

平成 30 年 4 月 3 日

## 平成 29 年度報告書

# 船舶加速度・衝撃値データの統計処理等の理論化 及びその活用に関する研究

大島商船高等専門学校

商船学科 久保田 崇

神戸大学

海洋底探査センター

## 目次

1	はじめに	1
2	実験	2
2.1	実験装置	2
2.2	実験船舶および設置場所	4
3	解析	13
3.1	解析海域の選定	13
4	結果	15
4.1	波向別の加速度	37
4.2	波向別の針路・速力	37
4.3	波向別の三次元船体動揺	37
4.4	まとめ	55
5	曳航操船情報表示システム	56
5.1	システムの構成	56
5.2	Lab Viewによる表示プログラムの制作	57
5.3	表示器	60
5.4	検証と実践	64
6	今後の予定	64
	参考文献	68

## 1. はじめに

国内における貨物輸送事故は、少なからず発生している。平成 27 年度の海難事故の統計によると、貨物船の事故隻数は 2014 件とのことであり<sup>(1)</sup>、毎日約 7 件の事故が発生していることになる。その内訳では、プレジャーボートが圧倒的に多く 878 件であるが、貨物船そして曳航船を含んだ海難事故も 270 件発生している。当然ながらプレジャーボートの事例の中には貨物船・タグを巻き込んだ事故も有る。近年、日本の沿岸海域では、海運のみならず漁業（遊漁船）・マリンレジャー等幅広い分野にわたり、多種多様な活動が拡大し、沿岸では、AIS 搭載船舶だけでも 1 日平均約 5000 隻もの船舶が通航している。そして AIS を持たないプレジャーボートや漁船等の小型船も含めるとその通航隻数はさらに多く、船舶事故発生の可能性が高まっている。

本研究では、貨物輸送を行う際に不特定多数の者が、安全運航に有意となる資料として活用できる研究を行うことを目的としている。本年度共同研究では、昨年度に引き続き、東洋建設株式会社の協力を得て、揚土船「第二東揚号」、および曳航船「むろつ丸」の操船や運航に関するデータを採取した。本研究では、両船の航行中・作業中に発生した衝撃、振動、落下等が分かる加速度計の計測結果、外洋における波向きと GPS 計測器から得られた船体の動揺との関係性そして、曳航船と被曳航船の遠隔監視装置の開発について述べる。

本研究の解析は 2 種類実施する。解析①では、GPS スピードログ、GPS コンパスから得られた針路・速力、そして 3 次元動揺（ピッチ、ロール、ヒープ）を比較検証する。なお本実験航海は、内海を一切航行せず航海の大半が太平洋沿岸を航行する航海で、更には、大きな気象の崩れの無い航海であった為、海域別による解析は行わず、実験船舶と波向きによる解析を実施する。また解析②では、解析①の波向き別による加速度、パワースペクトラム分布の違いを比較し、考察する。更に、全航海を通して加速度に変化のあった部分について示し、原因を追究していく。

## 2. 実験

本研究では平成 29 年 4 月 2 日から 5 日の袖ヶ浦～鳴尾浜への曳航船と被曳航船の航海および平成 29 年 11 月 7 日から 14 日の那覇～袖ヶ浦の曳航船と被曳航船の航海の動静計測を行った。以下に使用した実験装置および実験海域について述べる。

### 2.1 実験装置

#### (1) NKKK 実験装置

船舶の動揺計測に使用した実験装置は米国ラスモンド社製 SAVER3D15 である。本機をメタルボックスで梱包し、保護した。そして曳航船の計 3 か所に固縛し設置した。図 1 に本機及び梱包について示す。



図 2-1 : 実験装置 (SAVER 3 D15)

平成 25 年度共同研究では本機の計測性能実験を実施し、入港時などの船体動揺の際における加速度 (3 軸) 及び周波数特性を観測できることを検証済みである。また昨年度についても本機の計測性能実験が行われ、入港時や作業時等 5 つの状況下の加速度 (3 軸) 及び周波数特性を観測することができた<sup>(2)</sup>

#### (2) 神戸大学実験装置

次に神戸大学が所有する古野電機製の GPS コンパス、GPS スピードログを 2 台設置した。図 2-2 に GPS コンパス、図 2-3 に GPS スピードログの構成について示す。



図 2-2 : 実験装置 GPS コンパス (SC-30)



図 2-3 : 実験装置 GPS コンパス (GS-100)

図 2-2、図 2-3 より、曳航船側には GPS コンパスを被曳航船には、GPS スピードログを設置した。両装置は周期が 1Hz すなわち一秒間隔で真針路、測位時刻 (UTC)、緯度経度、対地速度 (ノット)、進行方向 (真北)、日付 (UTC)、変位の向き (EW) 船首方位、ピッチ、ロール、ヒープなどを計測できることが確認できる。そして更に本実験では、神戸大で構築された曳航船と被曳航船の遠隔監視装置のリアルタイムの受信実験も実施するために、曳航船船橋に設置されたノート PC にデータを送信するために、被曳航船側のコンテナにはブルートゥースが接続され、受信した GPS データを無線で PC に送信するような機器構成となっている。図 2-4 に曳航船と被曳航船の遠隔監視装置実験の様子を示す。



図 2-4 : 遠隔監視装置

## 2.2 実験船舶および設置場所

### (1) 実験船舶

実験船舶について、図 2-5 に曳航船、2-6 被曳航船の外観を示す。また表 2-1、2-2 に各船の要目を示す。

表 2-1：曳航船要目

曳航船 むろつ丸 要目	
全長	38.00m
幅 (型)	9.60m
深さ (型)	4.50m
総トン数	273 トン



図 2-5：曳航船

表 2-2：被曳航船要目

被曳航船 第二東揚号 要目	
全長	85.00m
幅 (型)	28.00m
深さ (型)	5.50m
喫水	1.80m



図 2-6：被曳航船

図 2-7 に曳航船・被曳航船の配置を示す。図より被曳航船を曳航船で那覇港から袖ヶ浦港まで曳航する。曳航索はブライドルワイヤー、クッションロープ、ワイヤーロープの 3 種で構成し、2 船の間隔は約 300m を維持する。ただし港内など狭い水域においては全長を 200m 未満として航行する。

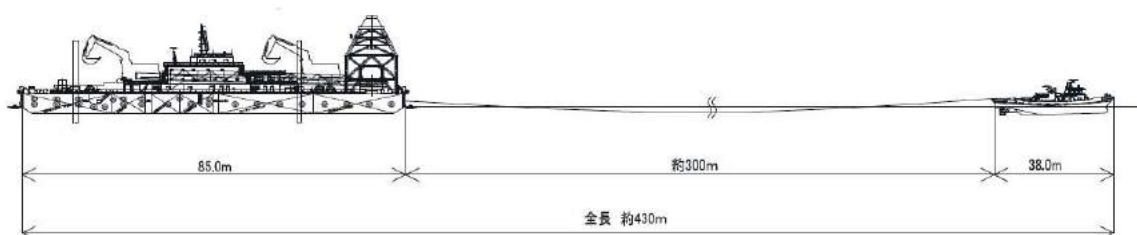


図 2-7：曳航船・被曳航船の配置

(2) 設置場所

図 2-8 に揚土作業時の実験装置の配置、そして図 2-9 に航行中の実験装置の配置を示す。なお本報告書の解析は航行中のみであるため機器配置は図 2-9 の配置となる。

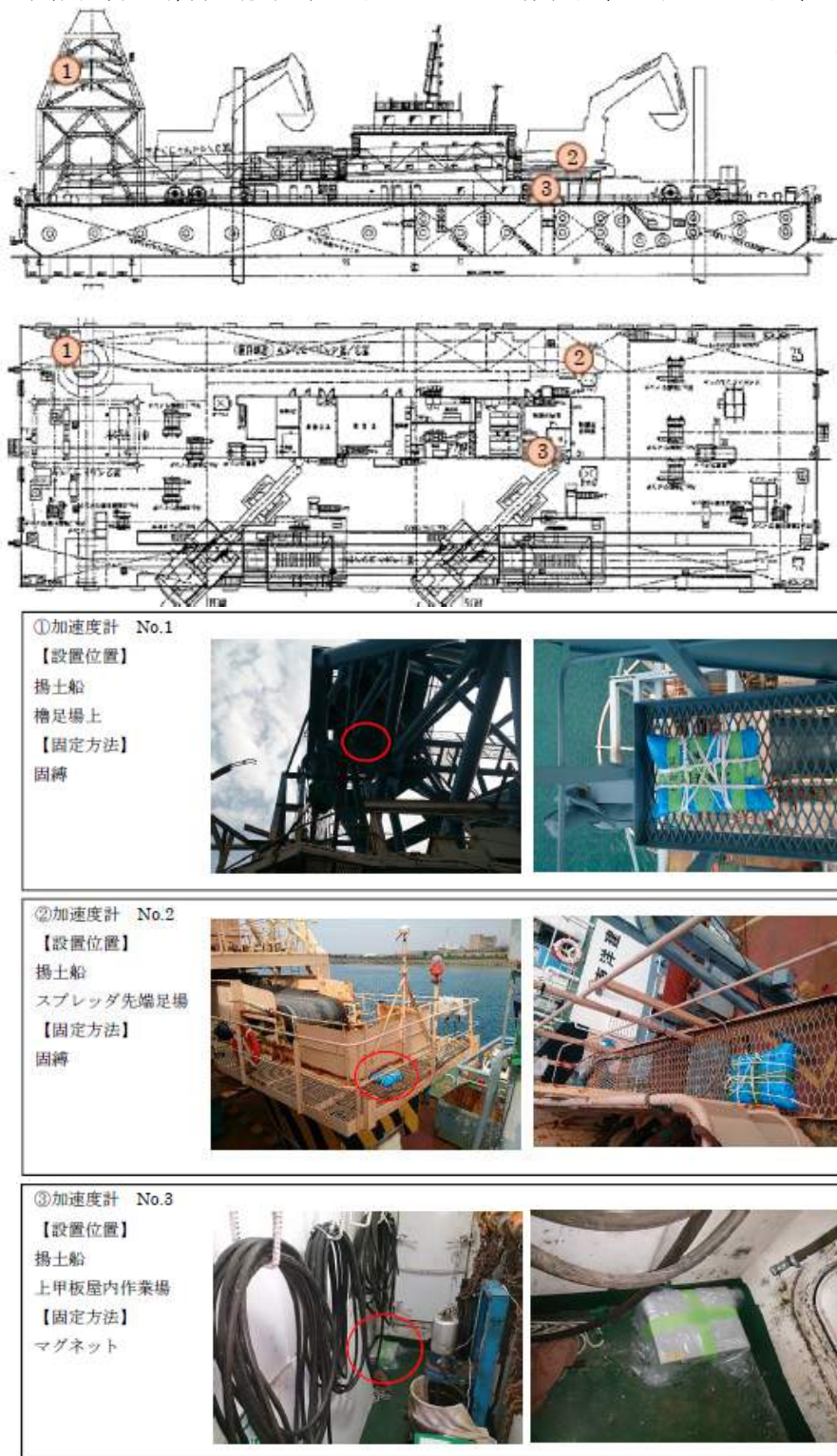
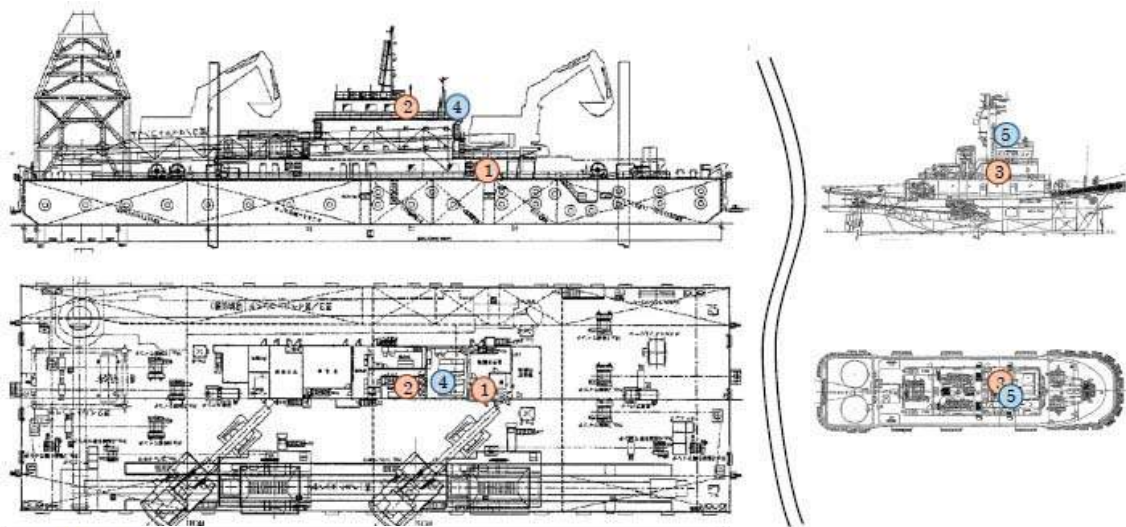


図 2-8：実験装置の配置（1回目）



①加速度計 No.1  
 【設置位置】  
 揚土船  
 上甲板屋内作業場  
 【固定方法】  
 マグネット

②加速度計 No.2  
 【設置位置】  
 揚土船  
 C甲板操作室入口  
 【固定方法】  
 マグネット

③加速度計 No.3  
 【設置位置】  
 曳船  
 Bride Deck  
 【固定方法】  
 結束バンド

④GPS コンパス No.1  
 【設置位置】  
 揚土船  
 C甲板手摺  
 【固定方法】  
 マグネット

⑤GPS コンパス No.2  
 【設置位置】  
 曳船  
 House Top  
 【固定方法】  
 結束バンド

GPS アンテナ                      データ通信無線アンテナ                      演算・記録・表示部

図 2-9 : 実験装置の配置 (2 回目)



実験装置の加速度計は、揚土作業中は被曳航船 3 機 (No.1,2,3) そして、航海中では曳航船に 1 機 (No.3)・被曳航船 2 機 (No.1,2)、計 3 機を設置した。また 1 回目は、GPS コンパスを 2 台使用し、曳航船の船橋裏、被曳航船の船橋前部にそれぞれ備え付けた。また 2 回目では、GPS コンパス、GPS スピードログ各 1 台 GPS コンパスは曳航船の船橋裏、GPS スピードログは被曳航船の船橋前部に備え付けた。更に曳航船船橋部には、前項で示した遠隔監視装置実験装置を備え付けた。

### (3) 実験海域

次に実験海域について述べる。実験は 2 回に分けて実施しており、1 回目の実験は平成 29 年 4 月 2 日～5 日までの袖ヶ浦から鳴尾浜までの航海であり、2 回目は平成 29 年 11 月 7 日から 15 日の那覇から袖ヶ浦の航海である。

航路の概要について図 2-10 に示す。



図 2-10：航路の概要

図 2-10 より、1 回目の実験は赤色で示した航路で、千葉県袖ヶ浦を出港し、太平洋沿岸を航行し、大阪湾に入り、西宮市鳴尾浜に入港する航海である。また 2 回目の実験では、沖縄県那覇港を出港し、奄美諸島を北上し、鹿児島県沖に到着後は、千葉県袖ヶ浦に入港するまで、太平洋沿岸をひたすらに航行する航海である。次に表 2-3、表 2-4 に回航計画を示す。

表 2-3 : 回航計画 (1 回目)

日付	時間	経路	距離(海里)
4月2日	0800	袖ヶ浦地区沖	80.0
4月2日	1900	石廊崎沖	32.5
4月3日	1200	御前崎沖	72.5
4月3日	2100	大王埼沖	82.5
4月5日	0000	潮岬沖	85.0
4月5日	1200	鳴尾浜	40.0

表 2-4 : 回航計画 (2 回目)

日付	時間	経路	距離(海里)
11月6日	0800	那覇港	-
11月7日	0200	沖永良部島	90.0
11月8日	0030	トンビ崎沖	112.5
11月9日	0130	佐田岬沖	125.0
11月9日	1030	都井岬沖	45.0
11月10日	1130	足摺岬沖	125.0
11月11日	0030	室戸岬沖	65.0
11月12日	1000	潮岬沖	85.0
11月13日	0030	大王埼沖	82.5
11月13日	0700	御前崎沖	72.5
11月13日	2300	石廊崎沖	32.5
11月14日	0800	袖ヶ浦地区沖	80.0

次に表 2-5 に 1 回目の気象・海象データ、表 2-6 に 2 回目の気象・海象データを示す。

表 2-5 : 気象・海象データ (1 回目)

	時刻	針路	速力	風向	風速	波向	波高
4月2日	0800	355	4.1	NE	6.0	NE	0.5
	0900	288	4.8	NE	7.0	NE	0.5
	1000	235	5.0	NE	5.0	NE	0.5
	1100	225	4.6	NE	5.0	NE	0.5
	1200	167	5.5	NE	5.0	NE	0.5
	1300	150	6.5	NE	5.0	NE	0.5

	1400	200	6.0	North	5.0	North	0.7
	1500	235	5.8	North	3.0	North	0.7
	1600	235	6.2	North	3.0	North	1.0
	1700	230	6.0	North	3.0	North	1.0
	1800	228	5.9	North	3.0	North	1.0
	1900	228	5.2	East	3.0	East	1.0
	2000	228	5.6	East	3.0	East	1.0
	2100	228	6.3	East	3.0	East	1.0
	2200	227	6.4	East	3.0	East	1.0
	2300	227	6.5	East	3.0	East	1.0
	2400	267	6.4	East	3.0	East	1.0
4月3日	0100	267	5.9	East	3.0	East	1.0
	0200	273	5.4	ESE	3.0	SE	1.0
	0300	273	5.7	ESE	4.0	SE	1.0
	0400	273	6.0	NW	7.0	SE	1.0
	0500	273	6.5	West	8.0	East	1.0
	0600	269	5.9	West	8.0	East	1.0
	0700	264	5.6	West	8.0	East	1.5
	0800	264	5.5	West	10.0	East	2.0
	0900	264	5.2	West	10.0	East	2.0
	1000	270	5.7	West	12.0	East	1.5
	1100	264	5.8	WNW	12.0	ESE	1.5
	1200	268	5.7	WNW	12.0	ESE	1.5
	1300	270	5.7	WNW	10.0	ESE	1.5
	1400	250	5.7	West	8.0	East	1.2
	1500	231	5.9	SW	8.0	East	1.0
	1600	227	5.9	West	8.0	East	1.0
	1700	223	5.8	West	8.0	East	1.5
	1800	223	5.7	West	5.0	SW	1.0
	1900	235	5.6	West	5.0	SW	1.5
	2000	235	5.0	West	5.0	SW	2.0
	2100	235	5.8	West	5.0	SW	2.0
	2200	235	5.8	West	5.0	SW	2.0
	2300	235	6.5	West	5.0	South	1.5

	2400	235	6.0	West	5.0	South	1.5
4月4日	0100	243	4.8	West	5.0	SE	1.2
	0200	230	4.8	West	5.0	SE	1.0
	0300	221	4.4	West	5.0	SE	1.0
	0400	221	4.1	West	6.0	SE	1.0
	0500	221	4.4	West	5.0	SE	1.0
	0600	221	4.5	West	5.0	SE	1.0
	0700	246	3.0	NW	7.0	SE	1.0
	0800	262	2.8	NW	5.0	SE	1.0
	0900	267	2.5	NW	5.0	SE	1.0
	1000	290	3.5	NNW	5.0	SE	1.0
	1100	294	4.0	West	5.0	ENE	1.0
	1200	293	4.5	West	6.0	West	1.0
	1300	295	5.1	West	8.0	West	1.0
	1400	303	5.7	West	8.0	West	1.2
	1500	315	4.6	West	8.0	West	1.2
	1600	317	4.4	West	8.0	West	1.2
	1700	317	4.3	West	5.0	West	1.0
	1800	317	4.3	West	5.0	West	1.0
	1900	317	4.2	West	5.0	West	1.0
	2100	312	4.0	West	8.0	West	1.0
2200	312	4.4	West	8.0	West	1.0	
2300	000	4.8	West	8.0	West	0.7	
2400	050	4.5	East	7.0	East	0.7	
4月5日	0100	155	3.9	SE	7.0	NW	0.7
	0200	150	3.8	SE	6.0	NW	0.7
	0300	002	5.5	East	6.0	East	0.7
	0400	002	5.1	East	6.0	East	0.7
	0500	345	6.8	East	6.0	East	0.7
	0600	040	4.5	East	4.0	East	0.5
	0700	030	3.6	NE	4.0	East	0.5
	0800	040	4.1	NE	7.0	East	0.5
	0900	040	4.1	NE	7.0	East	0.5
	1000	041	4.2	NE	7.0	East	0.5

	1100	041	3.8	NE	5.0	East	0.5
	1200	042	4.8	NE	3.0	NW	0.5

表 2-6 : 気象・海象データ (2 回目)

日付	時刻	針路	速力	風向	風速	波向	波高
11 月 7 日	1200	003	6.1	NE	4	NE	0.5
	1500	038	5.71	NE	8	NE	0.5
	1800	038	5.5	NNE	6	NNE	1.0
	2000	040	5.9	East	6	NE	1.0
11 月 8 日	0000	058	5.5	ENE	5	ENE	3.0
	0300	044	6	NE	6	NE	1.0
	0600	044	6	NE	6	NE	1.5
	0900	025	5.3	NNE	5	NNE	1.5
	1200	034	5.1	NE	8	NE	2.0
	1500	034	4.6	NNE	8	NNE	2.5
	1800	034	3.5	NNE	8	NNE	2.5
	2100	022	4	NNE	8	NNE	2.5
11 月 9 日	0000	042	4.7	North	5	North	2.0
	0300	036	4.8	North	9	North	2.5
	0600	008	3.7	North	10	North	2.5
	0900	026	4.6	NNE	10	North	3.0
	1200	034	5.7	North	8	NNW	3.0
	1500	017	5.3	East	4	East	2.0
	1800	039	6.6	ENE	10	ENE	2.0
	2100	036	6.3	ENE	5	ENE	2.5
11 月 10 日	0000	055	7.1	ENE	10	ENE	2.5
	0300	057	5.5	NE	10	NE	1.5
	0600	050	4.4	NE	10	NE	2.0
	0900	022	5.6	NNE	5	NNE	2.0
	1200	024	5.7	NNE	5	NNE	2.0
	1500	023	6.9		Calm	East	2.0
	1800	073	6.5	SSW	5	East	2.0
	2100	072	6.3	SW	8	NE	2.0
11 月 11 日	0000	064	6.4	SW	10	SW	2.0

	0300	045	7.2	SW	12	SW	1.7
	0600	040	6.2	NW	10	West	2.0
	0900	081	6.2	NW	8	NW	1.5
	1200	065	5	NNW	10	North	3.0
	1400	050	5	North	21	North	3.5
	1500	050	4.2	North	12	North	2.5
	1800	046	3.9	NE	12	NE	2.5
	2100	035	3.1	North	12	North	2.5
11月12日	0000	047	5	North	15	North	2.5
	0300	047	5.2	North	10	North	2.0
	0600	100	6.8	North	10	North	2.0
	0900	096	6.6	North	8	North	2.0
	1200	044	5.1	North	2	East	1.5
	1500	035	5.3	SW	2	SW	1.5
	1800	042	5.8	ENE	2	ENE	0.5
	2100	061	5.4	NNE	3	NNE	1.5
11月13日	0000	057	6.1	North	5	NNW	3.0
	0300	045	6.5	NW	10	NW	1.2
	0900	080	5.4	ENE	10	ENE	1.2
	1200	085	5.3	ENE	10	East	2.0
	1500	087	5	East	7	East	1.7
	2100	042	6.9	NE	5	NE	1.8
11月14日	0000	068	5.5	ENE	4	East	2.0
	0300	090	3.5	South	5	South	3.0
	0600	000	3.7	East	7	South	2.0
	0900	030	5.3	NW	6	NW	1.0

表 2-5、表 2-6 より、1 回目の実験は千葉から関西に向かう航海である為、針路の大半が南から西航、また 2 回目の実験では、沖縄から千葉に向かう航海である為、針路は大半が北から東航である。また気象は穏やかであるが、外洋である為、比較的波高は高い。特に 2 回目の航海は 11 月である為、波高は 2.0~3.0m と 1 回目の 4 月より高い。図 2-11 に日本沿岸の黒潮推測図<sup>③</sup>を示す。図 2-11 より、太平洋沿岸航行である為、黒潮の影響を受ける可能性があったが、トンビ崎沖北 50km 付近の一部以外は、黒潮の影響外であった。



