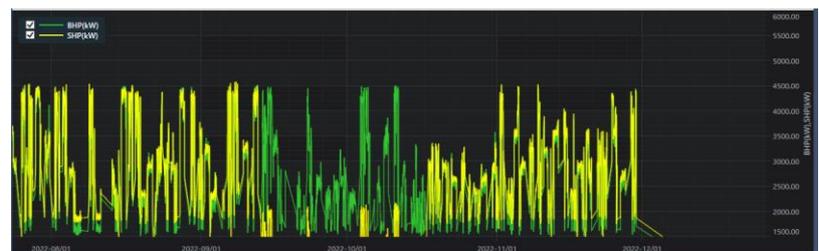


図 9-101 主機出力主機軸馬力グラフ

7) 計測画面

本画面は各センサからの計測値を表示する。計測画面を図 9-102 に示す。



図 9-102 操船支援システム 計測画面

・ IMU（動揺センサ）データリスト

動揺センサから受信した値をリアルタイム表示する。IMU（動揺センサ）データリストの画面項目を図 9-103 に示す。

ITEM	VALUE	UNIT
Roll	-0.63	°
Pitch	-0.14	°
Acceleration Xaxis	-0.09	m/s ²
Acceleration Yaxis	0	m/s ²
Acceleration Zaxis	-9.8	m/s ²
Angular Velocity Xaxis	-0.38	°/s
Angular Velocity Yaxis	0.23	°/s
Angular Velocity Zaxis	-0.65	°/s

図 9-103 IMU（動揺センサ）データリスト

・ GNSS データリスト

GNSS アンテナから受信した値をリアルタイム表示する。GNSS データリストの画面項目を図 9-104 に示す。

ITEM	VALUE	UNIT
緯度	35.4150048	
経度	139.5247679	
移動の速度	0.1	knot
移動の真方位	0	°

図 9-104 GNSS データリスト

- ・ 4点喫水値

バラスト制御装置から受信した4点喫水の現在値を表示する。4点喫水値の画面項目を図 9-105 に示す。

Draft		
ITEM	VALUE	UNIT
FORE. DRAFT	435.24	cm
MID. FRAFT(P)	481.06	cm
MID. FRAFT(S)	474.63	cm
AFT. DRAFT	487.93	cm

図 9-105 4点喫水値

- ・ 動揺センサ時系列表示

動揺センサから受信した値を時系列表示する。動揺センサ時系列表示の画面項目を図 9-106 に示す。

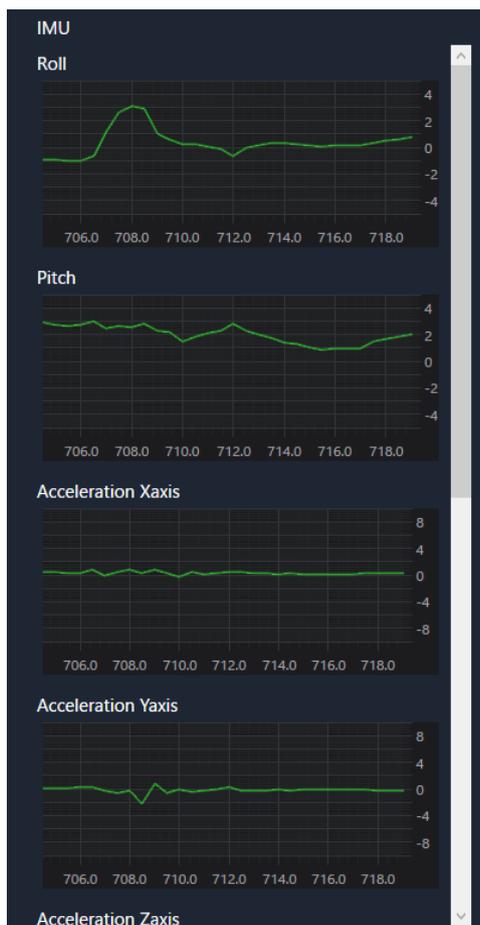


図 9-106 動揺センサ時系列表示

・ DOPPLER SPEED LOG (ドップラースピードログ)