図 2-11：黒潮推測図

### 3. 解析

#### 3.1 解析海域の選定

本実験航海は前項に示したとおり、那覇を出航後、全てが太平洋沿岸を航行している。その為、前年度の報告書のように、航行海域別に解析することが出来ない。また表 2-5、表 2-6 の気象・海象データより、荒天に遭遇することもなかった。そこで、今回は、曳航船、被曳航船が、外洋で受ける波向と船体動揺の関係について解析する。

##### (1) 波向と曳航船・被曳航船の関係

図 3-1 に曳航船・被曳航船の関係を示す。

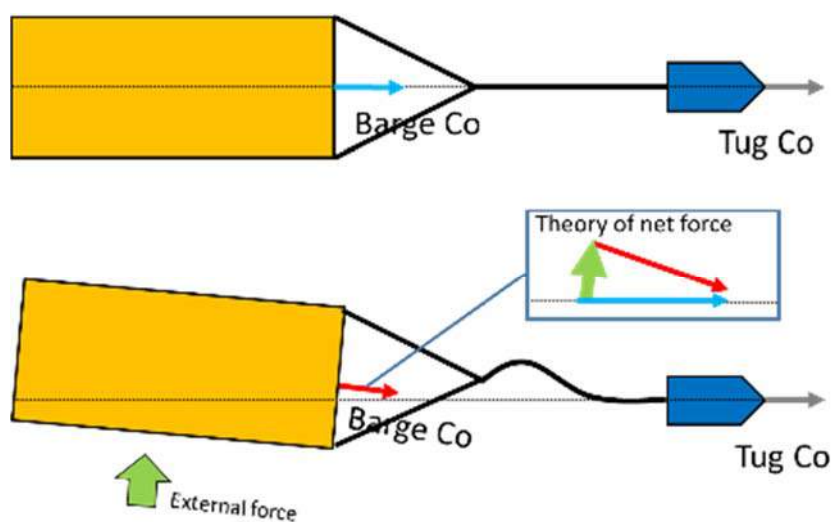


図 3-1：曳航船・被曳航船の関係

図 3-1 より、曳航船が被曳航船を真っ直ぐに曳航できている場合、被曳航船を繋ぐ曳航索は両船の船首尾線上にあり、弛み無く張っている状態となると考える。また、この場合、両船の針路・速力は大体同じとなる。しかし図のように、外力を受ける場合、曳航船は蛇行し、その結果、被曳航船を真っ直ぐに引くことが出来なくなり、曳航索は弛む。その時、両船の針路・速力にずれが生じる。三次元船体動揺については、外力を受けた瞬間に、動揺が大きくなることが予測される。

## (2) 波向の選定

外洋の航海であるため、うねりなどの影響も考えられるが、今回は風浪のみを対象とする。風浪は海上風により発生する波であり、真風向からやってくる。表 2-4 の気象・海象データの自船針路と真風向から、曳航船が受ける相対風向を求める。解析対象となる波向きは、8 方位法<sup>4)</sup>から、<000>、<045>、<090>、<135>、<180>、<225>、<270>、<315>とする。表より、丁度合致する波向、そして、誤差 5 度以内に収まる波向を選定した結果、以下の航行時間が該当した。

- ・波向<000>の場合； 11 月 10 日 0900、
- ・波向<045>の場合； 11 月 11 日 0600
- ・波向<090>の場合； 11 月 14 日 0300
- ・波向<135>の場合； 4 月 2 日 2200
- ・波向<180>の場合； 11 月 11 日 0300、
- ・波向<225>の場合； 該当海域無し
- ・波向<270>の場合； 11 月 13 日 0300、
- ・波向<315>の場合； 11 月 11 日 1500

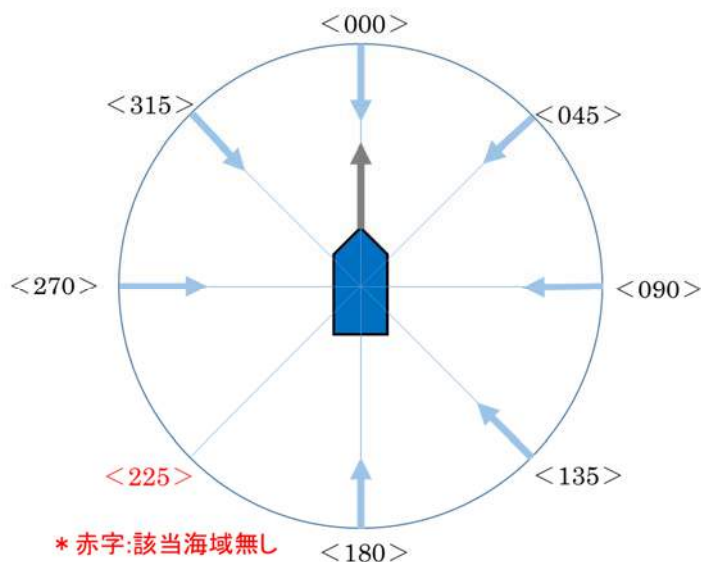


図 3-2：曳航船と波向

図 3-2 に曳航船と波向の関係を示す。図より、残念ながら<225>に該当する波向は求められなかったが、ほぼ 8 方位から受ける波向は観測できた。以上の波向から、加速度、針路・速力、そして、三次元動揺を解析する。



## 4. 結果

### 4.1 波向別の加速度

波向き別の航行海域における加速度計 SAVER3D15 の計測結果について述べる。データ解析に使用したソフトウェアはラスモンド社の SAVER X ware である。図 4-1 に解析に使用したフィルター条件を示す。

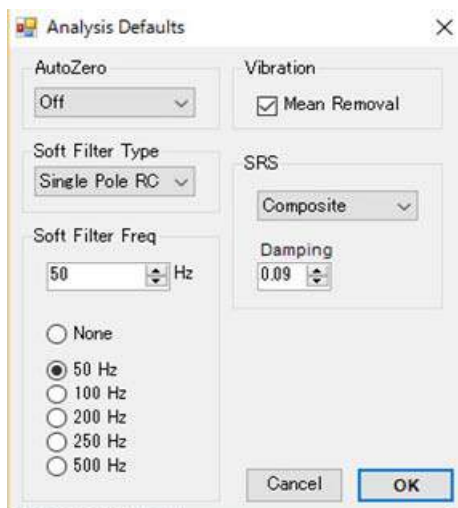


図 4-1：解析フィルター設定

図 4-1 より、解析に使用したソフトフィルターは 50Hz である。これはフィルターの中では一番粗いフィルターではあるが、50Hz 即ち 0.002 秒周期は貨物船に影響する加速度を観測には充分である。この条件にて解析を行った。はじめに全体の衝撃値の計測結果について解説する。解析により、加速度計で計測した衝撃 (Shock)、振動 (Vibration)、落下 (Drop) のイベントを発生した毎に計測する。

#### (1) 衝撃 (Shock) の計測結果

図 4-1(a)に 1 回目の航海の加速度計 No.1 の計測結果、図 4-1(b)に 1 回目の航海の加速度計 No.2 の計測結果、図 4-1(c)に 1 回目の航海の加速度計 No.3 の計測結果を示す。

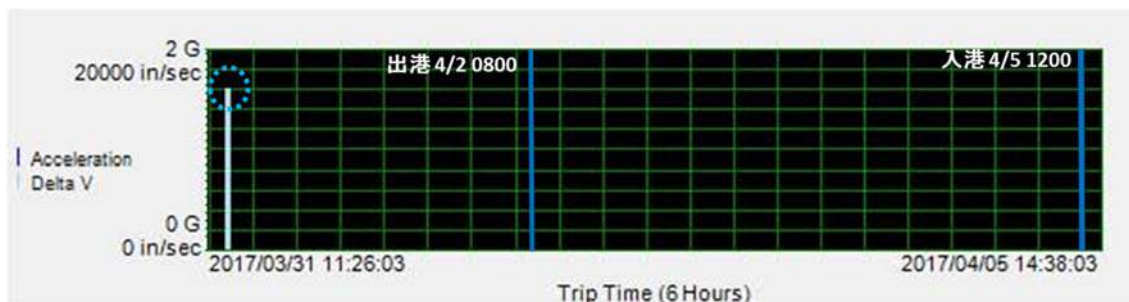


図 4-1(a)：衝撃 (Shock) の計測結果 (No.1 加速度計) 1 回目



図 4-1(b) : 衝撃 (Shock) の計測結果 (No.2 加速度計) 1 回目



図 4-1(c) : 衝撃 (Shock) の計測結果 (No.3 加速度計) 1 回目

各図より、各加速度計の計測時間が異なる為、各時間軸が異なるが図中青棒で囲まれた内側が航海中を表している。図 4-1(a)より、No.1 加速度計に開始約 2 時間半後の 3 月 31 日 1400 付近に衝撃を観測している。しかし図 4-21(b)、図 4-1(c)において、どの時刻にも衝撃を計測していないため、曳航船への衝撃ではなく、設置時の衝撃であると考える。

次に図 4-2(a)に 2 回目の航海の加速度計 No.1 の計測結果、図 4-1(b)に 2 回目の航海の加速度計 No.2 の計測結果、そして図 4-1(c)に 2 回目の航海の加速度計 No.3 の計測結果を示す。



図 4-2(a) : 衝撃 (Shock) の計測結果 (No.1 加速度計) 2 回目



図 4-2(b) : 衝撃 (Shock) の計測結果 (No.2 加速度計) 2 回目



図 4-2(c) : 衝撃 (Shock) の計測結果 (No.3 加速度計) 2 回目

図 4-2(a)より、No.1 加速度計に開始約半日後の 11 月 5 日 1400 付近に衝撃を観測した。しかし図 4-2(b)では、衝撃の計測は無い為、被曳航船全体の衝撃ではなく No.1 付近の上甲板作業場付近での加速度計の設置時の衝撃であると考え。また図 4-2(c)においては、航行中に多数の衝撃を観測している。これは曳航船に積まれた No.3 加速度計が波浪の影響により衝撃を受けていると考える。その根拠は次に示す振動の実効値<sup>(5)</sup>(RMS: root mean square) の計測結果で明白となっている。

(2) 振動 (Vibration) の計測結果

次に振動の計測結果を示す。図 4-3(a)に 1 回目の加速度計 No.1 の計測結果、図 4-3(b)に加速度計 No.2 の 1 回目の計測結果、そして図 4-3(c)に 1 回目の加速度計 No.3 の計測結果を示す。

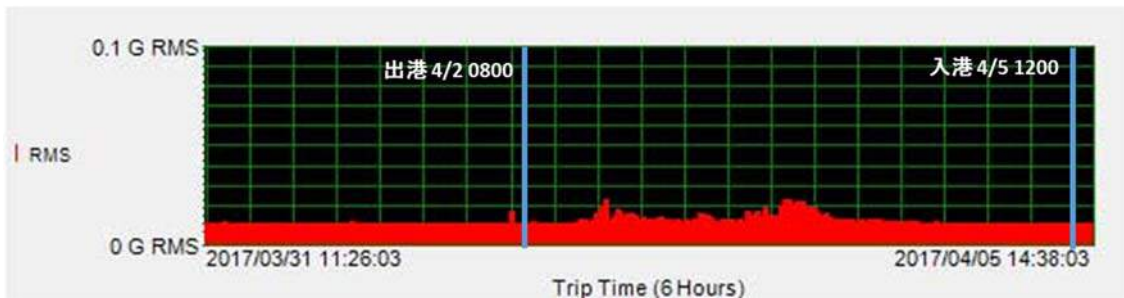


図 4-3(a) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.1 加速度計) 1 回目

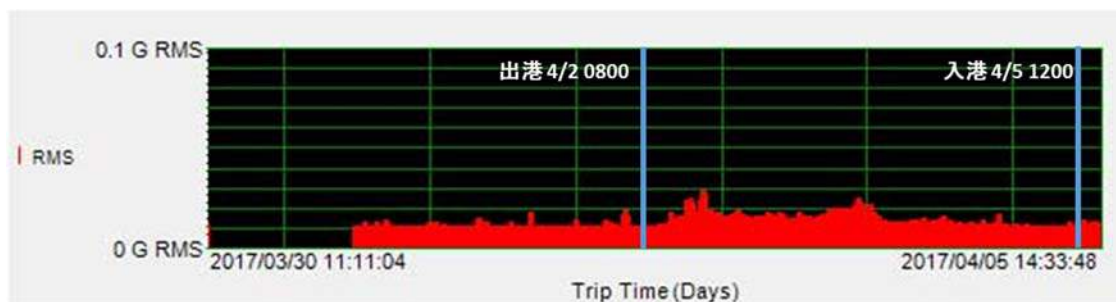


図 4-3(b) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.2 加速度計) 1 回目



図 4-3(c) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.3 加速度計) 1 回目

図 4-3(a)、図 4-3(b)、図 4-3(c)より、全体の振動の計測結果について、開始から 0.01RMS 程度振動を受けている。また大きな特徴として 4 月 3 日 2000 前後、本航海で一番強い風浪 2m を受けた大王崎付近で、各計測機で最も大きな振動を受けているところである。その振動は曳航船に設置された No.3 加速度計が最も大きく、被曳航船に設置された No.1、No.2 加速度計では小さかった。

次に図 4-4(a)に 2 回目の加速度計 No.1 の計測結果、図 4-4(b)に加速度計 No.2 の 1 回目の計測結果、そして図 4-4(c)に 1 回目の加速度計 No.3 の計測結果を示す。

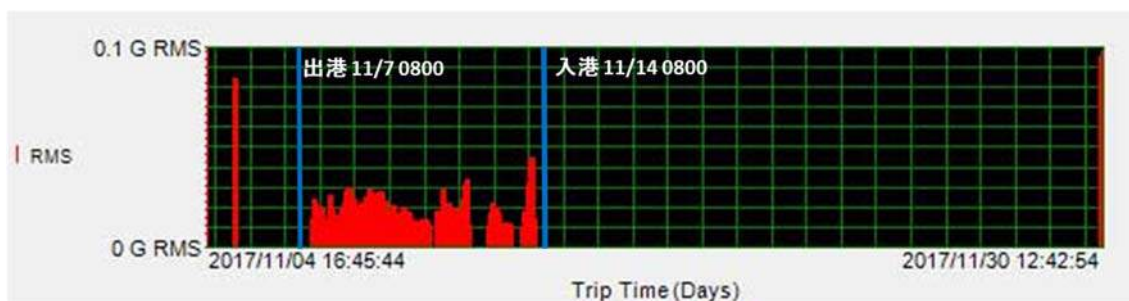


図 4-4(a) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.1 加速度計) 2 回目

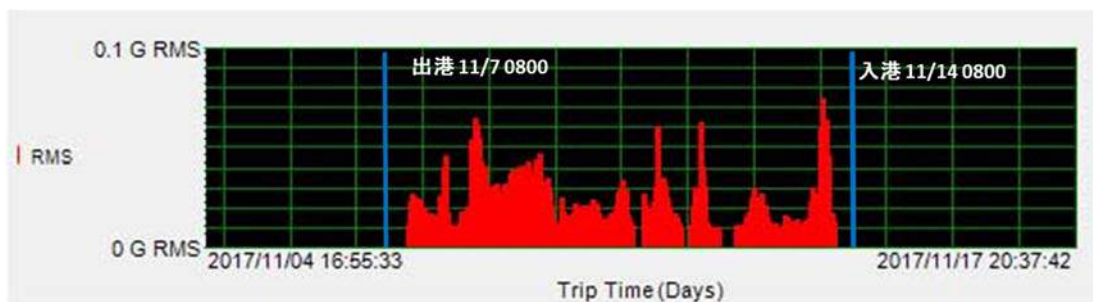


図 4-4(b) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.2 加速度計) 2 回目

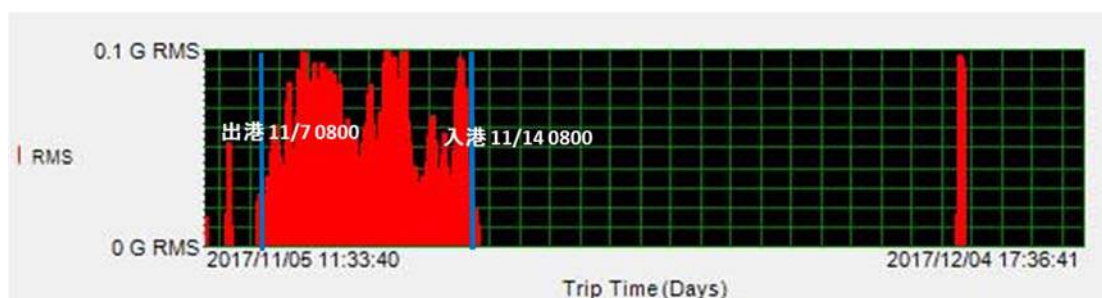


図 4-4(c) : 振動 (Vibration) の計測結果 (No.3 加速度計) 2 回目

図 4-4(a)、図 4-4(b)、図 4-4(c)より、航海中に大きな振動を継続的に計測しており、各加速度計の衝撃を受けた時期は合致しているため、曳航船・被曳航船が同時に波の影響を受けたと考える。特に曳航船の振動は大きく、図 4-2(c)のように曳航船設置の No.3 の加速度計の衝撃は被曳航船設置の No.1,2 よりも大きい振動を計測した。

### (3) 波向<000>における加速度と加速度スペクトラム密度

次に波向き別の 3 軸の振動時間波形を示す。図中の赤色波形は舷方向 (X 軸方向)、緑色は船首方向 (Y 軸方向)、黄色は上下方向 (Z 軸方向) の加速度の変化を示す。時間軸は約 10 分である。まずは図 4-5(a)に<000>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-5(b)に No.2、図 4-5(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。

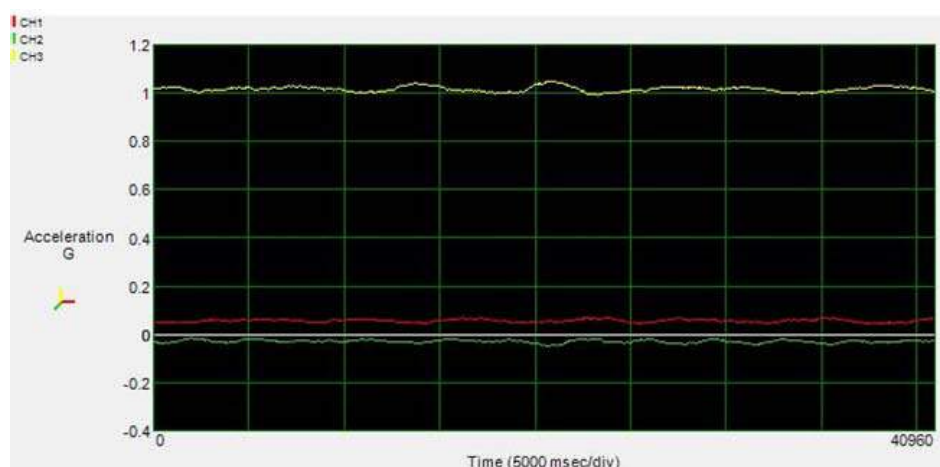


図 4-5(a) : 波向<000>における振動 (No.1 加速度計)

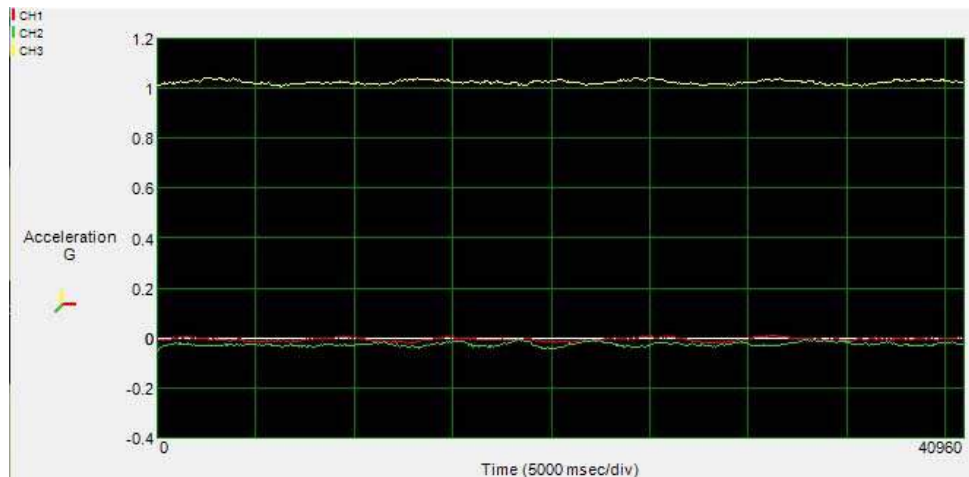


図 4-5(b) : 波向<000>における振動 (No.2 加速度計)

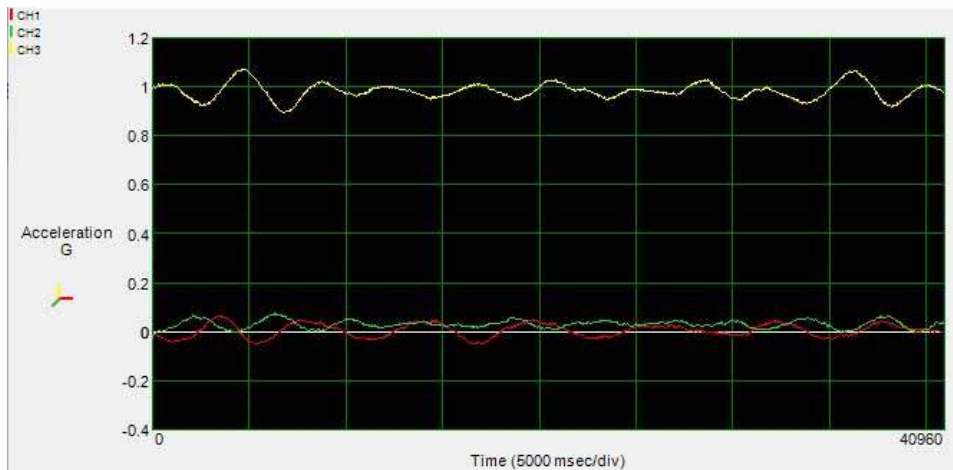


図 4-5(c) : 波向<000>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-5(a)、図 4-5(b)より、波向<000>における加速度の変動は一昨年度の内海の結果よりは変動はあるものの、変化は小さい。これは被曳航船が非常に安定していることの表れである。また図 4-5(c)より、曳航船の船体上下の加速度の変化が特に大きくなっている。これは船体が正面から波を受け、スラミング（船底を叩きつけるように上下揺れすること。）に近い状態になっていることを表している。

次に図 4-6(a)に波向き<000>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-6(b)に No.2、図 4-6(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。図中の縦軸は PSD (Power Spectrum Density) を表す。PSD とは横軸の周波数  $hz$  (時間) 当たりがもつエネルギーのことである。

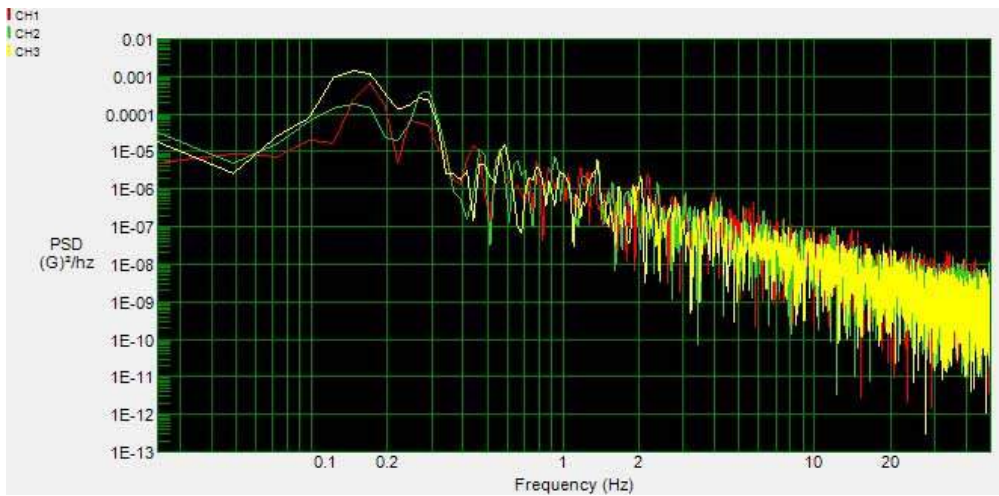


図 4-6(a) : 波向<000>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

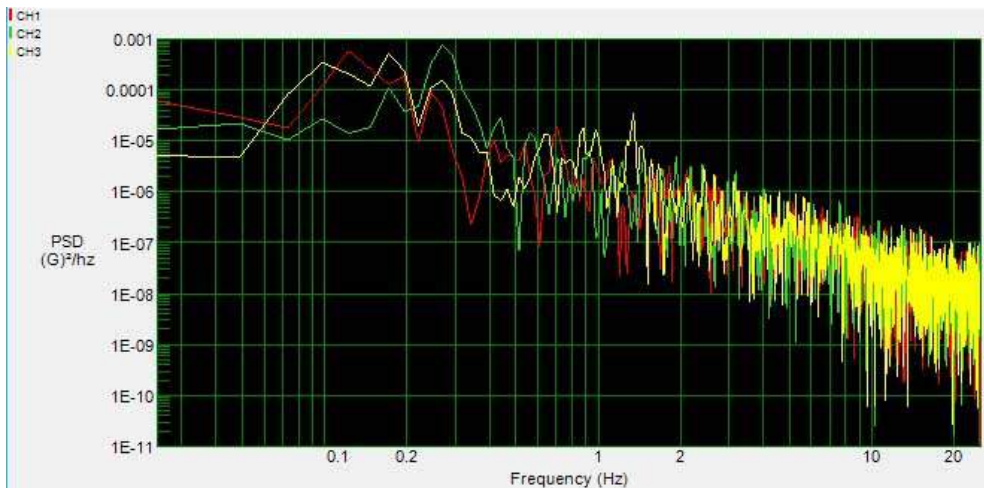


図 4-6(b) : 波向<000>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

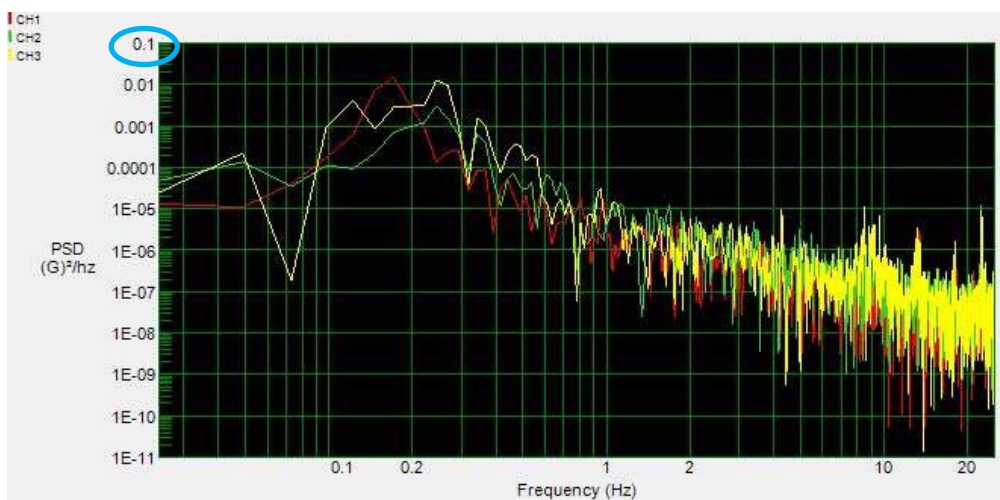


図 4-6(c) : 波向<000>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

図 4-6(a)、図 4-6(b)より、加速度スペクトラム範囲は  $10^{-3}$  から  $10^{-9}G^2/hz$  となりこれは内海の範囲よりは 10 倍ほど大きくなっているが低い（各軸には大きな加速度が付与されていない。）図 4-6(c)より加速度スペクトラム範囲は  $10^{-2}$  から  $10^{-9}G^2/hz$  まで広がる。つまり曳航船の方が外力の影響を多く受けていることが見て取れる。

(4) 波向<045><-045 (315)>における加速度と加速度スペクトラム密度

次に図 4-7(a)に波向<045>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-7(b)に No.2、図 4-7(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。



図 4-7(a) : 波向<045>における振動 (No.1 加速度計)

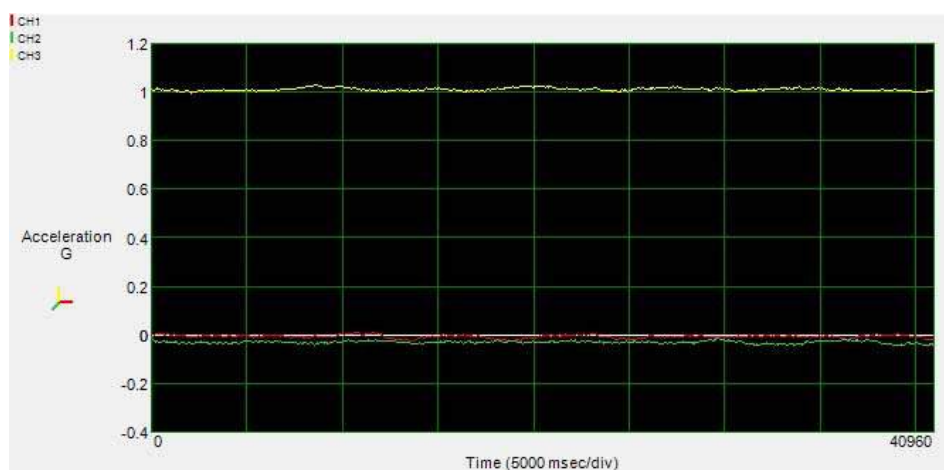


図 4-7(b) : 波向<045>における振動 (No.2 加速度計)



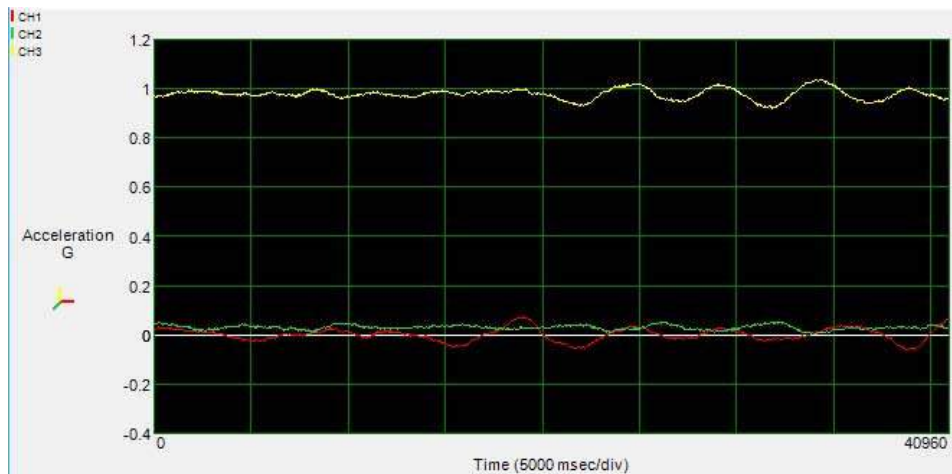


図 4-7(c) : 波向<math>\langle 045 \rangle</math>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-7(a)、図 4-7(b)より、波向<math>\langle 045 \rangle</math>における加速度については、波向<math>\langle 000 \rangle</math>と同様に小さな変化の観測のみであった。図 4-7(c)より、波向<math>\langle 045 \rangle</math>においては、曳航船の針路及び波向は変化しており、たまたま向き合った場合にはスラミングが発生するという傾向が見られた。また反対舷の波向き左 45 度 (315) の結果についても併せて示す。図 4-8(a)に波向<math>\langle 315 \rangle</math>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-8(b)に No.2、図 4-8(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。

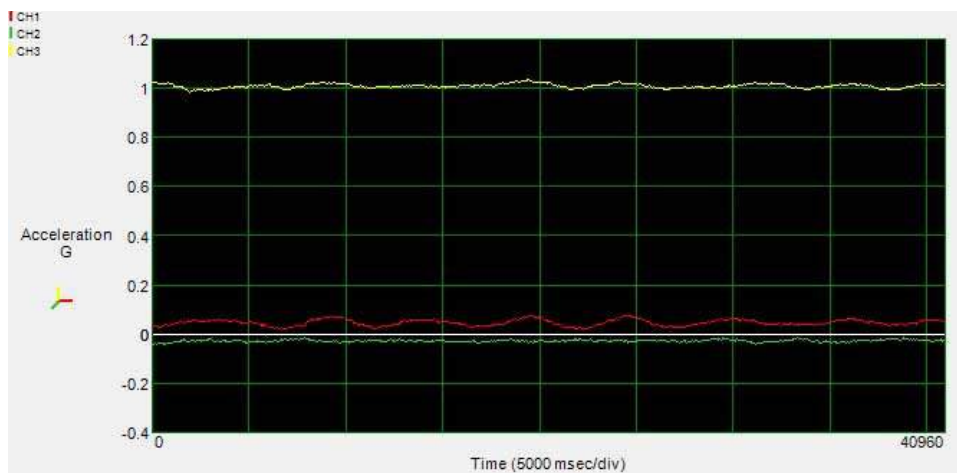


図 4-8(a) : 波向<math>\langle 315 \rangle</math>における振動 (No.1 加速度計)

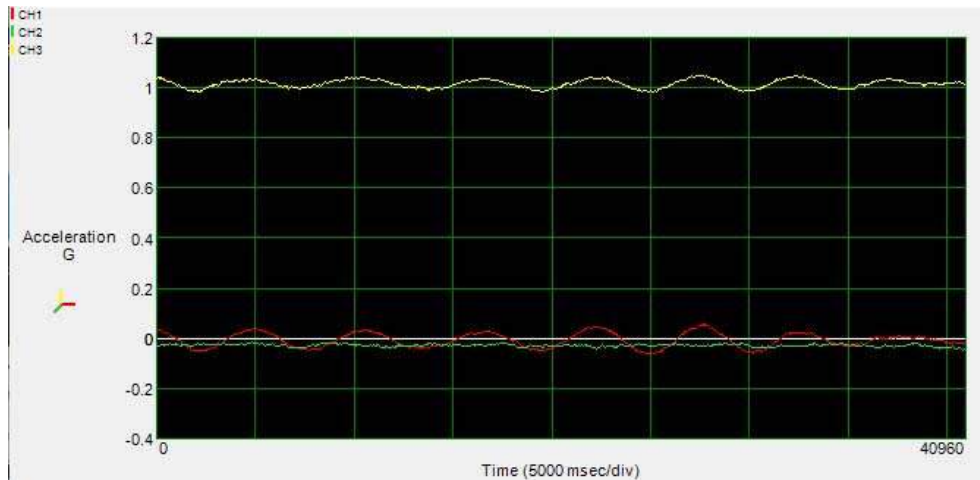


図 4-8(b) : 波向<315>における振動 (No.2 加速度計)

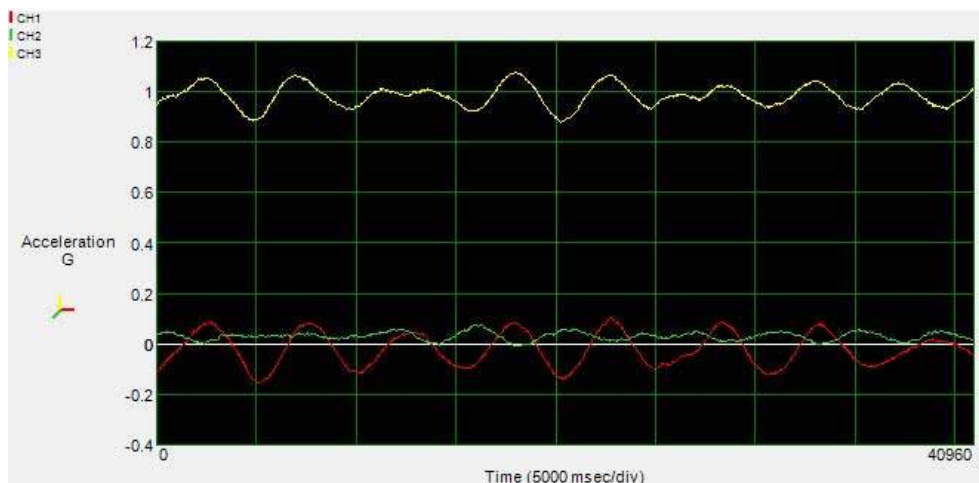


図 4-8(c) : 波向<315>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-8(a)、図 4-8(b)より、波向<315>を計測した 11 月 11 日 1500 付近は波向<045>を計測した同日 0600 付近より海面が荒れ、波高も 0.5~1.0m 高く計測されているため、全体的に加速度の変化が高くなっている。また図 4-8(c)より、曳航船においては上下方向だけでなく、左右方向にも激しく揺れていることが見て取れた。

次に図 4-9(a)に<045>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-9(b)に No.2、図 4-9(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。また図 4-10(a)に<315>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-10(b)に No.2、図 4-10(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。

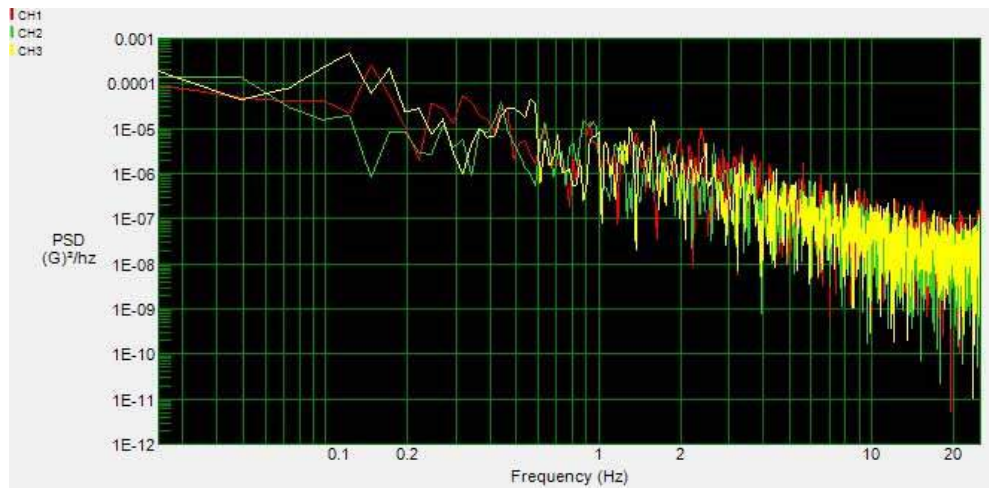


図 4-9(a) : 波向<045>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

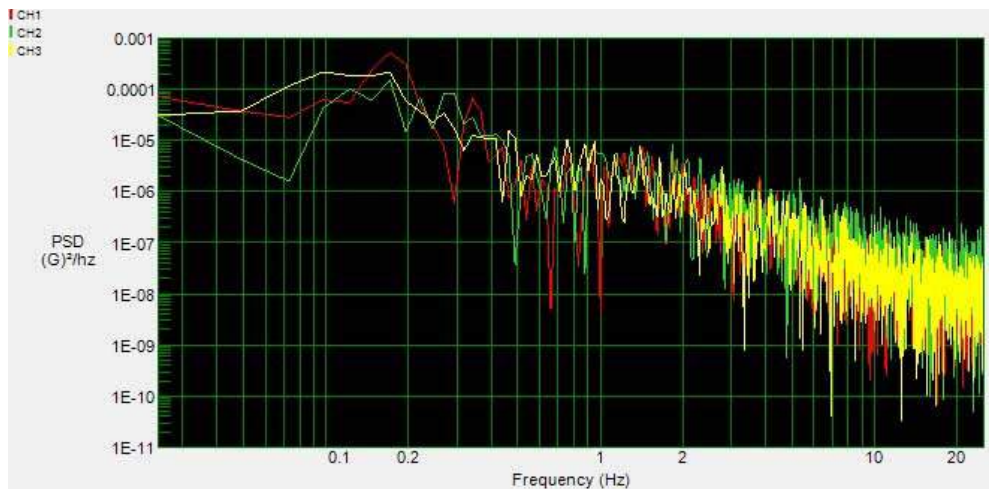


図 4-9(b) : 波向<045>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

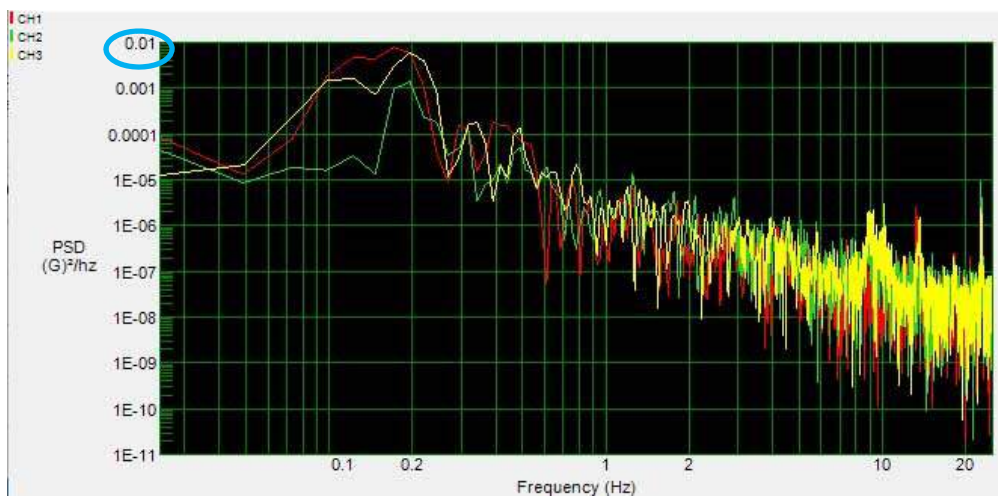


図 4-9(c) : 波向<045>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

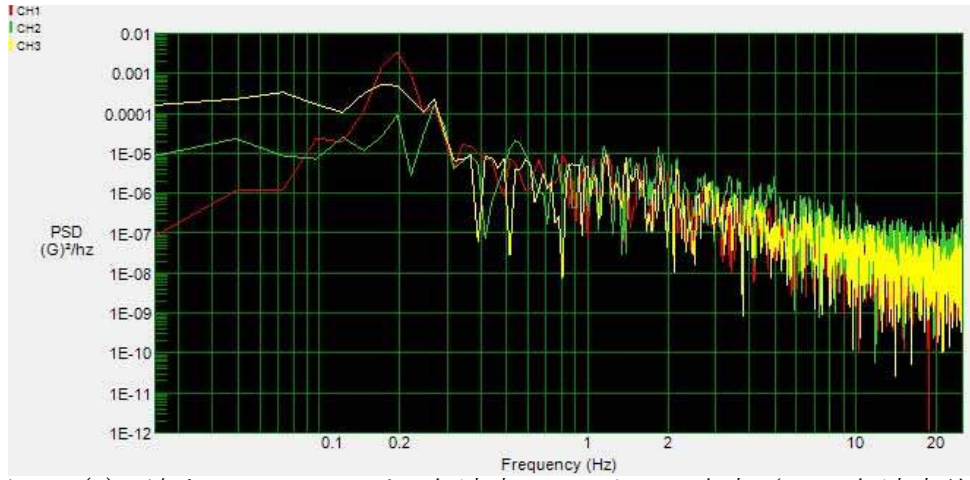


図 4-10(a) : 波向<315>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

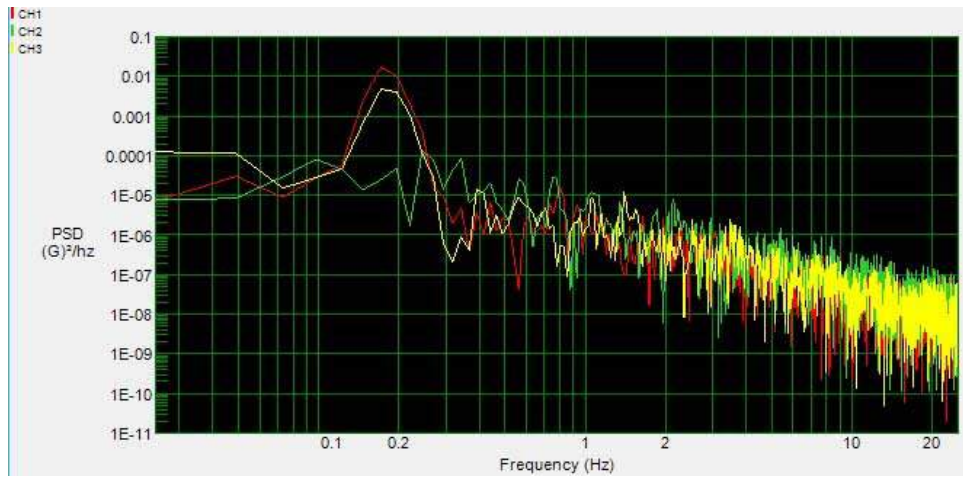


図 4-10(b) : 波向<315>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

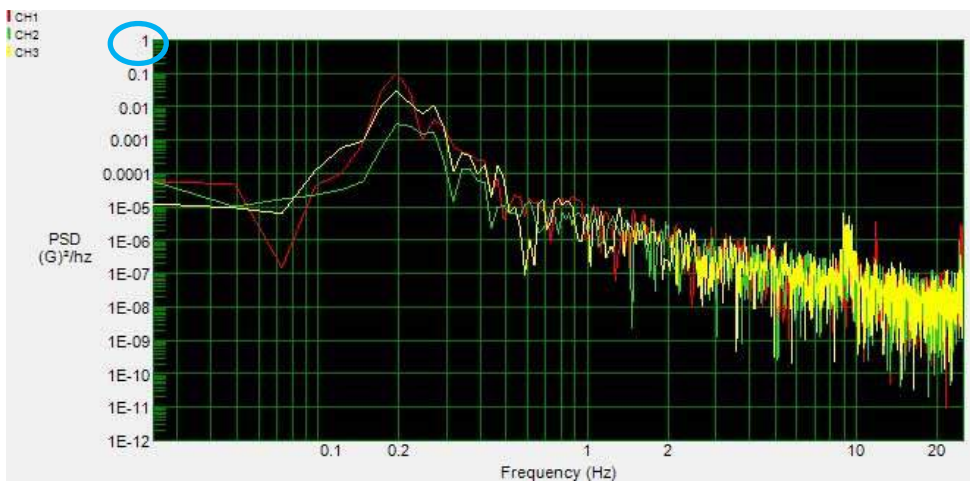


図 4-10(c) : 波向<315>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

図 4-9(a)、図 4-9(b)より、加速度スペクトラム範囲は  $10^{-3}$ あたりから  $10^{-9}G^2/hz$  に広がり、また荒天であった図 4-9(a)、図 4-9(b)  $10^{-2}$ あたりから  $10^{-10}G^2/hz$  辺りまで拡大する。これは風浪の影響であると考える。さらに図 4-9(c)と図 4-10(c)を比べると図 4-10(c)では  $10^{-1}$ から  $10^{-11}G^2/hz$  付近まで拡大し、特に舷方向の揺れ（赤色：ch1）が大きいことが分かる。

(5) 波向<090><-090 (270) >における加速度と加速度スペクトラム密度

次に図 4-11(a)に波向<090>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-11(b)に No.2、図 4-11(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。そして合わせて反対舷である波向<090>における結果について、図 4-12(a)に No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-12(b)に No.2、図 4-12(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。

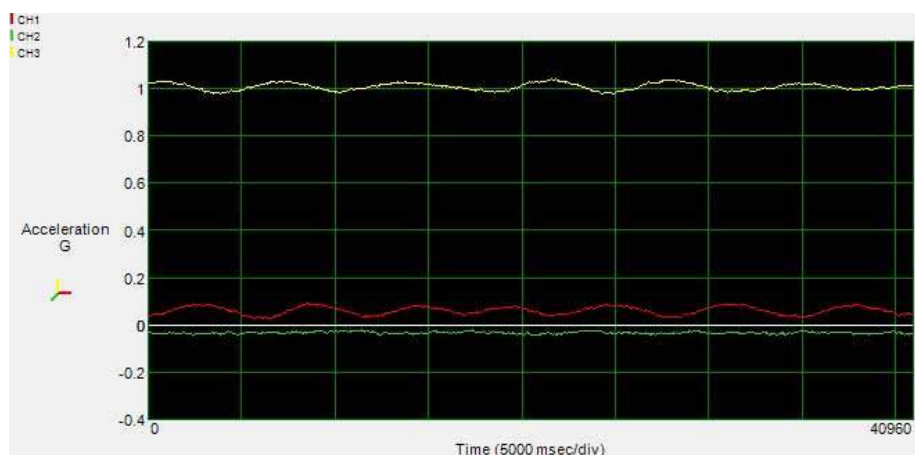


図 4-11(a) : 波向<090>における振動 (No.1 加速度計)