DOPPLER SPEED LOG から受信した値をリアルタイム表示する。DOPPLER SPEED LOG (ドップラースピードログ) の画面項目を図 9-107 に示す。

DOPPLER SPEED LOG		
ITEM	VALUE	UNIT
対水船速-船首尾方向	14	knot
対水船速-横方向	13.8	knot
対水速度-状態	A	
対地船速-船首尾方向	13.8	knot
対地船速-横方向	4.1	knot
対地速度-状態	A	

図 9-107 DOPPLER SPEED LOG

・ DOPPLER SPEED LOG 時系列表示

DOPPLER SPEED LOG から受信した値を時系列表示。DOPPLER SPEED LOG 時系列表示の画面項目を図 9-108 に示す。



図 9-108 ドップラースピードログ時系列表示

9.4 製品版の評価試験

3) で完成した操船支援システムについて、前年度に行った試験機の実船搭載試験、評価試験からの改良点について統合評価試験を行い、仕様に基づき性能を満足したことを確認した。

9.4.1 評価試験結果

2020年度の事業で喫水計から波浪推定を算出することが立証できたため、本年度は前年度に実船搭載した機器をもとに製品版の製作を実施した。

前年度の実船搭載の経験から、波浪の推定を行う演算にPCの処理能力が必要である事、時系列解析するためにストレージ容量と信頼性のある機器を選定する必要があることが判明したため、製品では高スペックのサーバPCとストレージを準備することにした。

また、実船搭載機器と同様の環境を社内に構築することにより、ソフトウェアの改修をするたびに訪船する手間を無くして効率化を図った。またLTE回線を使い、実船搭載機で計測したデータをクラウド上にアップロードし、会社に居ながらデータを確認することが出来たため、効率よく開発に繋げることが出来た。

製品の評価としては、前年度の経験を活かしたこともあり、計測機器類からのデータを0.5秒のサンプリング周期で安定してデータ保存することができたこと、複数の演算処理をリアルタイムに行った中でもサーバPCのCPU使用率を50%以下に抑えることができたため、製品として使用できるレベルであると判断した。

9.5 報告書の作成

2021年度の実施内容に基づいて、報告書を作成した。

10 目標の達成状況

喫水計を使用した波浪推定結果から予測を行い、予測結果から主機回転数を落とすことにより無駄な燃料消費を軽減することが可能であることがわかった。神戸から横浜までの1航海あたりの燃料消費量を実測値とシミュレーション値を比較したところ、6.5%削減可能であることが分かり、燃料消費量を航海平均で5%以上削減するという目標を達成することができた。

11 2021年度の実施内容の概要

11.1 燃費改善効果の立証

荒天時と好天時の航海における燃料消費量を比較するための燃費改善シミュレーションソフトウェアを設計した。波高の予測結果により将来の荒天を推定し、荒天時に主機回転数を変更せずに航海した場合と、回転数を落として航海した場合の燃料消費量を比較した。

当初、燃費改善シミュレーションでは船体の縦揺れ角度変位を基準に回転数ごとの燃料消費量を算出する予定であったが、微小な縦揺れ角度では判定が困難であることが解り、縦揺れ角度ではなく縦揺れ加速度を使用して算出するよう設計変更をした。これにより、荒天海域を航海する際に、事前に回転数を落とすことにより10分あたり10リットルから20リットルの燃料を削減することが可能であることが分かった。また燃費改善シミュレーションの結果をもとに荒天時に予め回転数を落とすことにより、1航海あたり6.5%の燃料消費量の削減に繋がることがわかった。従って、本事業の最終目標である燃料消費量を航海平均で5%以上削減するという目標を達成することができた。

11.2 安全指標・燃費改善指標の確立

当初はばら積み船、自動車運搬船へ試験機を搭載して評価を行う予定であったが、実船搭載可能な対象船が見つからなかった為、コンテナ船を対象にした。

安全指標：

海難の原因として考えられているパラメトリック横揺れ現象に着目し、リアルタイムに計測した船体運動データより航行中の安全指標として「安全」、「注意」、「危険」の3つの指標を算出し操船支援システムで表現した。