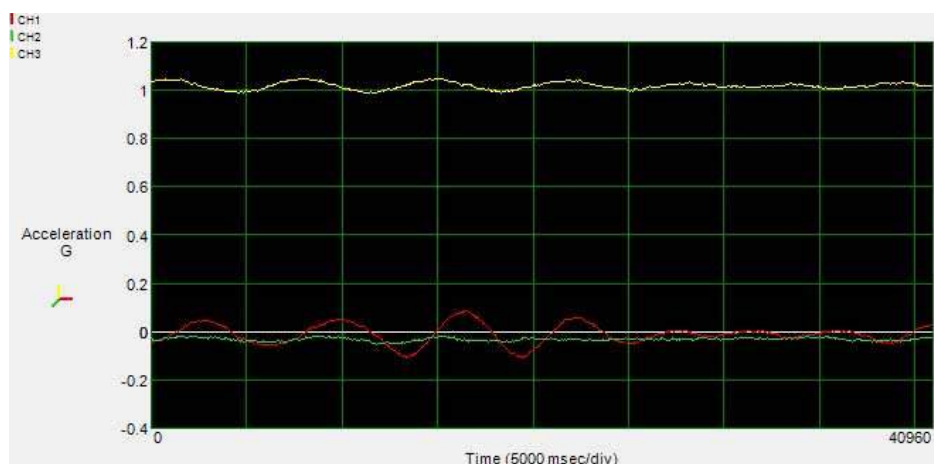


図 4-11(b) : 波向<090>における振動 (No.2 加速度計)

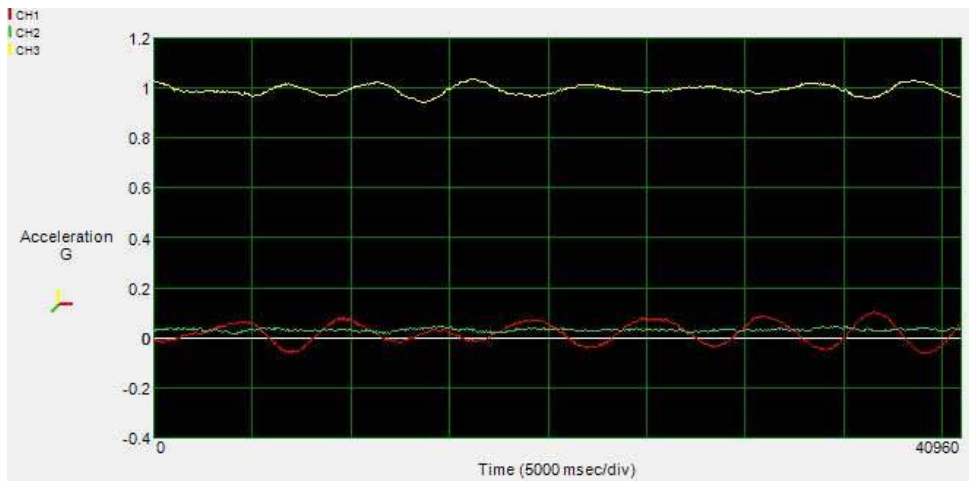


図 4-11(c) : 波向<090>における振動 (No.3 加速度計)

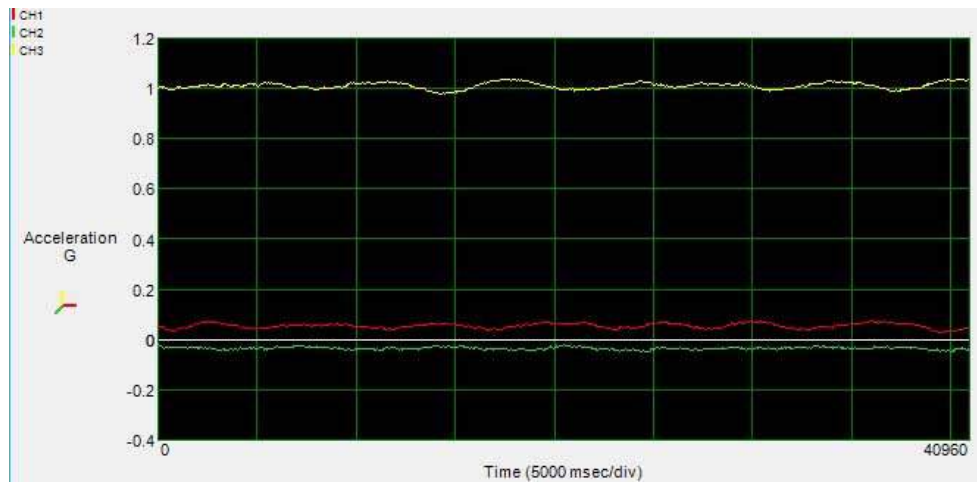


図 4-12(a) : 波向<270>における振動 (No.1 加速度計)

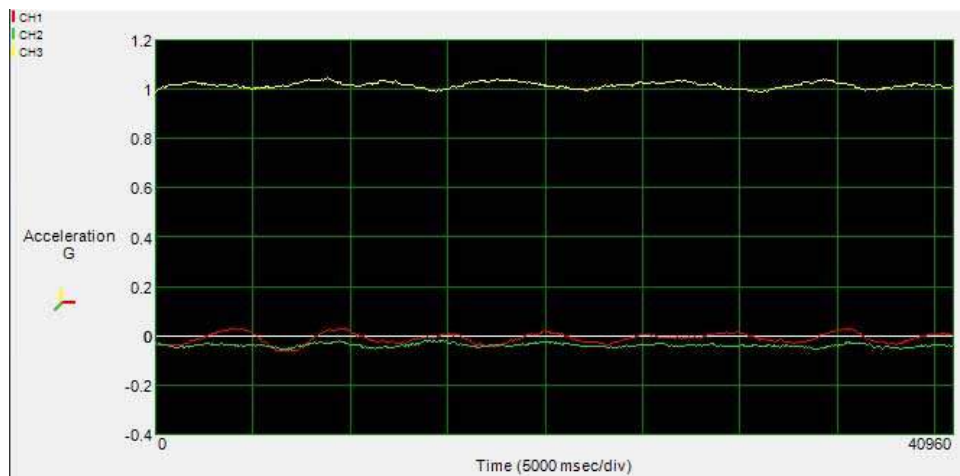


図 4-12(b) : 波向<270>における振動 (No.2 加速度計)

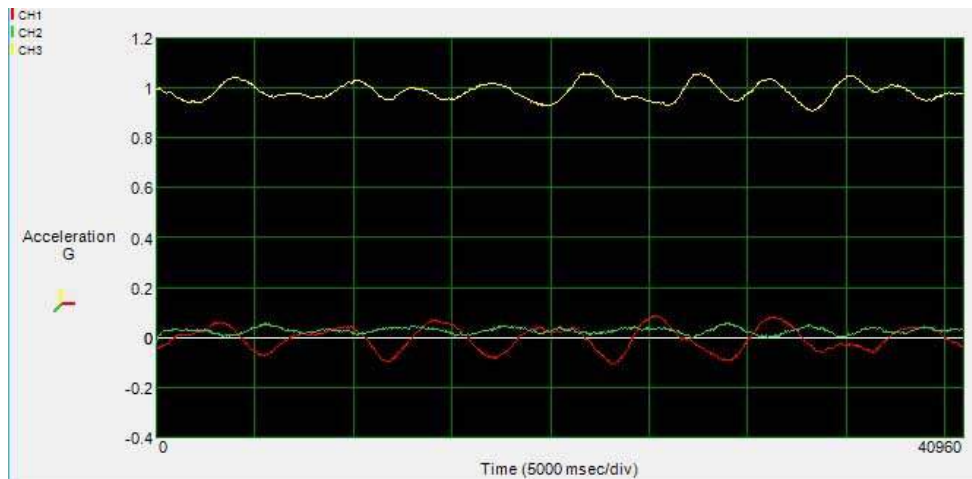


図 4-12(c) : 波向<270>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-11(a)、図 4-11(b)、そして図 4-12(a)、図 4-12(b)より、正横からの風浪の影響から舷方向の加速度の変化が大きくなっている。<090>の計測時の方が、<270>より若干、波が高いため、舷方向の加速度および上下方向の振幅が大きくなっている。また図 4-11(c)、図 4-12(c)より、舷方向の揺れ、上下揺れは激しいが、<045>から波を受ける場合よりは、正横から波を受ける方が舷方向の揺れが少ないことが分かった。

次に図 4-13(a)に<090>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-13(b)に No.2、図 4-13(c)に No.3 の計測結果を示す。また同じく図 4-14(a)に<270>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-14(b)に No.2、図 4-14(c)に No.3 の計測結果を示す。

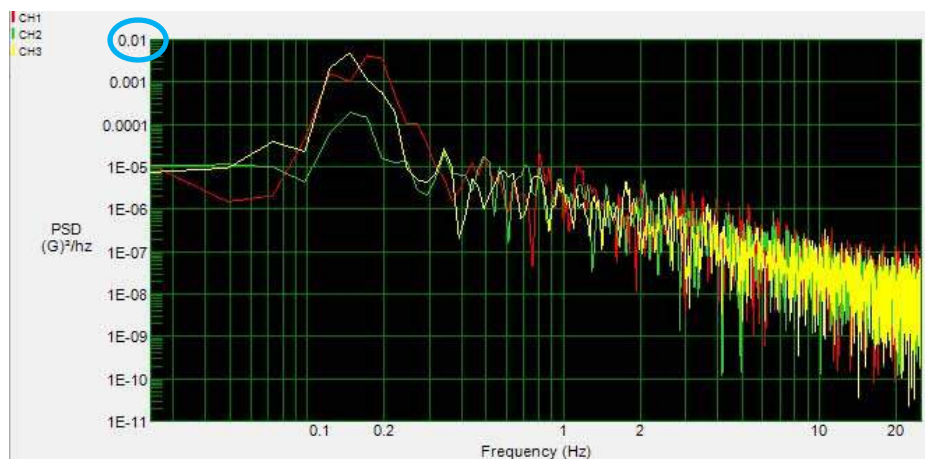


図 4-14(a) : 波向<090>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

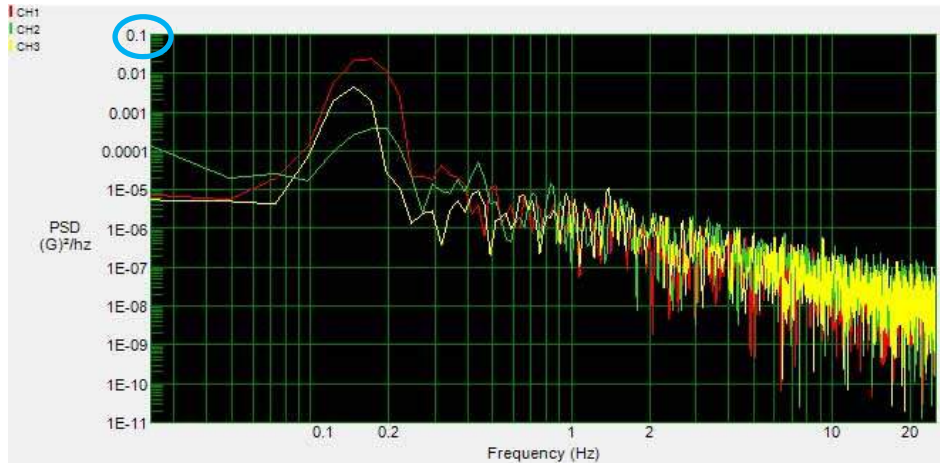


図 4-14(b) : 波向<090>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

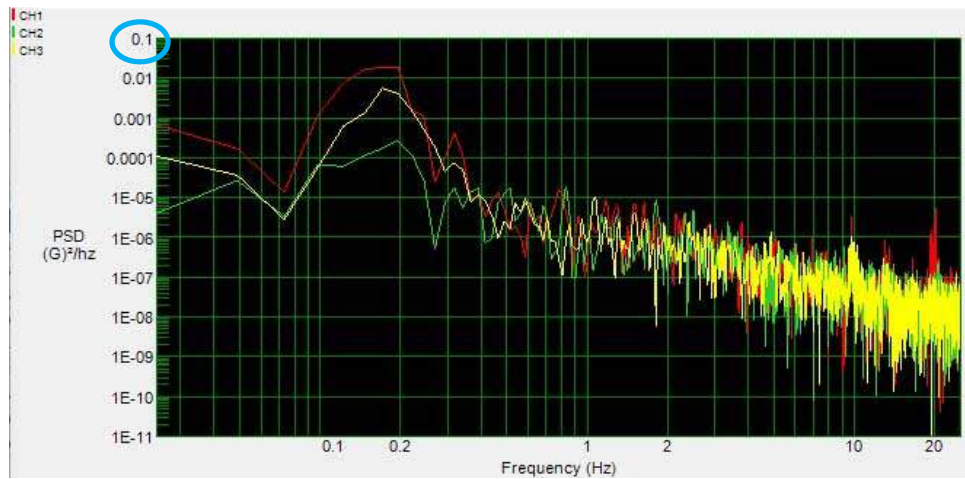


図 4-14(c) : 波向<090>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

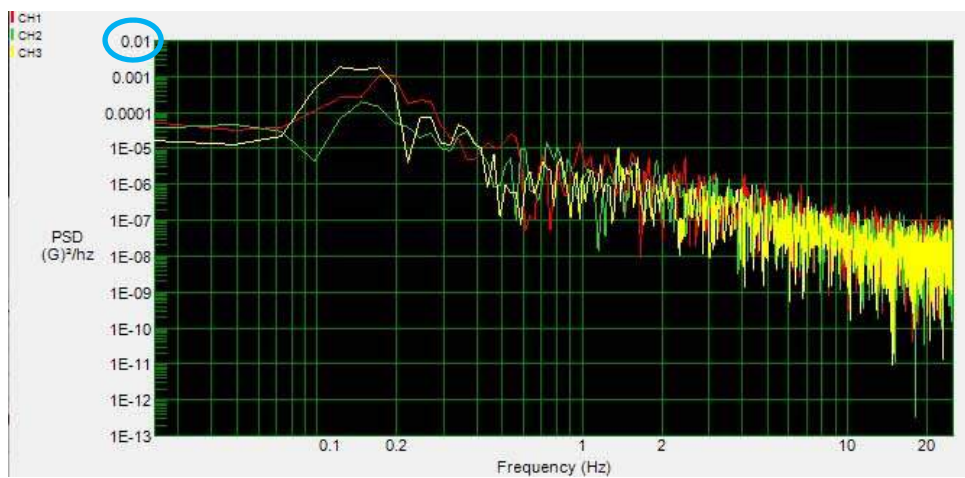


図 4-15(a) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)



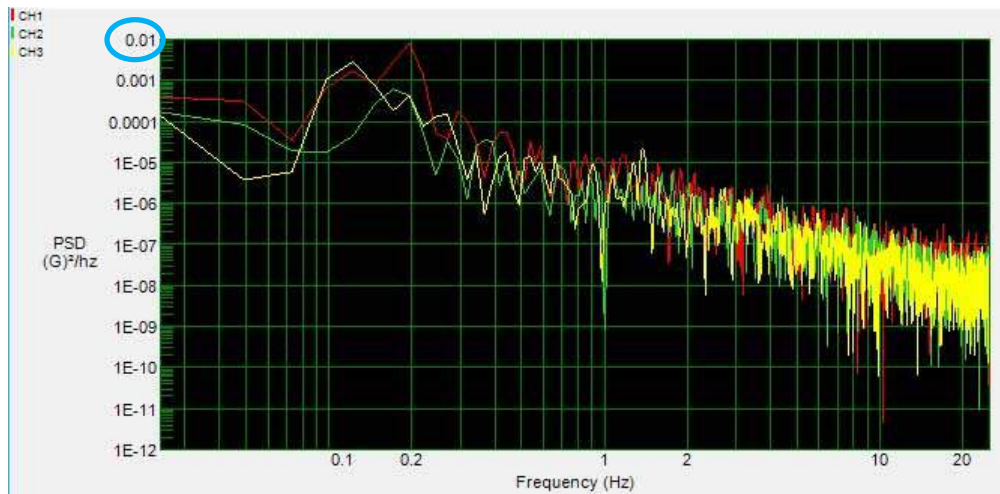


図 4-15(b) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

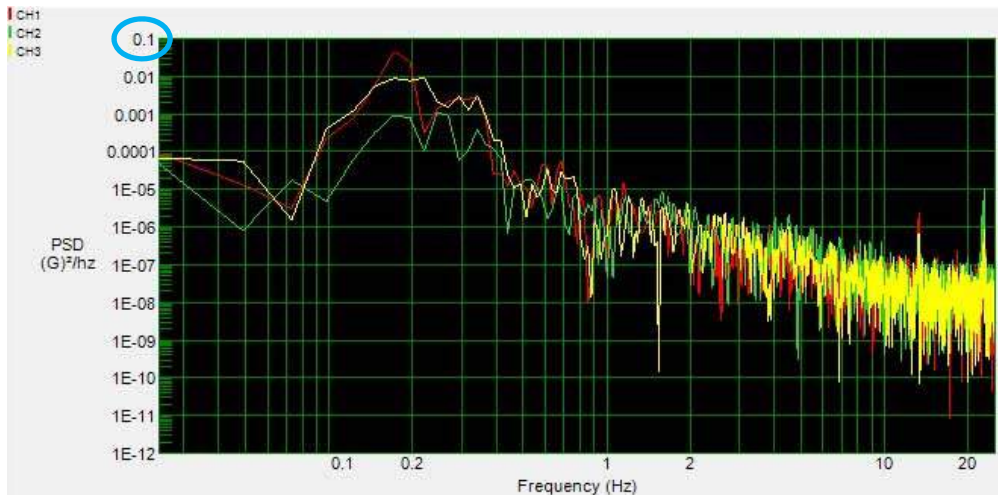


図 4-15(c) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

図 4-14(a)、図 4-14(b)および図 4-15(a)、図 4-15(b)より、加速度スペクトラム範囲は  $10^{-2}$ あたりから  $10^{-9}G^2/hz$  に達しており、荒天の影響が大きい。そして図 4-14(c)と図 4-15(c)より  $10^{-1}$ から  $10^{-11}G^2/hz$  付近に達し、船首方向の揺れのみならず、上下、左右方向も揺れが大きいことが分かる。

#### (6) 波向<135>における加速度と加速度スペクトラム密度

次に図 4-16(a)に波向<135>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-16(b)に No.2、図 4-16(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。先に示した通り、左<135>に対応する計測結果は得られなかった。また本結果のみ 4月の1回目の計測結果である。

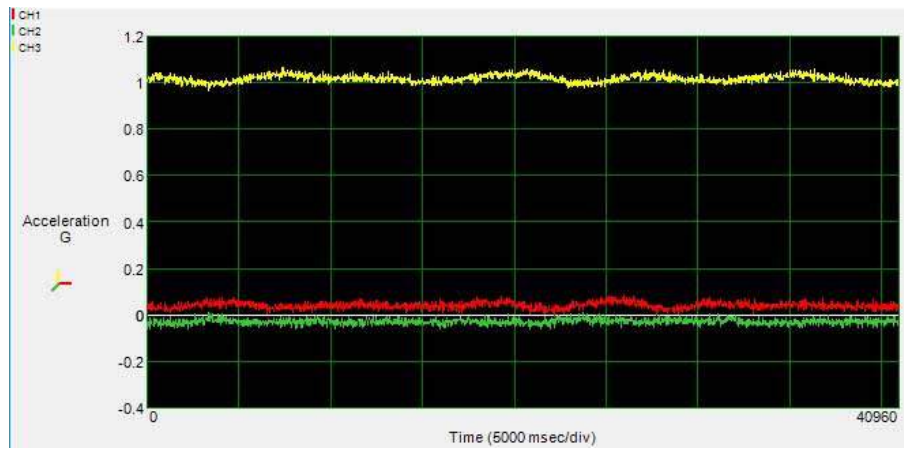


図 4-16(a) : 波向<135>における振動 (No.1 加速度計)

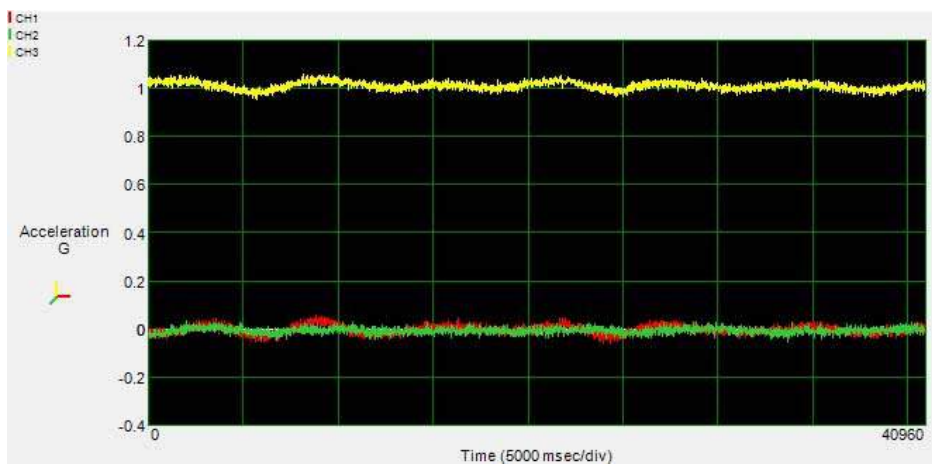


図 4-16(b) : 波向<135>における振動 (No.2 加速度計)

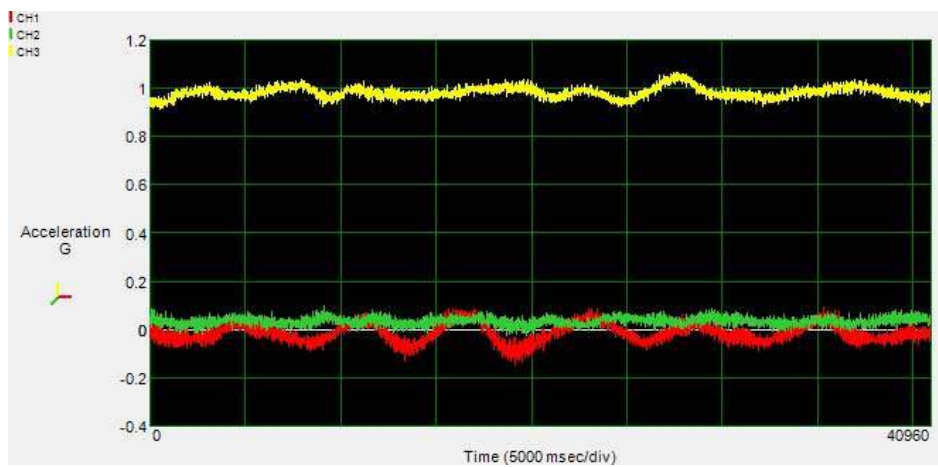


図 4-16(c) : 波向<135>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-16(a)、図 4-16(b)より、前述したが、No.1 と No.2 は被曳航船に設置されているため風浪の影響は少ない。それに対して、図 4-16(c)は、曳航船設置であるため左右方向の揺れ、鉛直方向の揺れが多いことが分かる。次に図 4-17(a)に<135>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-17(b)に No.2、図 4-17(c)に No.3 の計測結果を示す。

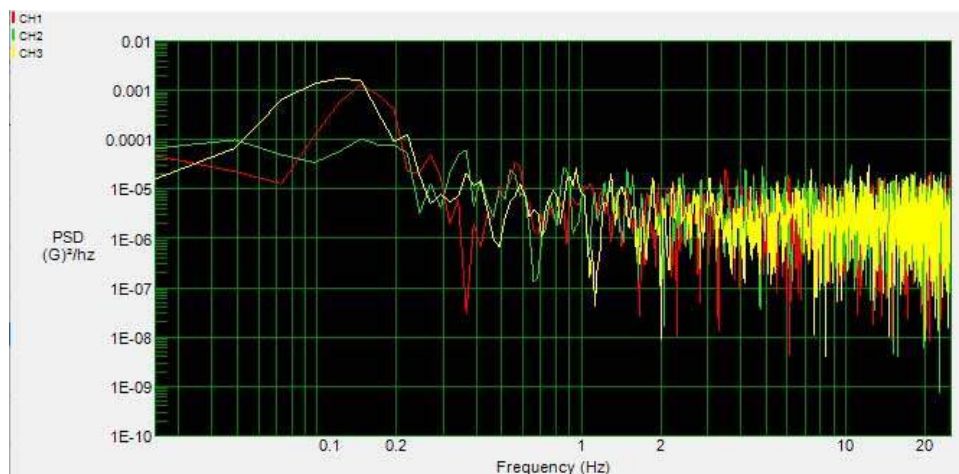


図 4-17(a) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

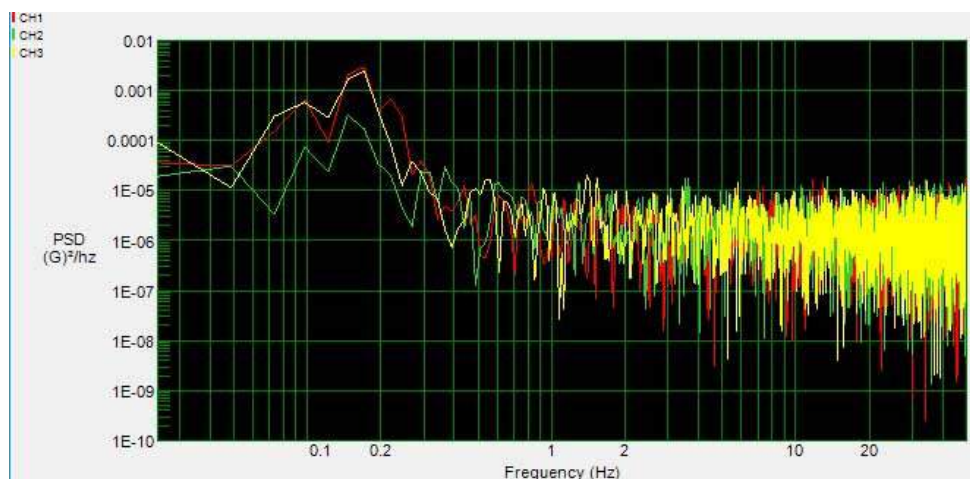


図 4-17(b) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

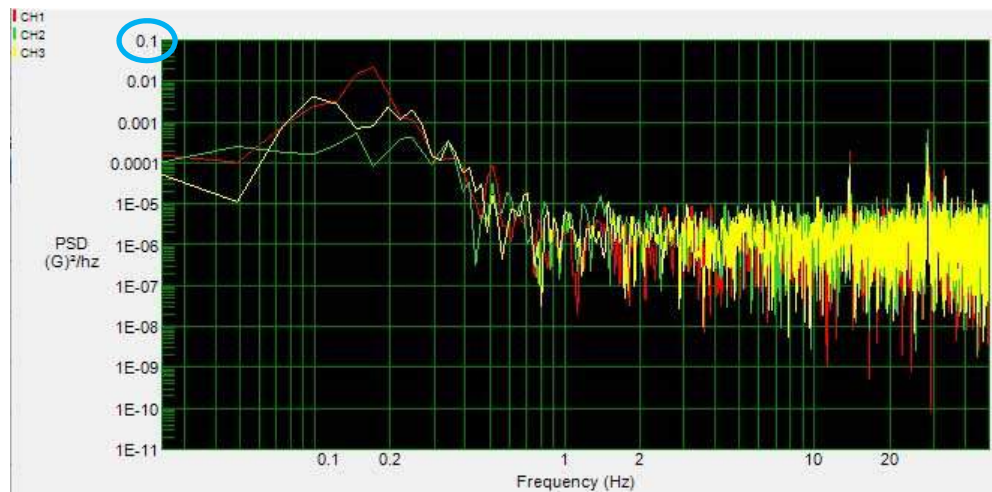


図 4-17(c) : 波向<270>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

図 4-17(a)、図 4-17(b)より、加速度スペクトラム範囲は  $10^{-2}$ あたりから  $10^{-8}G^2/hz$ 以下と割と低い値である。同時刻は他の計測時に比べ、波高が 1m と低めであることが理由として挙げられる。また図 4-17(c)が、 $10^{-1}$ あたりから  $10^{-8}G^2/hz$ までと高いのは、曳航船操船（針路変更・増減速）の影響であると考えられる。

(7) 波向<135>における加速度と加速度スペクトラム密度

最後に図 4-18(a)に波向<180>における No.1 加速度計の振動の計測結果を、図 4-18(b)に No.2、図 4-18(c)に No.3 の計測結果をそれぞれ示す。

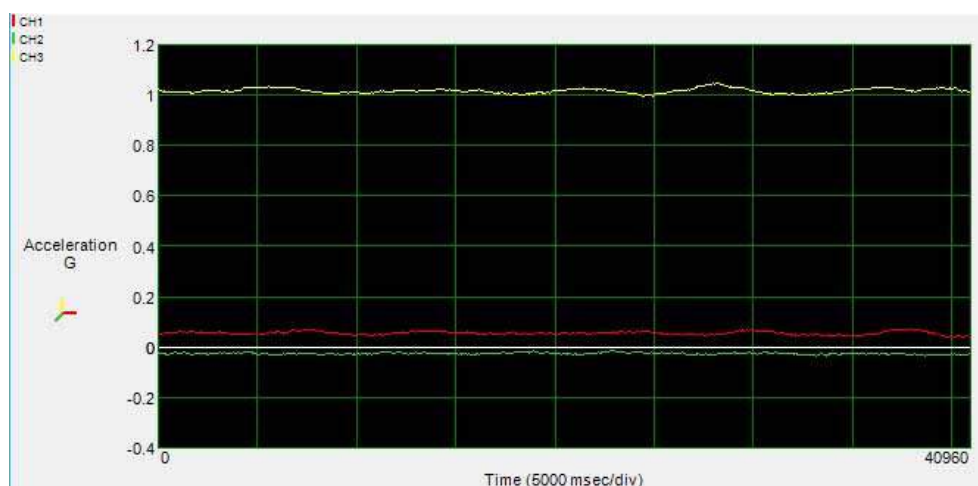


図 4-18(a) : 波向<180>における振動 (No.1 加速度計)

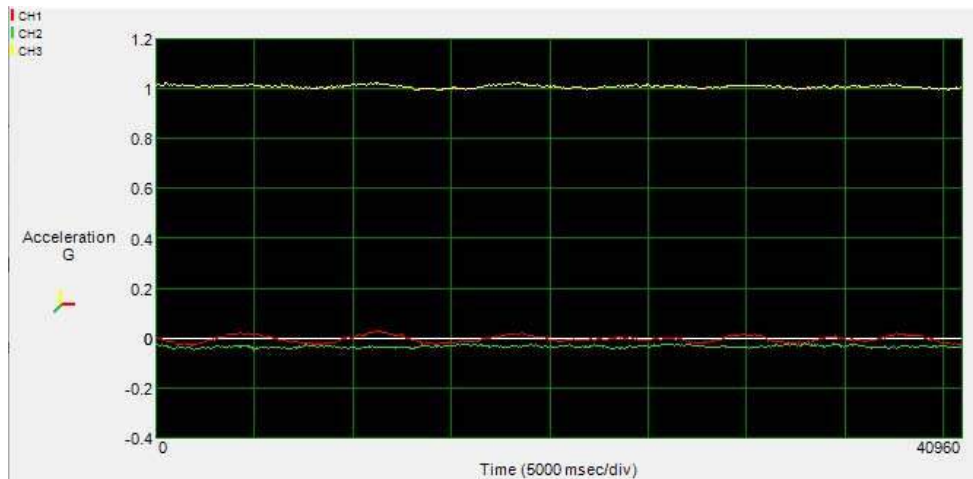


図 4-18(b) : 波向<180>における振動 (No.2 加速度計)

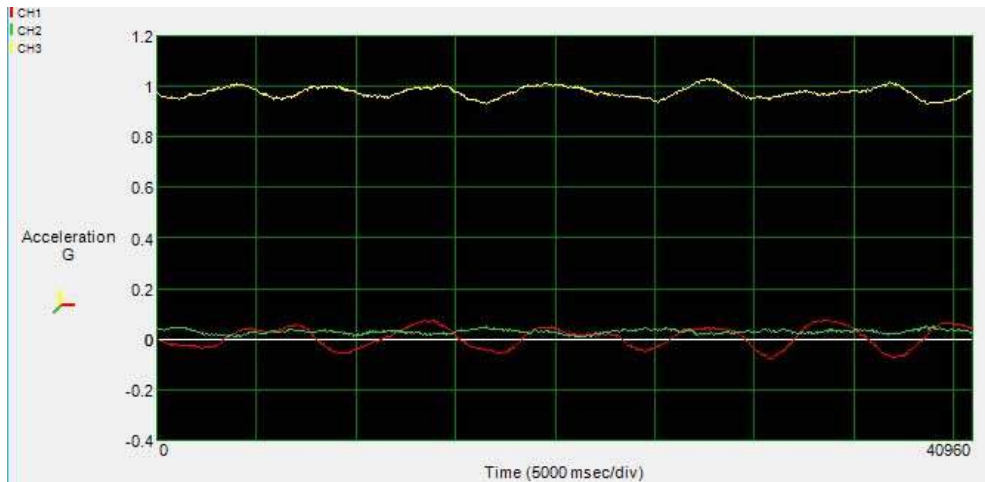


図 4-18(c) : 波向<180>における振動 (No.3 加速度計)

図 4-18(a)、図 4-18(b)、図 4-18(c)より、No.1,2 加速度計では、被曳航船のキャビン内設置のため揺れは少なく、No.3 加速度計では曳航船の揺れが大きくなっていることが分かるが、波を後ろから受ける場合は、スラミングが小さくなっていることが分かる。次に図 4-19(a)に<180>における No.1 加速度計の振動の加速度スペクトラム密度の計測結果を、図 4-19(b)に No.2、図 4-19(c)に No.3 の計測結果を示す。

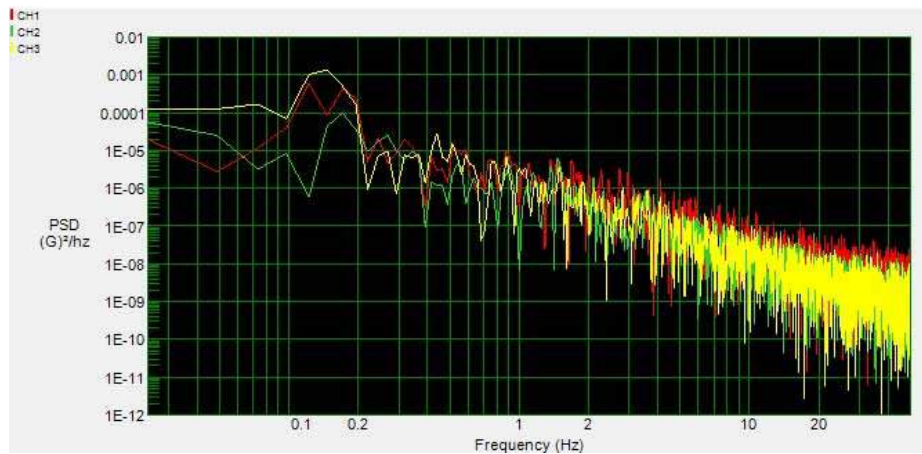


図 4-19(a) : 波向<180>における加速度スペクトラム密度 (No.1 加速度計)

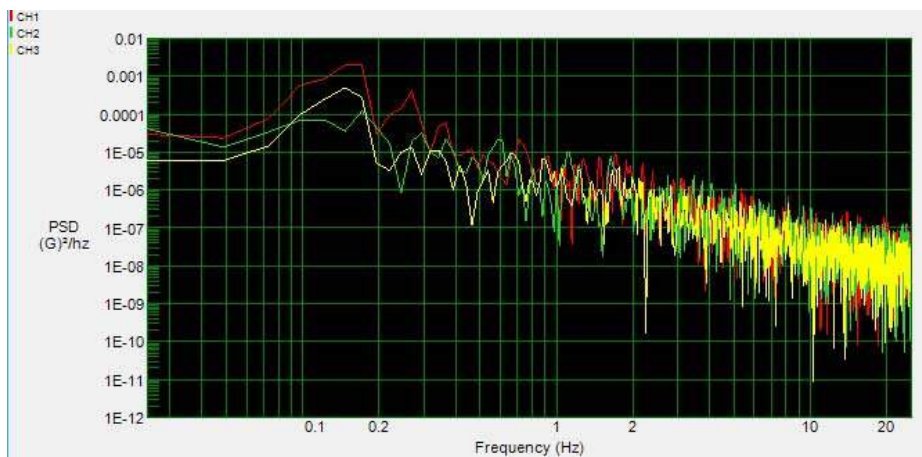


図 4-19(b) : 波向<180>における加速度スペクトラム密度 (No.2 加速度計)

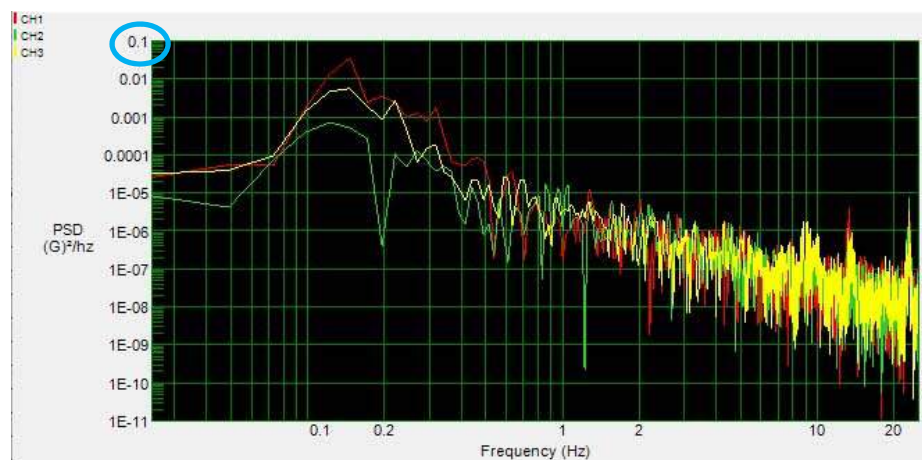


図 4-19(c) : 波向<180>における加速度スペクトラム密度 (No.3 加速度計)

図 4-19(a)、図 4-19(b)より、加速度スペクトラム範囲は  $10^{-3}$ あたりから  $10^{-10}G^2/hz$  と一番低い値である。また図 4-19(c)より、 $10^{-2}$ あたりから  $10^{-10}G^2/hz$  までと一番低くなっており、鉛直方向の揺れ (CH3 黄) が小さくなっていることが分かる。この結果から後ろから波を受ける場合が、一番衝撃が少ないことが分かった。

## 4.2 波向別の針路・速力

波向別の針路・速力の結果を示す。なおサンプル対象時間は、波向該当時間から前後 10 分間とし、GPS データより、自船の真針路(T.co)を見て、変針をしていない部分を取り上げる。

### (1) 波向<000>の場合の針路・速力

波向<000>の場合、風浪の抵抗は最大となるものの、船首揺れは少なく、船体は非常に安定する。図 4-20 に波向<000>の場合の針路の結果を示す。

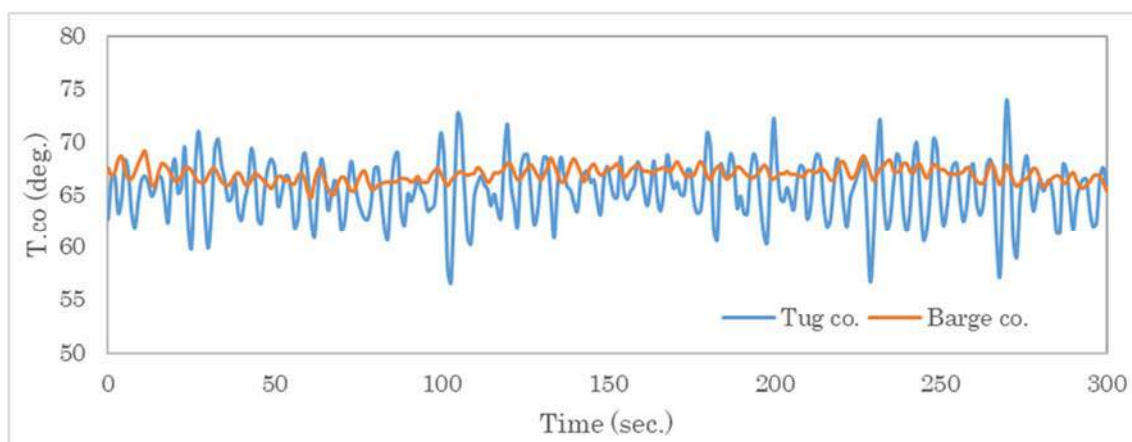


図 4-20 : 波向<000>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-20 より、波を正面から受ける場合の針路の変化は非常に安定していることが分かる。被曳航船は<067>付近で安定して真っすぐ進んでいるのがわかるまた曳航船も<065>付近を左右 10 度以内に調整しながら進んでいることが分かる。次に図 4-21 に波向<000>の場合の速力の結果を示す。

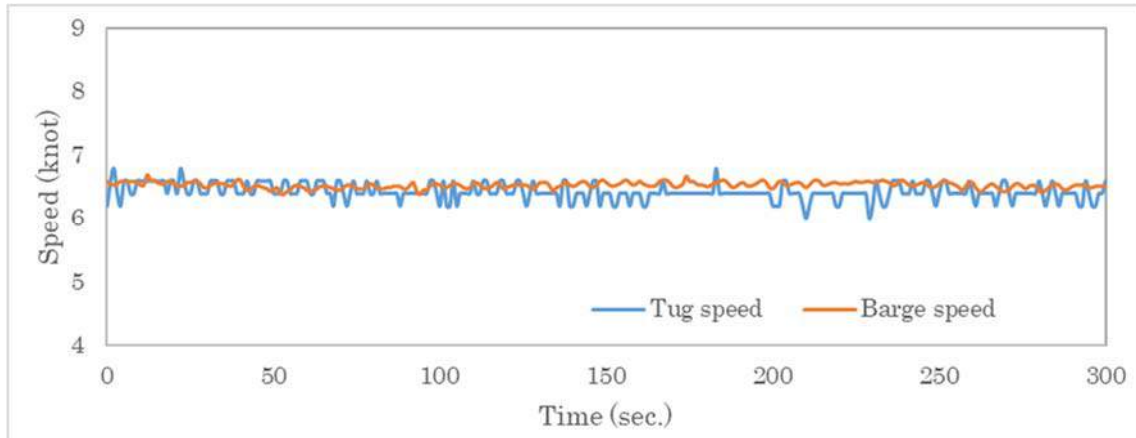


図 4-21：波向<000>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-21 より、曳航船、被曳航船ともに、6.5 ノット程度を保ちながら航行していることが分かる。この場合、曳航索は真っすぐ張り、両船とも等速で進んでいるため、真っすぐに曳航できていることが伺える。

(2) 波向<045>、<-045 (135)>の場合の針路・速力

次に図 4-22 に波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の針路、図に波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。また左<045>である<135>の結果についても図 4-24 に曳航船・被曳航船の針路、図 4-25 に曳航船・被曳航船の速力をそれぞれ示す。

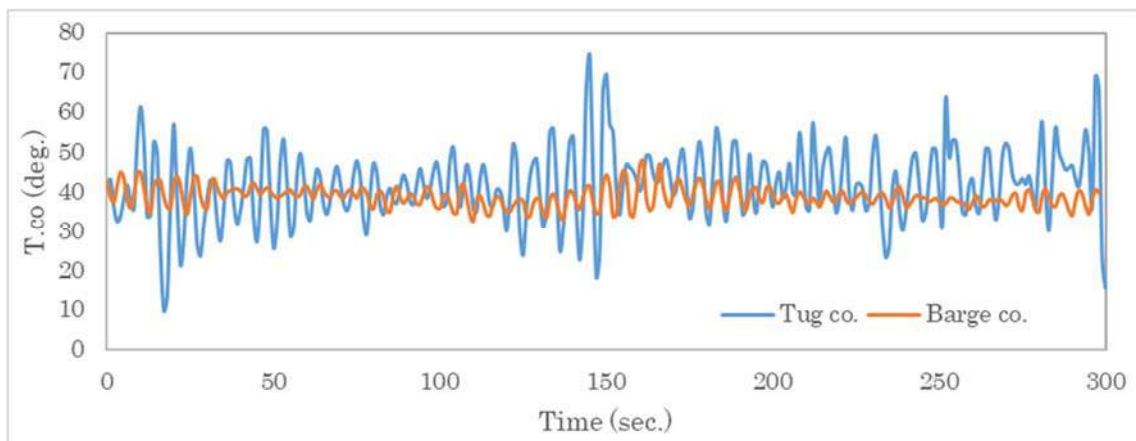


図 4-22：波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-22 より、波向き<000>の時よりは、曳航船の針路の変化が 20 度以上と激しくなっているが、被曳航船は多少左右に振れているものの針路は安定しており、<040



>付近で曳航できていることが分かる。次に図 4-21 に波向<045>の場合の速力の結果を示す。

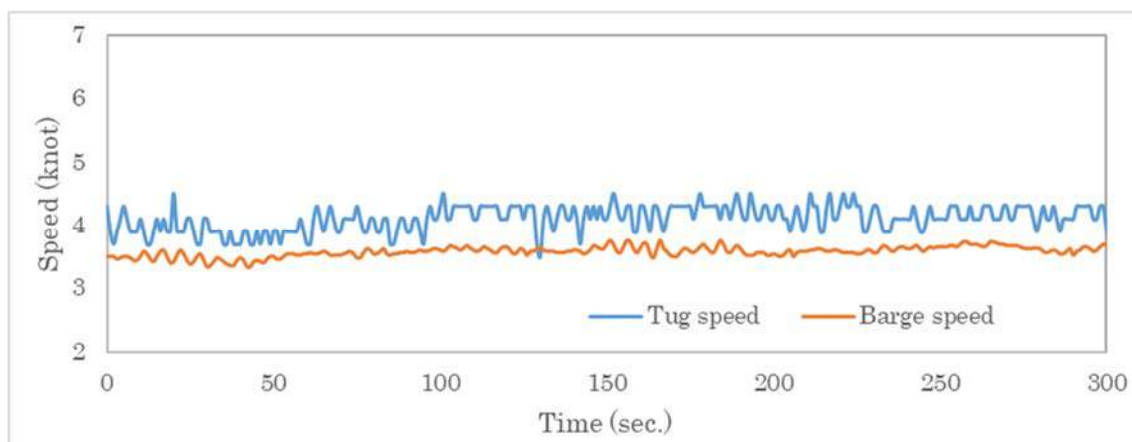


図 4-23 : 波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-23 より、曳航船の速力は、4 ノット程度、そして被曳航船の速力は 3.5 ノットと若干のずれが生じた。被曳航船の針路は安定していることから、曳航船が針路速力を微調整しながら慎重に曳航していることが見て取れる。次に波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の針路の結果を図 4-24 に示す。

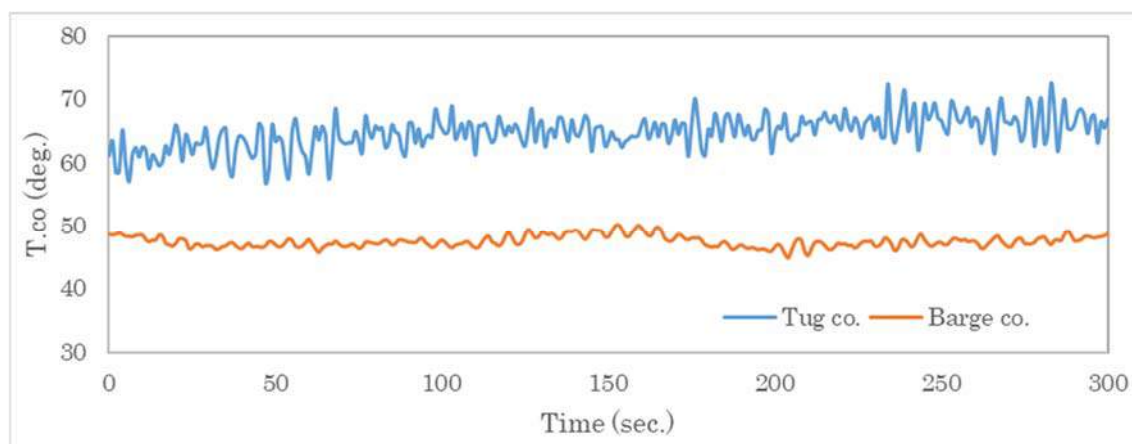


図 4-24 : 波向<315>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-24 より、波向<315>の場合、曳航船は<065>付近、そして被曳航船は<050>付近で安定して進んでいる。お互いの針路が違うにも関わらず、針路が安定している理由は被曳航船が傾きながら進行していることが推測される。次に図 4-25 に波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。

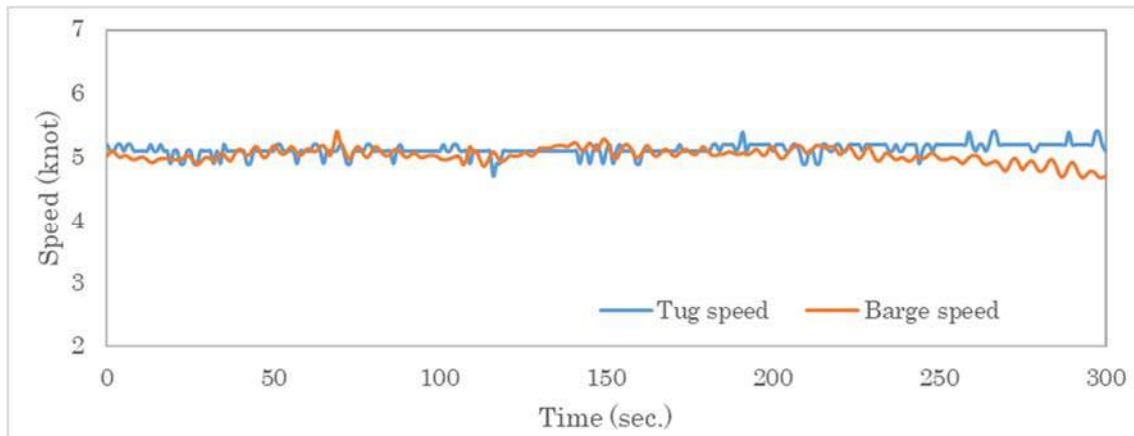


図 4-25 : 波向<315>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-25 より、曳航船、被曳航船ともに、5 ノット前後の速力で安定しており、問題なく曳航できていることが分かる。