燃費改善指標：

航行時の燃料消費量を把握することは非常に重要であるが、数値を見ただけでエコ運転であるか判断することは困難である。操船支援システムでは速力と馬力の関係を表す速力馬力曲線を一つの指標として、平水時のデータを基準に現在のエコ運転度合いをグラフで表現するようにした。

また、船底汚損、機関汚損による燃費の悪化を捉えるために、それぞれの評価結果を視覚的に表現し、燃費改善の一つの指標とした。

船底汚損は、船速に対する主機出力の変化を月ごとに表現し、月を重ねるごとに効率が悪くなる状況を確認し、船底を洗浄する時期を決める指標として有効活用できることがわかった。

機関汚損は主機軸馬力と主機出力を比較し、汚損度合いを評価することができた為、機関メンテナンス時期を決める指標として有効活用できることがわかった。

11.3 製品版の完成

前年度の反省点を活かし、限られたスペースにも配置可能な設計として完成させた。特に就航船に設置する場合は大きな制御盤などを追加搭載することは非常に困難であるため、既存の制御盤内への設置または空きスペースに設置できるよう、あらゆる環境に対応できるよう柔軟性を持たせた。

また操船支援システムでは様々な計測機器から膨大なデータを高速で収集する必要があり、PCについては高い処理能力が必要である事が前年度の経験から判明していたため、用途に応じたサーバPCを選定し処理能力に問題が無い事を確認した。複数端末を接続した接続確認を行い、船内 LAN 環境があれば船内のどこでも使用することが可能であることを確認した。

11.4 製品版の評価試験

前年度に実施した実船搭載の経験から必要最小限の機器構成として設計し、演算部のサーバPCは高負荷に耐えられるよう高いスペックの機種を選定した。

操船支援システムは膨大なデータを取り扱うためにサーバPCにデータベースを持たせ、サーバとクライアントの構成として負荷分散を行った。これにより操船者が使用するクライアント端末では計測・演算した結果をリアルタイムかつ滑らかに表現できることを確認した。

11.5 報告書の作成

令和3年度の実施内容について、報告書を作成することができた。

12 今後の予定

製品版としてハードウェア、ソフトウェアが完成したが、船舶は船種、サイズなどにより製品の設置環境が大幅に異なるため、様々な船種に汎用的に使用できるようにソフトウェアの見直しをする必要がある。

また、近年の半導体不足に対応するためにも、より入手性の良い部品を使用し、スリムかつスマートな設計を目指したい。

ソフトウェアについては、近年のビッグデータ活用に関する研究も捉えながら、船陸間通信を視野に入れた遠隔監視ができるシステムを構築していく予定である。

本事業では新型コロナウイルスの影響もあり、1種の船種のみでの評価しか行えなかった。

事業終了後は様々な船種・航路で実船搭載を実施することにより汎用的に使用できるシステム化の追求と性能評価を行う予定である。性能評価の終了時期は2025年4月頃を見込み、2026年4月頃には様々な船種に搭載可能なシステムを構築し、商品化を完了する予定である。

13 謝辞

本事業における研究開発は、一般社団法人日本船用工業会並びに、日本財団の助成事業による受託開発である。

本研究開発に於いて、井本商運株式会社には運航船である「ながら」への実船搭載の協力を頂き、また数多くのご助言とサポートも頂いた。
ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) リアルタイムナウファス 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網
- 2) 井関俊夫・大津皓平：IIR フィルタを用いた船舶操縦性指数のオンライン推定について，日本造船学会論文集，第 184 号，pp. 167-173，1998.
- 3) 北川源四郎：時系列解析入門，岩波書店，2005.
- 4) 高石敬史・増田光一・居駒知樹・嶋村祥嗣：船載式波浪情報提供システムの開発に関する研究，日本造船学会論文集，第 192 号，pp. 171-180，2002.
- 5) 気象庁 沿岸波浪実況図
(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index_wave.html)

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話 : 03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>