(3) 波向<090><-090 (270) >の場合の針路・速力

次に図 4-26 に波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の針路の結果を示す。なお<090>の 2 回目の GPS データは 11 月 14 日まで記録されておらず、1 回目 4 月 4 日 1500 のデータを代替で示す。

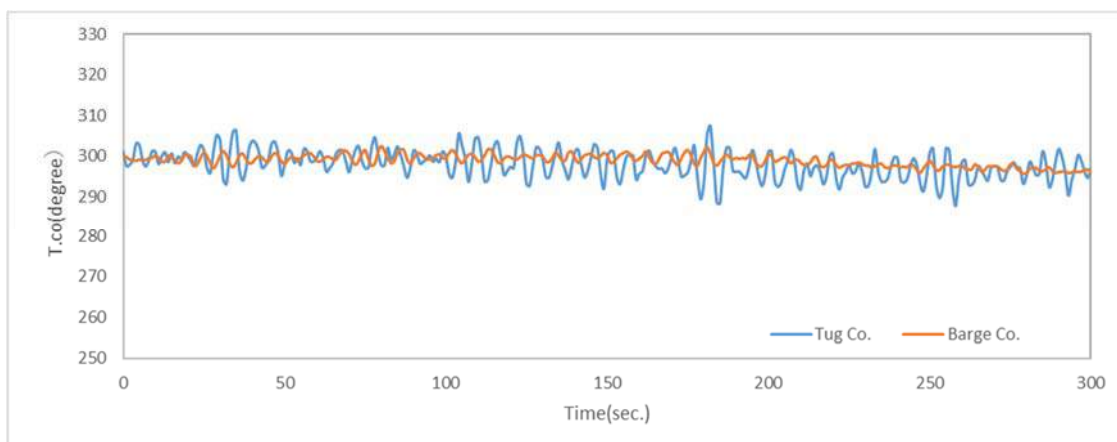


図 4-26 : 波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-26 より、被曳航船の針路は<300>で非常に安定して進んでいる。また曳航船の針路も 10 度以内の変化で安定している。4 月 4 日 1500 付近の気象は良好で波高は 1.2m と低かったためであると考えられる。次に図 4-27 に波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。

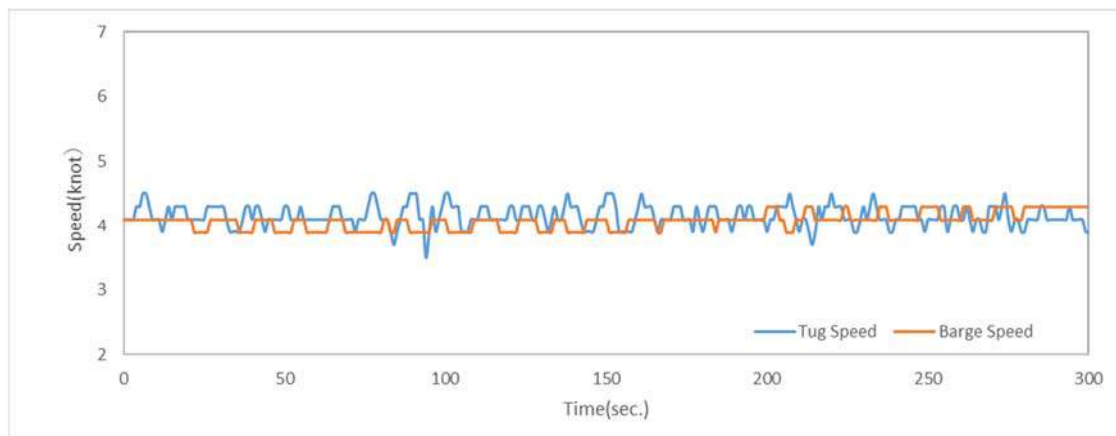


図 4-27：波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-27 より、曳航船と被曳航船はほぼ等速で進んでいることが分かり、安定して曳航していることが分かる。

また合わせて、図 4-28 に波向<270>の場合の曳航船・被曳航船の針路、図 4-29 に波向<270>の場合の曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。

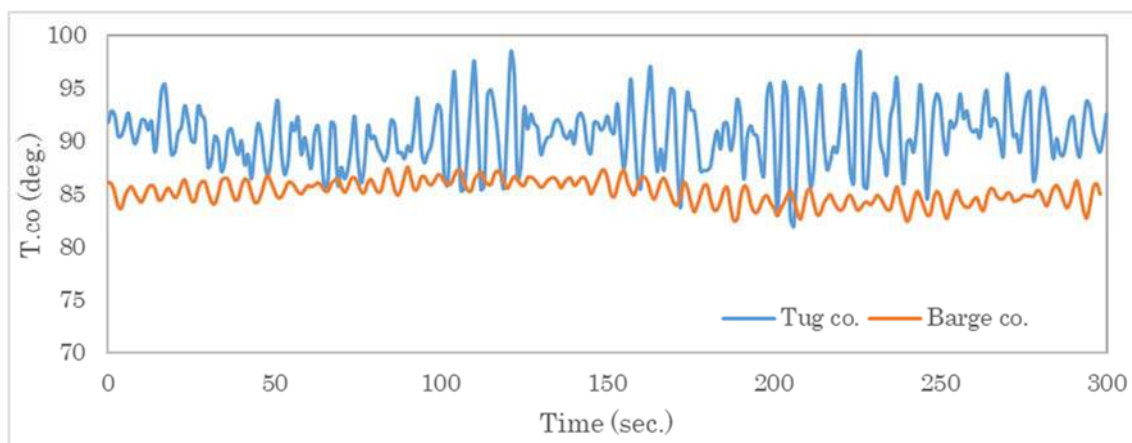


図 4-28：波向<270>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-28 より、被曳航船は<085>付近で小刻みに揺れている。また曳航船は<093>付近を中心に左右に 10 度程度変化していることが分かる。この結果より曳航船は波の影響で左右に振られ、被曳航船は多少傾きながら曳航していることが分かる。

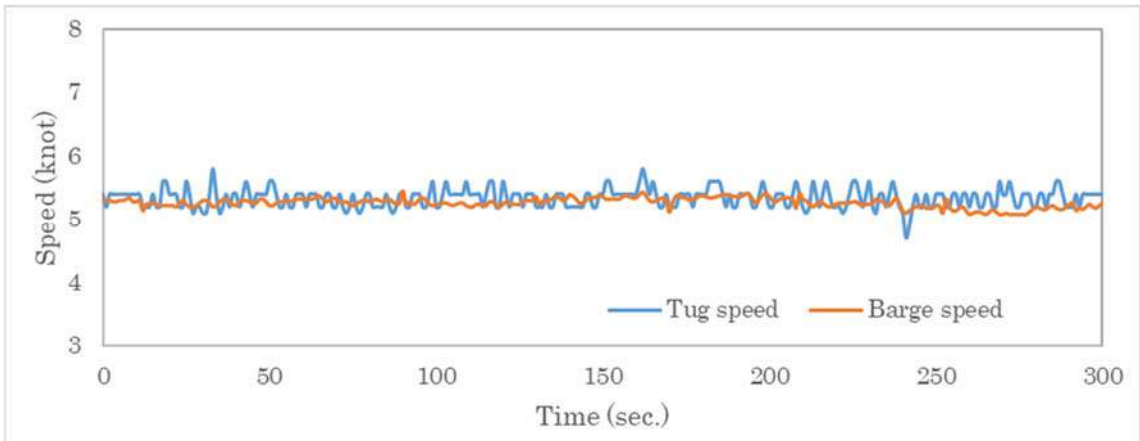


図 4-29：波向<270>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-29 より、曳航船は 5-6 ノット付近を行ったり来たりしているが被曳航船の速力は 5 ノットでほぼ等速で進んでおり、速力を操り、上手く曳航できていると考える。

(4) 波向<135>の場合の針路・速力

波向<215>のケースは計測できなかったため、波向<135>の計測結果のみ示す。図 4-30 に曳航船・被曳航船の針路の結果、そして図 4-31 に曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。

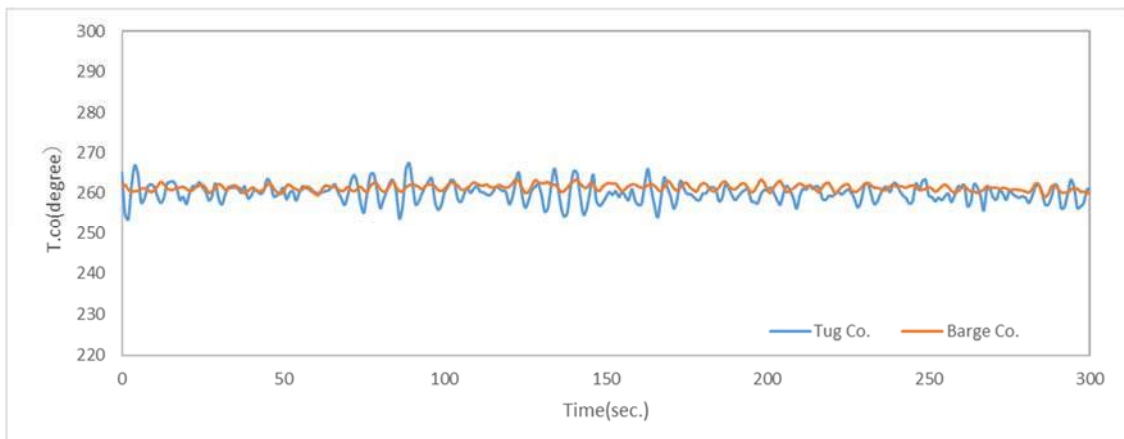


図 4-30：波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-30 より、曳航船および被曳航船の針路は<260>付近で非常に安定している。これは計測時間の 4 月 2 日の 2200 は気象が非常に穏やかであったためと思われる。

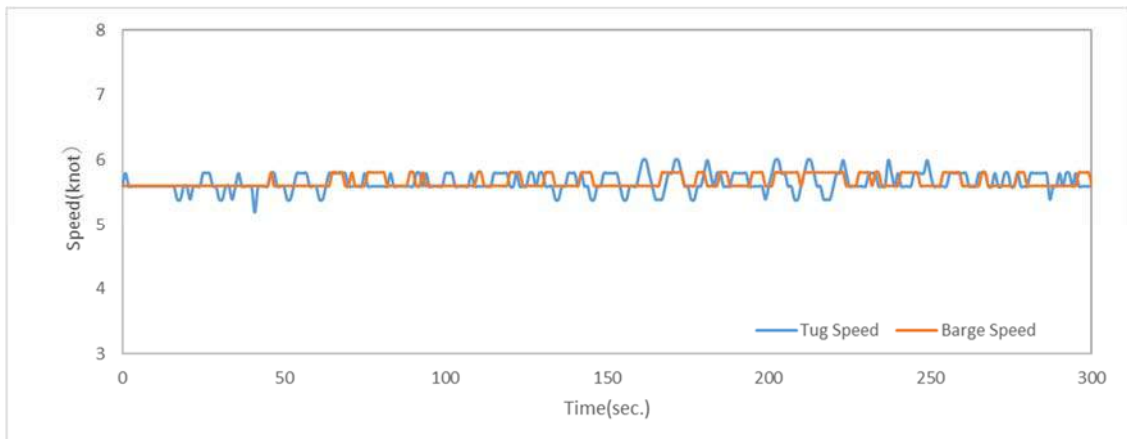


図 4-31：波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-31 より、曳航船、被曳航船ともに 6.7 ノット程度で安定しており、典型的な安全航海であったことが伺える。

(5) 波向<180>の場合の針路・速力

波向を真後ろから受ける場合、曳航索は弛みがちになる。その結果、曳航船は調整のために右往左往することになる。図 4-32 に波向<180>の場合の曳航船・被曳航船の針路、図 4-44 に波向<180>の場合の曳航船・被曳航船の速力の結果を示す。

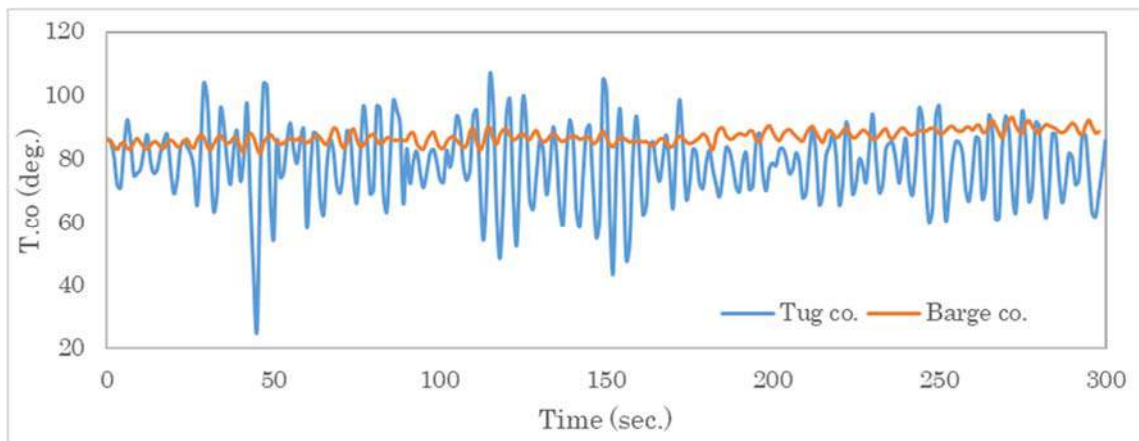


図 4-43：波向<180>の場合の曳航船・被曳航船の針路

図 4-43 より、被曳航船は<080>を中心に安定しているが、曳航船は 20 度前後針路に変化が見られる。

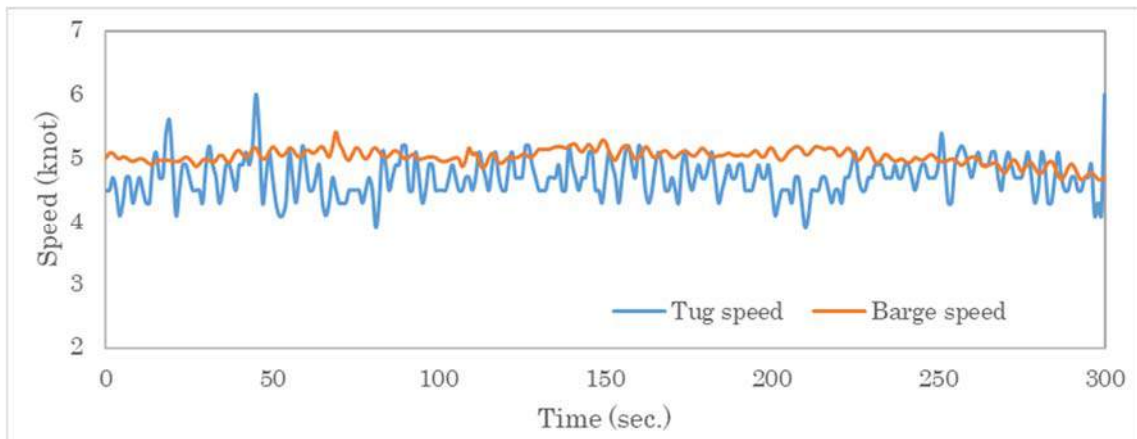


図 4-44：波向<180>の場合の曳航船・被曳航船の速力

図 4-44 より、被曳航船の速力は 5 ノット程度で安定しているが、曳航船の速力は 4-6 ノットに渡り安定していない。後ろから来る波に加え、風向の変化が激しい時間であったため操船が困難であったことが理由であると推測する。

### 4.3 波向別の三次元船体動揺

船舶は図 4-45 のように重心を中心とした三軸(X 軸、Y 軸、Z 軸)に沿って回転運動、移動している<sup>(6)</sup>。本 GPS 装置では、Pitch ; X 軸回転運動、Roll ; Y 軸回転運動、Heave ; Z 軸上下移動が計測可能である。前項でも述べたとおり、船舶の真針路に対して、風浪を受ける場合、風上から来る波の影響や風圧抵抗により、三軸の何れかには作用し、定周期だった回転運動や移動に変化が見られると考えられる。



図 4-45：船体の 3 次元動揺

#### (1) 波向<000>時の Pitch 角

図 4-46 に波向<000>の場合の曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

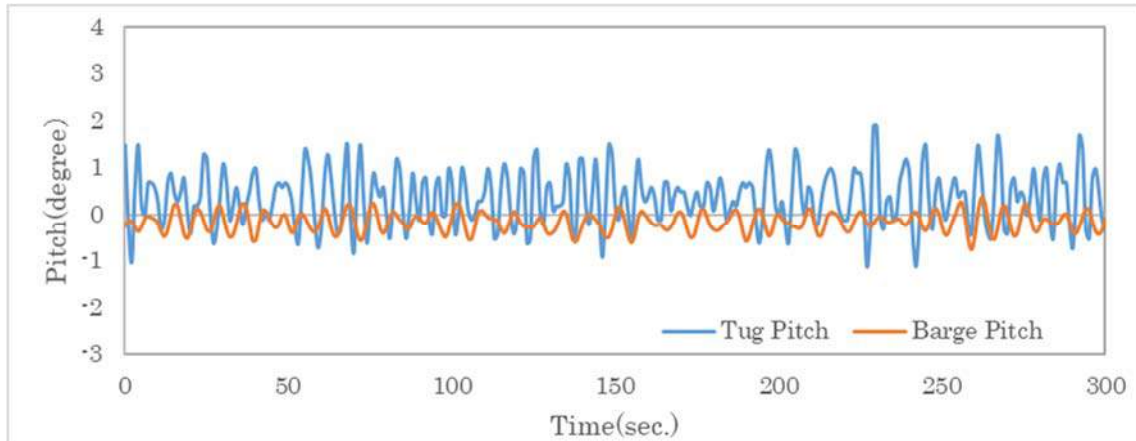


図 4-46 : 波向<000>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-46 より、被曳航船の Pitch 角は、0.5 度程度、そして曳航船の Pitch 角は 1 度以内と小さく、ほとんど縦揺れが少ないことが分かる。

(2) 波向<000>時の Roll 角

図 4-47 に波向<000>の場合の曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

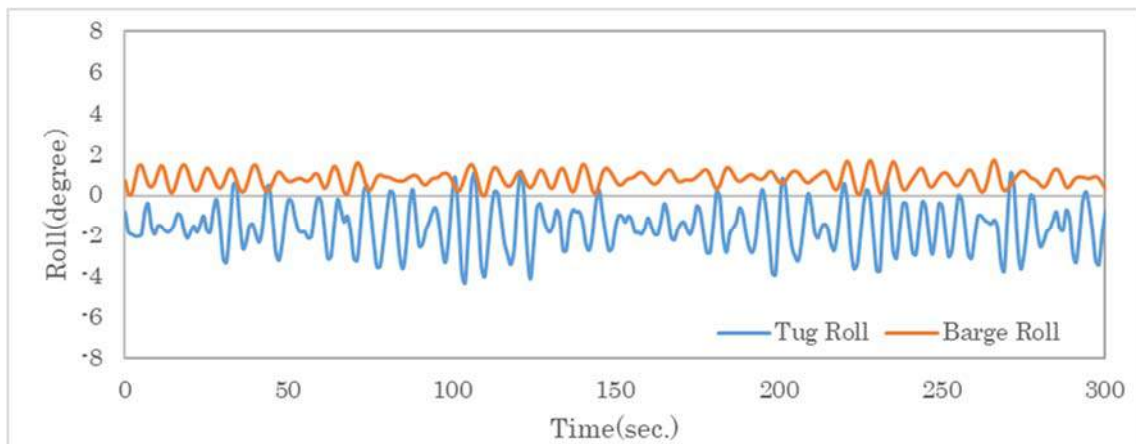


図 4-47 : 波向<000>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-47 より、被曳航船の Roll 角は、0.5 度程度、そして曳航船の Pitch 角は 2 度程度と小さく、横揺れも少ないことが分かる。

(3) 波向<000>時の Heave 偏位

次に図 4-48 に波向<000>の場合の曳航船・被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

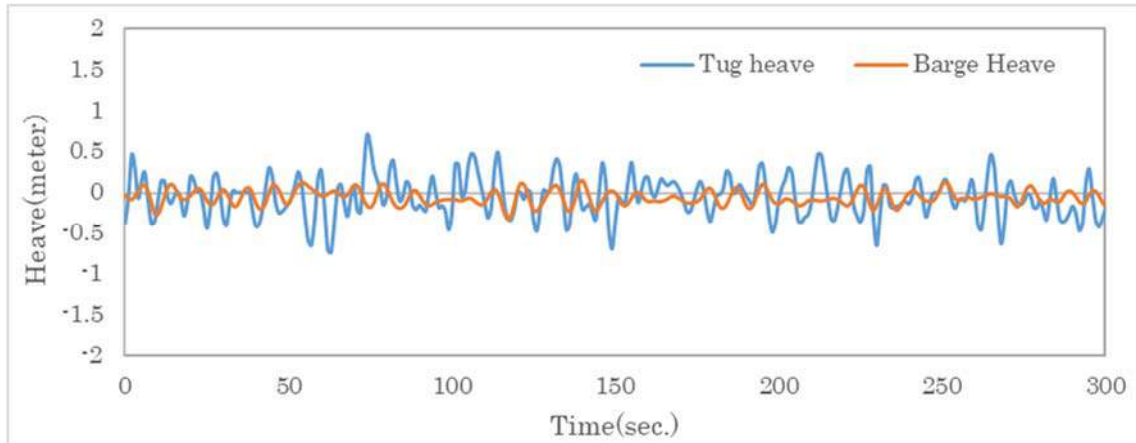


図 4-48：波向<000>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-48 より、被曳航船の Heave 偏位は、0.2m 程度、そして曳航船の Pitch 角は 0.5m 程度と小さく、上下揺れも小さいことが分かる。

(4) 波向<045><-045 (315)>時の Pitch 角

図 4-49 に波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

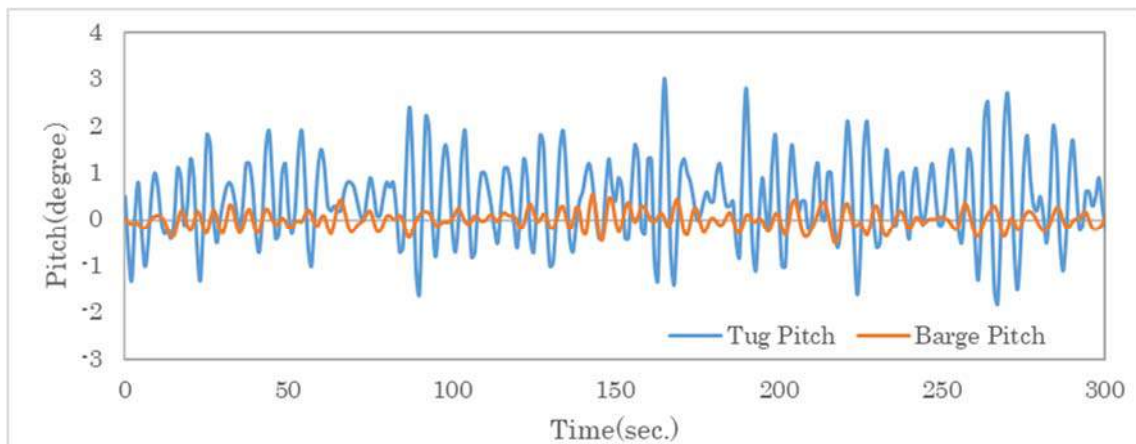


図 4-49：波向<045>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-49 より、被曳航船の Pitch 角はほぼ 0 に近い。また曳航船の Pitch 角は<000>の場合と比べ、2度前後の Pitch 角の変化がみられるが、安定していると言える。次に図 4-50 に波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。



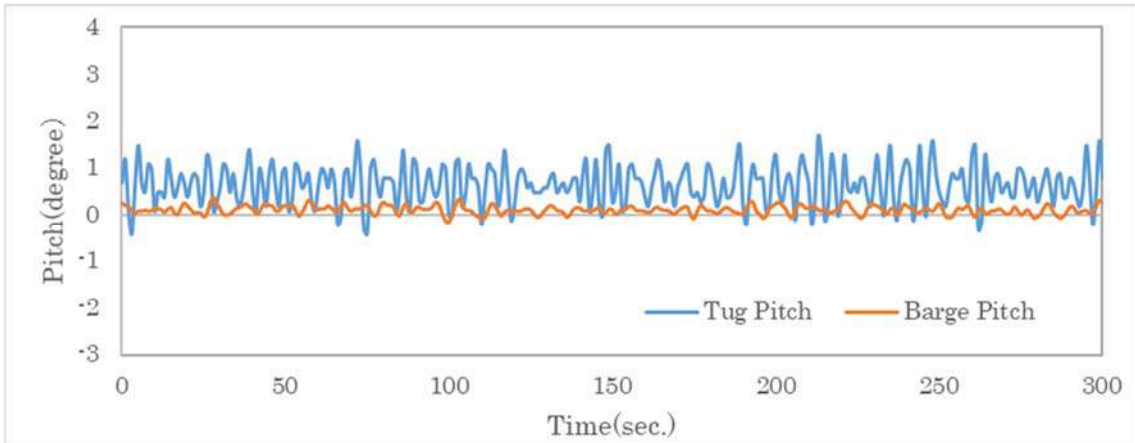


図 4-50 : 波向<315>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-50 より、被曳航船の Pitch 角は<045>の時と同様にほぼ 0 度で推移している。また曳航船の Pitch 角は 0 度に触れることがなく 1 度前後に傾いたままであるため、左舷からの波向の影響が出ている。

(5) 波向<045><-045 (315)>時の Roll 角

図 4-51 に波向<045>の場合の曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

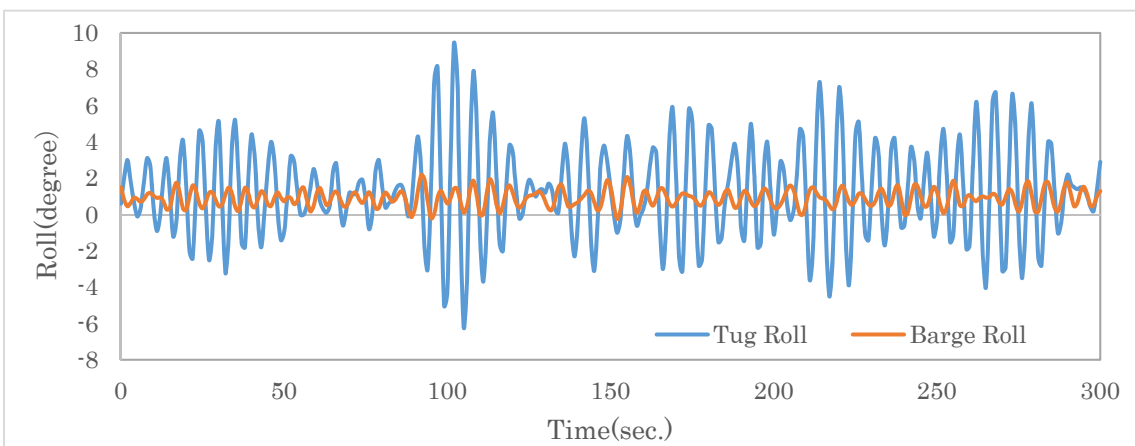


図 4-51 : 波向<045>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-51 より、被曳航船の Roll 角は、0 度に触れることがなく、1 度付近で推移している。また曳航船の Roll 角は、被曳航船と同じく 1 度を中心に時系列ごとに様々な振幅で推移している。次に図 4-52 に波向<135>の場合の曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

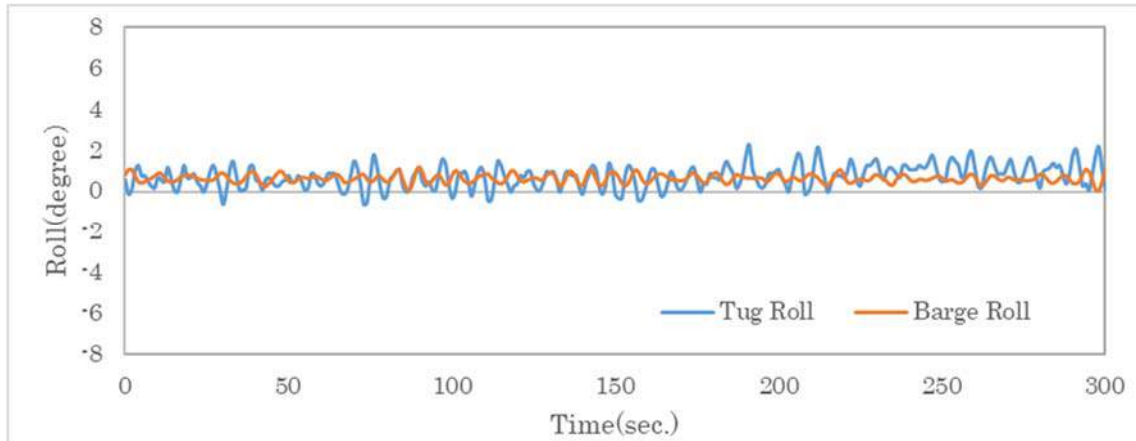


図 4-52 : 波向<315>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-52 より、曳航船、被曳航船ともに 1 度前後でほとんど変化なく推移しており、横揺れがほとんどないことが伺える。

(6) 波向<045><-045 (315)>時の Heave 偏位

次に図 4-53 に波向<045>の時の曳航船、被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

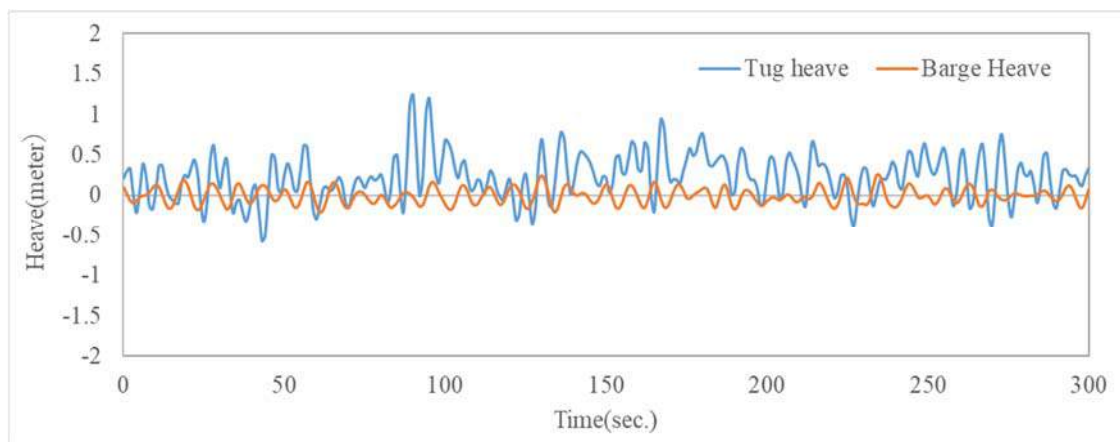


図 4-53 : 波向<045>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-53 より、被曳航船の Heave 偏位は、0.2m 程度、そして曳航船の Pitch 角は 1.0m 程度であるが、曳航船は不規則に上下揺れしていることが分かる。次に図 4-54 に波向<135>の時の曳航船、被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

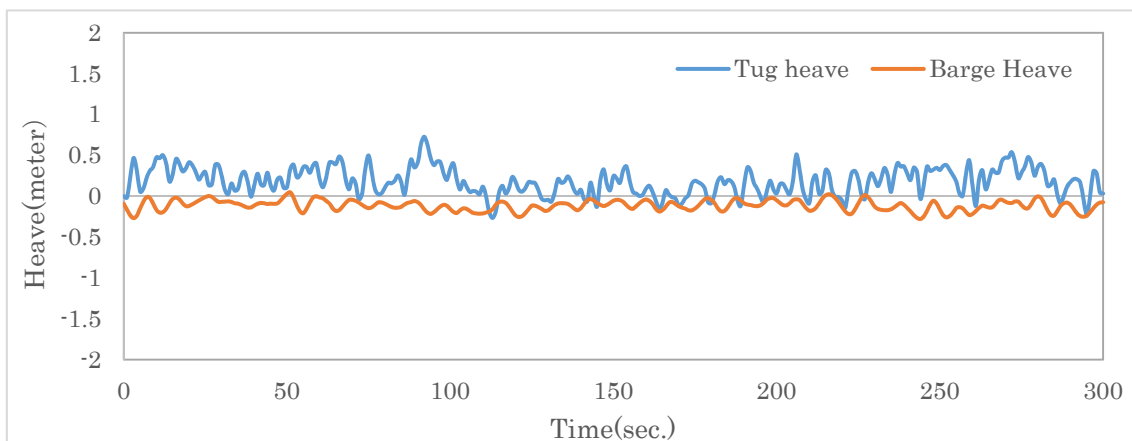


図 4-54 : 波向<315>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-54 より、被曳航船の Heave 偏位はほとんどない。そして曳航船の Pitch 角は 0.5m 程度であり、安定していると言える。

(7) 波向<090><-090 (270)>時の Pitch 角

図 4-55 に、波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

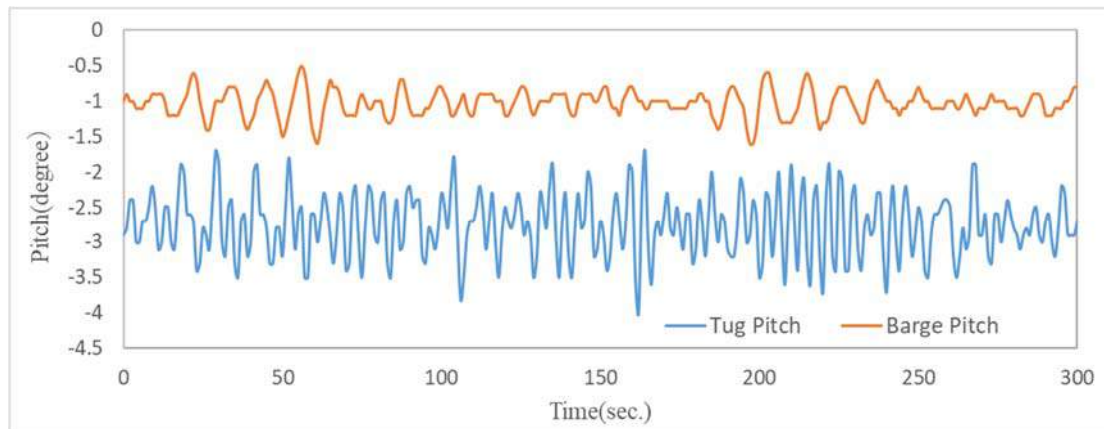


図 4-55 : 波向<090>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-55 より、被曳航船の Pitch 角は-1 度を中心に 1 度程度の幅で揺らいており、曳航船は-2.7 度を中心に 2 度程度の幅で縦揺れしている。次に図 4-56 に波向<270>の場合の曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

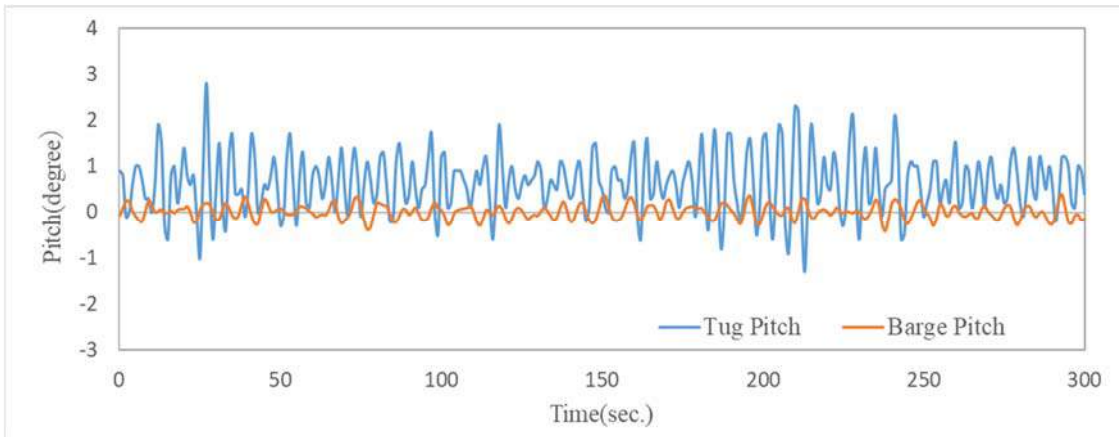


図 4-56 : 波向<270>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-56 より、被曳航船の Pitch 角はほぼ 0 度であり、曳航船の Pitch 角は 1 度付近を 1.5 度の振幅で揺れている。

(8) 波向<090><-090 (270)>時の Roll 角

図 4-57 に、波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

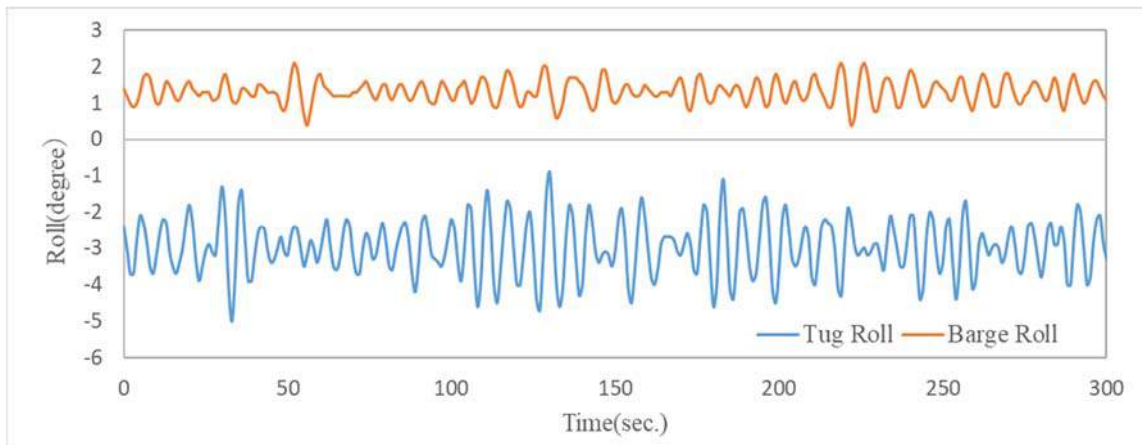


図 4-57 : 波向<090>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-57 より、被曳航船の Roll 角は 1 度前後で、振幅 1 度程度で揺れている。また曳航船の Roll 角は -3 度付近を中心に 2 度程度の幅で揺れている。次に図 4-58 に波向<270>の時の曳航船、被曳航船の Roll 角の結果を示す。

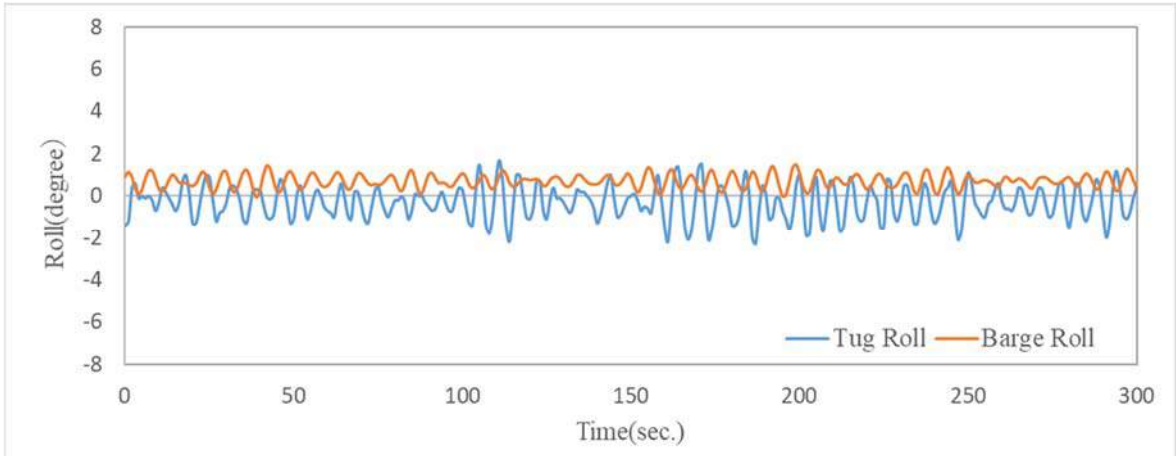


図 4-58：波向<270>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-58 より、曳航船、被曳航船の Roll 角はそれぞれ、1 度付近、そして-1 度付近で小刻みに揺れていることが分かる。しかし両船の振幅は小さく安定していることが分かる。

(9) 波向<090><-090 (270)>時の Heave 偏位

図 4-59 に、波向<090>の場合の曳航船・被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

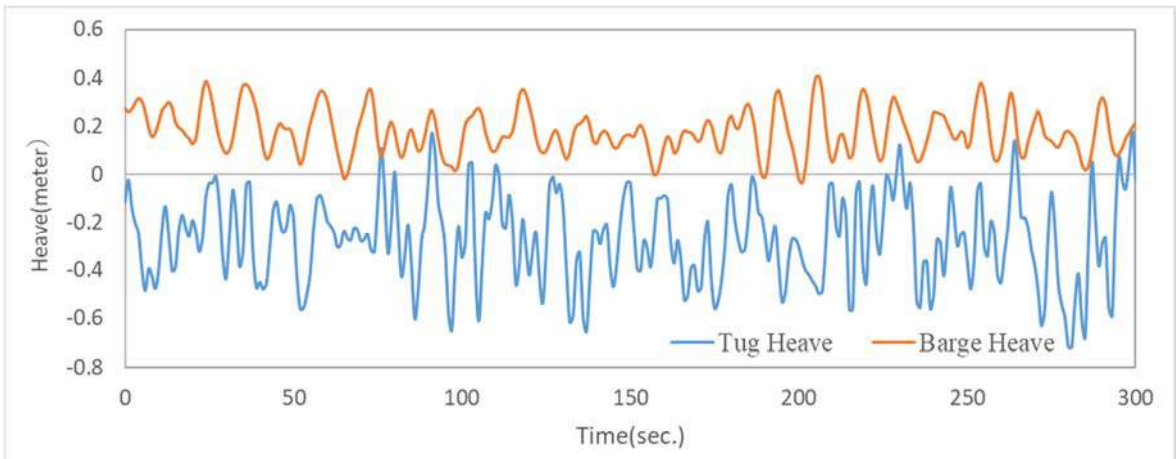


図 4-59：波向<090>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-59 より、被曳航船の Heave 偏位は 0.2m 付近で 0.2m 程度上下に揺れており、また曳航船は-0.2m 付近で 0.4m 程度上下に揺れている。次に図 4-60 に波向<270>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

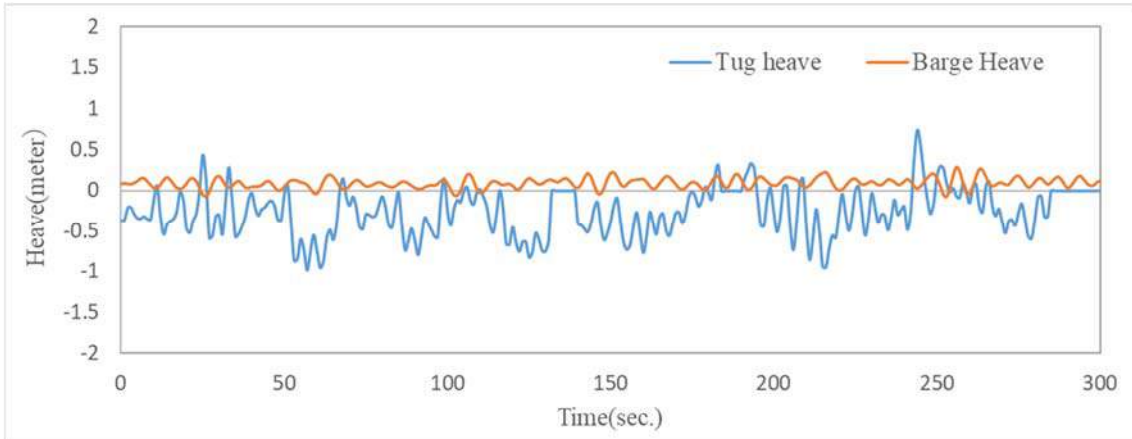


図 4-60：波向<270>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-60 より、被曳航船の Heave 偏位はほとんどない。また曳航船の Heave 偏位は-0.5m 付近で不規則に推移している。

(10) 波向<135>時の Pitch 角

図 4-61 に波向<135>の場合、曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

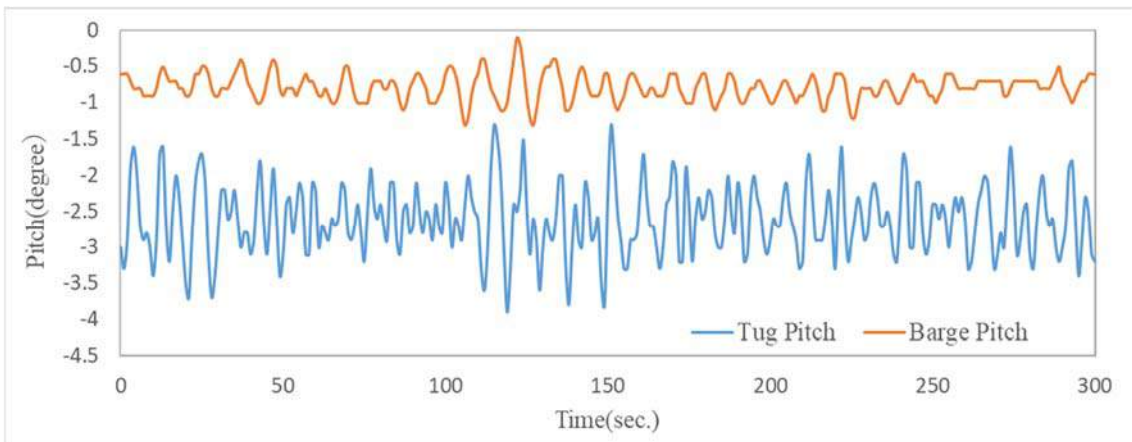


図 4-61：波向<135>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-61 より、被曳航船の Pitch 角は-0.7 度付近で 1 度程度の振幅で揺らいでおり、曳航船は-2.5 度付近を中心に 1.5 度程度の幅で揺れている。

(11) 波向<135>時の Roll 角

次に図 4-62 に曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

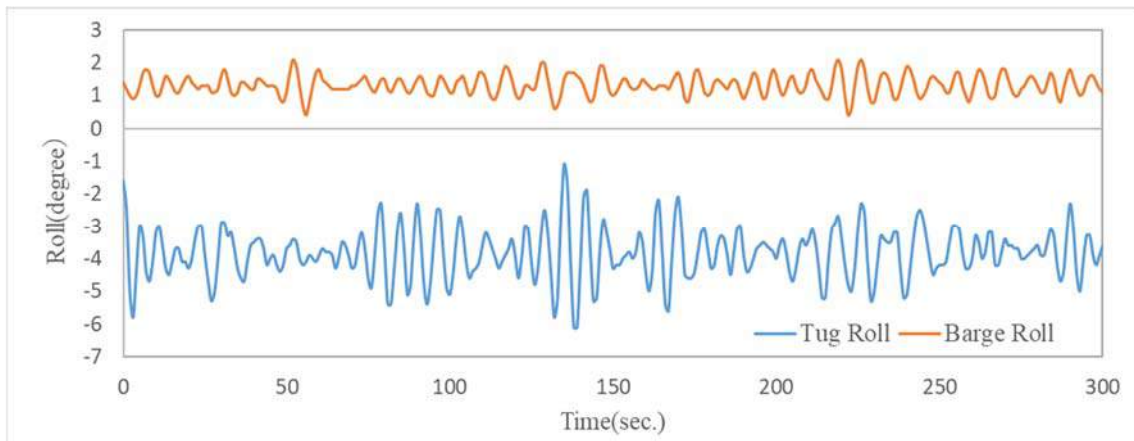


図 4-62：波向<135>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-62 より、被曳航船の Roll 角は 1 度付近で 0.5 度程度の振幅である。また曳航船は -4 度付近で 1.5~2 度程度の幅で不規則に揺れている。

(1 2) 波向<135>時の Heave 偏位

次に図 4-63 に曳航船・被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。

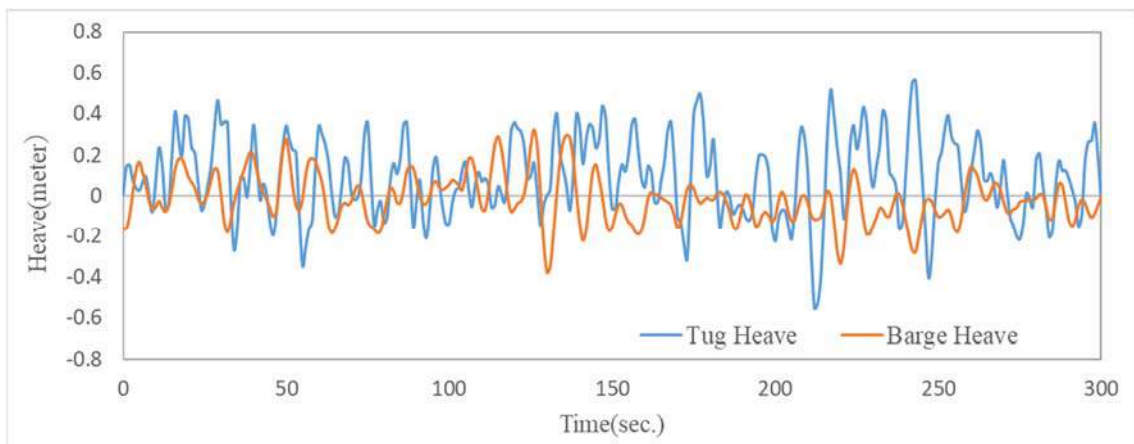


図 4-63：波向<135>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-63 より、被曳航船の Heave 偏位は中心から 0.2m 程度で上下に揺れており、また曳航船も中心から 0.4m 程度上下に揺れている。

(1 3) 波向<180>時の Pitch 角

図 4-64 に波向<180>の場合、曳航船・被曳航船の Pitch 角の結果を示す。

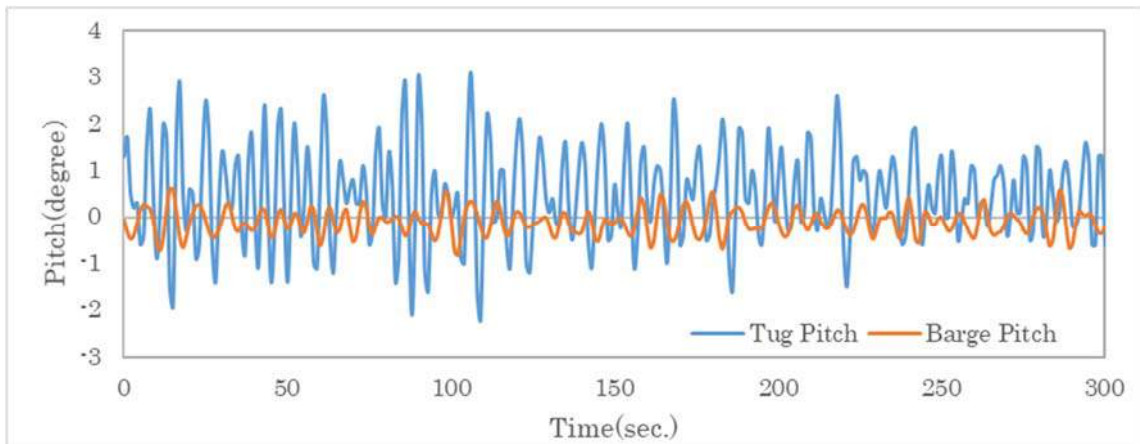


図 4-64 : 波向<180>の時の曳航船・被曳航船の Pitch 角

図 4-64 より、被曳航船の Pitch 角は中心付近で 0.5 度程度の振幅で小さい。また曳航船の Pitch 角は中心から 2~3 度程度の幅で揺れている。

(14) 波向<180>時の Roll 角

次に図 4-65 に曳航船・被曳航船の Roll 角の結果を示す。

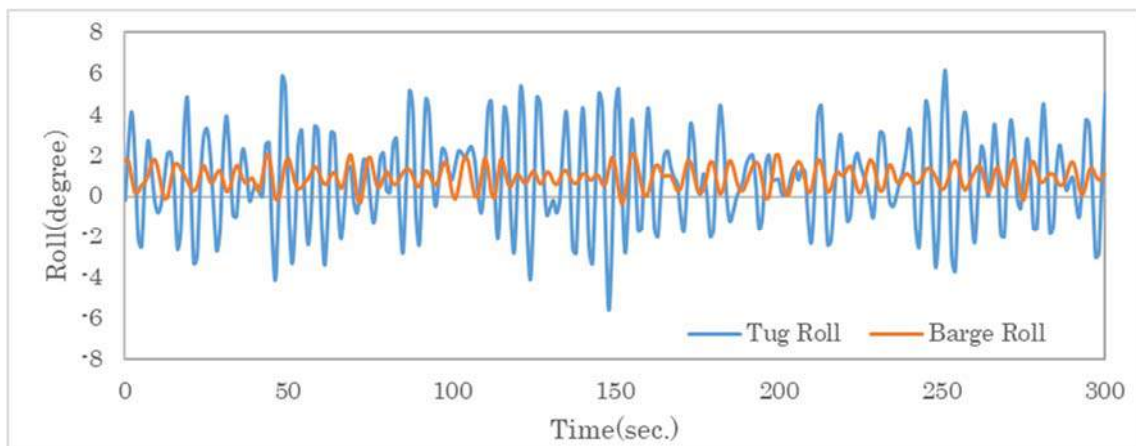


図 4-65 : 波向<180>の時の曳航船・被曳航船の Roll 角

図 4-65 より、被曳航船の Roll 角は 1 度付近で 0.5 度程度の振幅である。また曳航船は同じく 1 度付近で 1.5~2 度程度の幅で不規則に揺れている。

(9) 波向 180 時の Heave 偏位

最後に図 4-66 に曳航船・被曳航船の Heave 偏位の結果を示す。



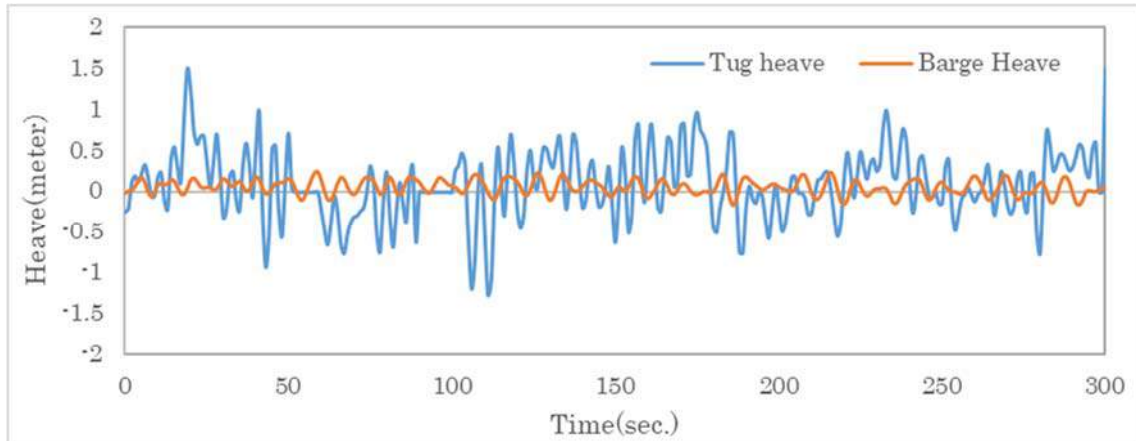


図 4-66：波向<180>の時の曳航船・被曳航船の Heave 偏位

図 4-66 より、被曳航船の Heave 偏位は中心から 0.2m 程度で上下揺れしている。また曳航船も中心から 0.5~1.0m 程度上下に大きく揺れている。

#### 4. 4 まとめ

##### (1) 加速度計の結果について

波向別の加速度計の計測結果により、以下の特徴が見られた。

##### ① 振動（加速度の実効値）について

振動の結果より、波向の違いによる差異はほとんどなく、気象状況特に風浪の大きさに比例する事が分かった。その場合、船体の舷方向の揺れが大きくなる傾向が見られた。また船首方位と波向が向かい合う際に、スラミングが大きくなり、上下方向の振動が大きくなるケースが所々観測できた。

##### ② 加速度スペクトラム密度について

加速度スペクトラム密度の結果より、気象状況の影響が大半であるが、同じ海域にいても、曳航船と被曳航船でその範囲の桁が変わることから、波を受ける面積や波の周期と全長の関係もあると推測する。

##### (2) GPS 計測結果について

##### ① 針路・速力について

針路・速力の結果より、気象が良い条件では、曳航船および被曳航船は大体同じ針路を中心に針路が変化し、その幅は最小となるが、気象が悪い場合は、針路変化は大きくなる。また正面若しくは真後ろから外力を受ける場合は、曳航船・被曳航船の真針路の差異はほとんどないが、外力を受ける場合は、曳航船・被曳航船の針路のずれが生じる。速力については、曳航船・被曳航船が等速である場合は曳航索に過度な張力が生ずることなく、真っすぐ曳航できていると言える。しかし今回の計測では針路

のずれがあるまま、曳航船・被曳航船が等速である場合も多く観測できたため、被曳航船が傾きながら曳航されていることが考察される。

## ② 3次元動揺について

3次元計測より、気象条件の変化により、比例して動揺が大きくなる傾向が見られた。また曳航船・被曳航船の傾き方は、各状況下で全く異なるが、今回の航海では最大で3度程度であったので安全性には問題ない。

## 5. 曳航操船情報表示システム

2回目の航海で並行して試行した曳航操船情報表示システムについて紹介する。

### 5.1 システムの構成

使用機器について簡単に解説する。

#### (1) 使用機器

- ・サテライトコンパス（古野電気 SC-50）

出力センテンス：HDT、HDM（船首方位）、ATT（姿勢角）、ROT（回頭角速度）、VTG、VBW（対地船速）、VHW（船首方位）、VDR（対水船速・流向・流速表示）、GGA、GLL、GNS（自船位置）ZDA（時間）

- ・サテライトスピードログ（古野電気 GS-100）

サテライトコンパスの提供情報に加え、船首での2速度(船首方向速度と舷側方向速度)と船尾での舷側方向速度及び船体の任意の位置での左右船速を表示可能である。

- ・分配器 ・データロガー ・無線送信機 ・無線受信機
- ・Bluetooth 送信機 ・パーソナルコンピュータ ・バッテリー

#### (2) システム構成

図 5-1 に示す機器構成で GPS データを処理する。まず、曳船及び被曳航船に GPS アンテナを設置する。各々の GPS 受信情報は GPS コンパス (ログ) の I/F でシリアルデータとして処理され、分配器を通し、データロガーに記録される。記録されたデータは情報表示プログラムのシミュレーションに使用する。被曳航船上では、分配器を通ったデータは無線送信機を介して曳船側の受信機で受信する。曳船上では、受信した被曳航船のデータ及び曳船上の分配器を通ったデータを、それぞれ Bluetooth 送信機で船橋内の PC に送信する。最後に Lab View により作成したプログラムによってデータを処理し、必要な情報を船橋の PC 画面上に表示する。

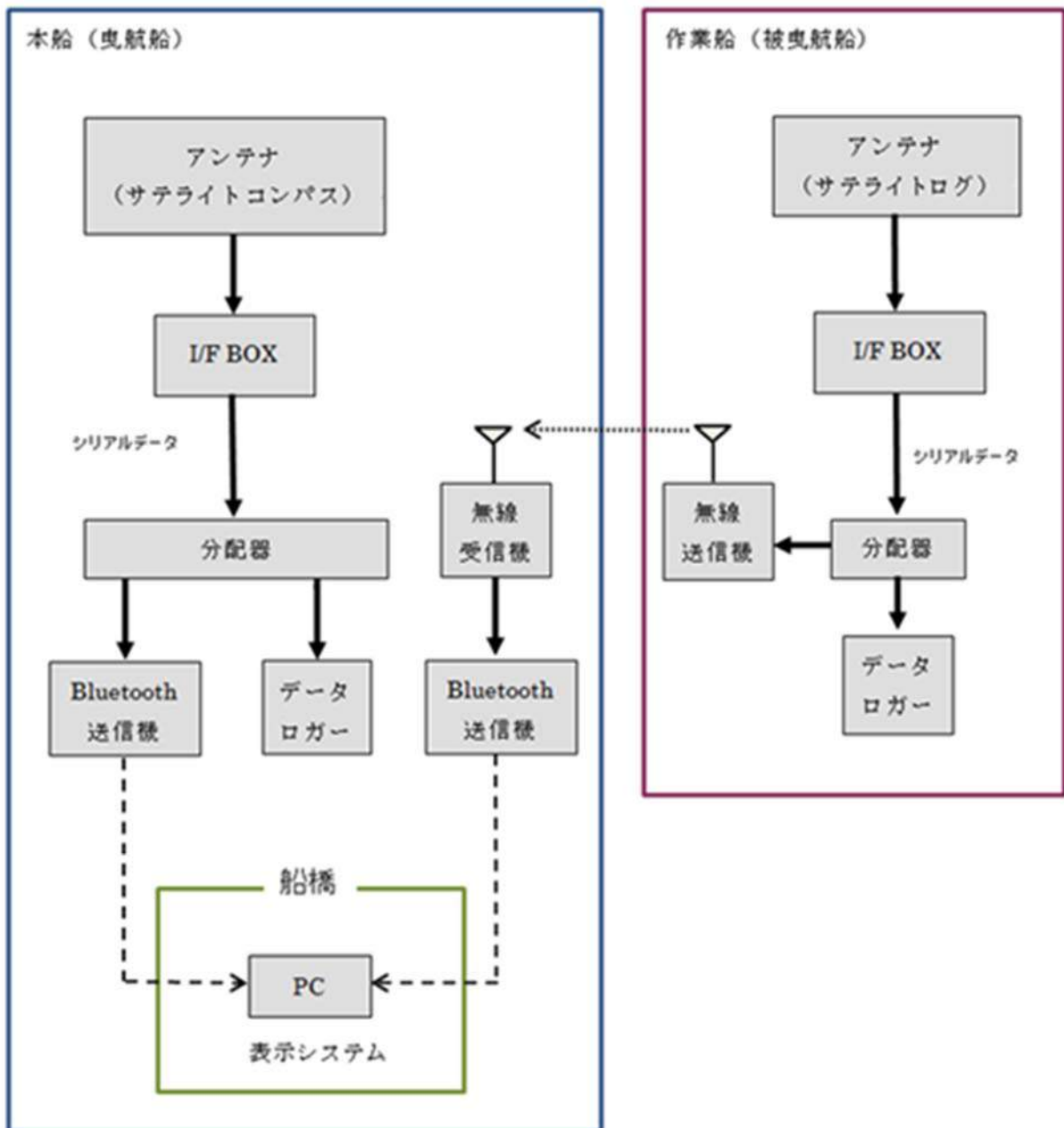


図 5-1： ハードウェア構成図

## 5.2 Lab View による表示プログラムの制作

### (1) Lab View とは

Lab View(ラボラトリ仮想計測器エンジニアリングワークベンチ)はグラフィカルプログラミング(G)言語を用いたデータの収集、計測器の制御、解析、シミュレーション、表示などのソフトウェアを構築するための開発ツールである。マウス操作及びブロックダイアグラム方式であるため、初心者にも直感的に計測、解析などのユーザーインターフェースを短い時間で作成することができる。

## (2) 表示プログラムの概要

GPS から送られてくるシリアルデータをインポート毎秒ごとに、HDG、COG、SOG、ROT、PITCH、ROLL、POSITION 等の抽出各種データを視覚的にわかりやすい図として表示させる。GPS から送られてくるシリアルデータにはどの数値がどの航海情報の数値かを判断できるようトーカを付けている。図 5-2 に GPS コンパス (SC-50) のシリアルデータの一部及び表示プログラムで使用した数値を示す。

5 行 で 1 セ ッ ト  ( 1 秒 ご と に 更 新 )	\$GPGGA,175323.48, <sup>①</sup> 3339.7131,N, <sup>②</sup> 13607.4356,E,2,10,1.4,54.9,M,,M,,*49
	\$GPZDA,175323,03,04,2017,+00,00*61
	\$PFEC,GPatt, <sup>③</sup> 232.6, <sup>④</sup> -0.5, <sup>⑤</sup> +1.5*4A
	\$PFEC,GPhve,-0.031,A*10
	\$GPVTG, <sup>⑥</sup> 222.1,T,229.0,M, <sup>⑦</sup> 4.9,N,9.0,K*40
	\$GPGGA,175324.48,3339.7121,N,13607.4346,E,2,10,1.4,55.0,M,,M,,*46
	\$GPZDA,175324,03,04,2017,+00,00*66
	\$PFEC,GPatt,232.6,-0.6,+1.4*48
	\$PFEC,GPhve,-0.023,A*13
	.

図 5-2 : シリアルデータ (GPS メッセージ : SC-50)

## (3) 表示器コンセプト

安全な曳航に必要な情報について考慮した場合、曳航操船を困難にしている原因として、以下の点が考えられる。

- ・被曳航船は曳船とは異なる運動特性を持っている。
- ・夜間・視界不良時、目視による被曳航船の状態把握が困難である。
- ・曳索の伸びる方向を考慮して操船しなければならない。

これらを解決するために必要な情報を以下の通りとした。

- ・被曳航船の航海情報 (針路や速度) 及び曳船の運動と被曳航船の運動の比較である。
- ・曳船と被曳航船の位置関係及び被曳航船の船体姿勢の情報が必要である。
- ・曳索の監視が必要である。

以上の項目を補填する表示器を作成し安全な曳航に必要な情報を表示することとする。以下に表示器の種類を述べる。

①被曳航船の位置関係表示器

位置関係の確認を行うとともに、被曳航船が曳船の動きに追従しているかを監視する

②被曳航船の航海情報表示器

被曳航船の動きを把握し、位置関係の変化を予測する。また、他の表示器の補足も行う。

③曳索の伸出方向表示器

曳索の伸出方向を表示する。

④被曳航船の姿勢表示器

被曳航船の Roll 角及び Pitch 角を表示し、危険な姿勢になっていないかを監視する。

また表示器のレイアウトコンセプトについては以下の通りとした。

- ・重要度（使用頻度）が高いものを最も見やすい位置に配置する。
- ・滅多に使用しないものは格納し、必要時のみ表示できるようにする。
- ・見間違いが起こらないようにする。

表示についてはまず、重要度を設定する。重要度が高い順に、①被曳航船の位置関係表示器（曳航中は被曳航船の位置や動向の把握が最も重要であるため）、②被曳航船の航海情報表示器（他の表示器を補完するため使用頻度が高い）、③曳索の伸出方向表示器（曳索の伸出方向が大きく変化するのは変針時などの限られた場合のみであるため、使用頻度は①、②より低下する）、④被曳航船の姿勢表示器（一目で危険がないことがわかれば注視する必要はない）とした。

また、パソコン画面上において表示器を配置するスペースは限られるため、さらに使用頻度が低いと判断したものは格納し、使用時のみポップアップ表示できるようにする。最後に見間違い防止のために、誤認しやすい単語を廃し、『曳船』を『本船』、『被曳航船』を『作業船』と表示し、さらに、表示器ごとに配色で区別できるようにする。

### 5.3 表示器

前項のコンセプトを前提として作成した表示器のメイン画面を図 5-3 に示す。

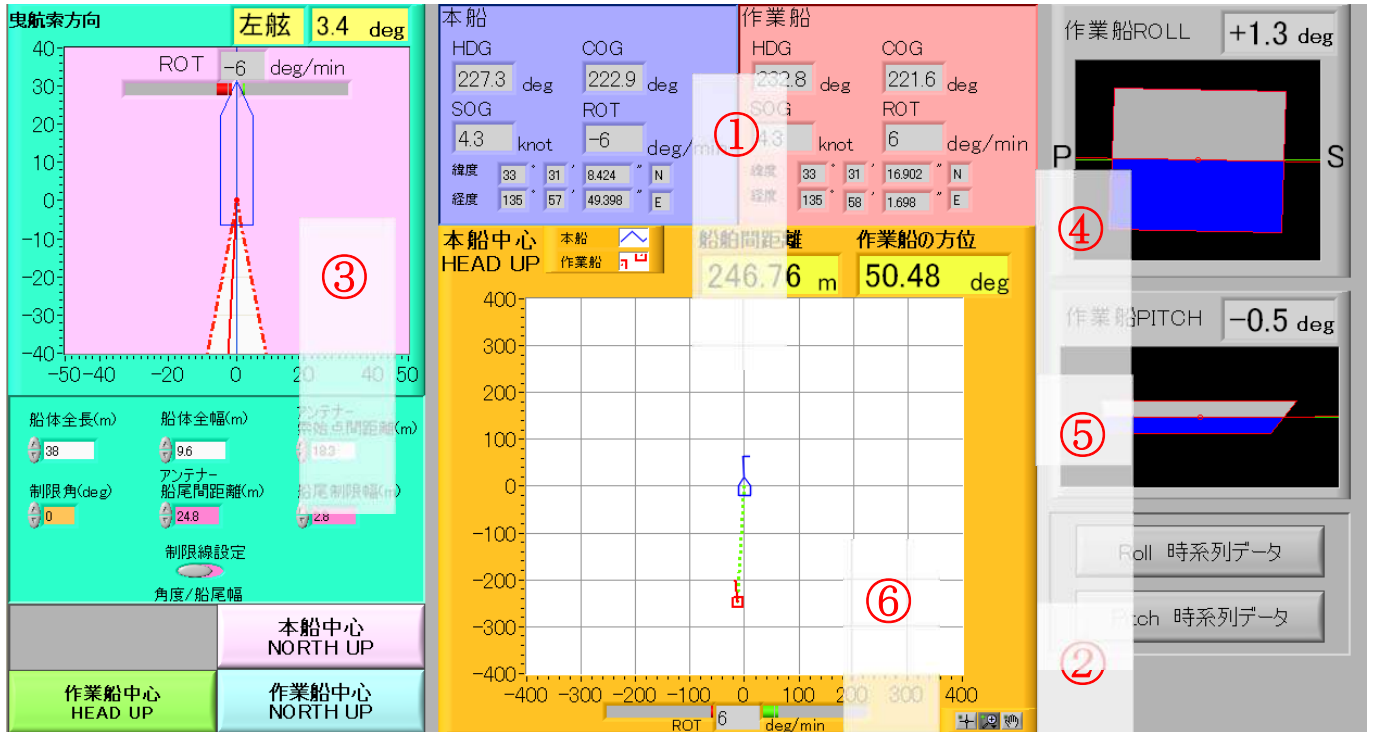


図 5-3： メイン画面

メイン・サブ画面について以下の機能を付加した。

- ・メイン画面

①基本情報表示、②位置関係図（曳航船中心 Head UP 表示）、③曳航索伸出方向図

④ロール角表示器 ⑤ピッチ角表示器

- ・サブ画面表示ボタン（ポップアップ）

①位置関係図（モーション別）、②ロール角時系列グラフ、③ピッチ角時系列グラフ

以下に各機能について解説する。

①基本情報表示

シリアルデータから抽出した数値をそのまま表示している。表示項目は曳船、被曳航船共に HDG、COG、SOG、ROT、PITCH、POSITION の 6 項目である。（図 5-4 参照）

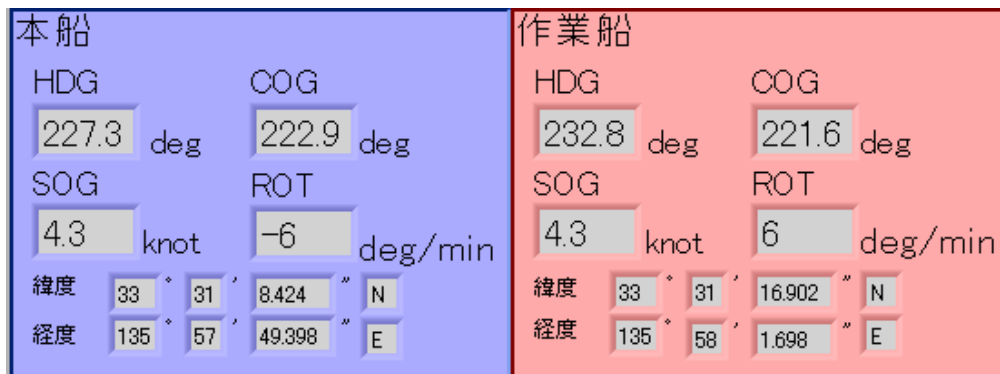


図 5-4： 基本情報表示器

### ②位置関係図

曳船及び被曳航船の座標情報から二船間の位置関係を算出しプロット表示する。各船の SOG ベクトル、回頭角速度を表示させることで位置関係のみならず 2 船の航行の様子が観測できる。曳索は過剰な張力を加えないために弛ませているが、弛ませすぎると索が海底に接触し危険である。2 船間の距離が分かれば、2 船間距離と曳索の伸出長を比較することで、曳索の弛み具合が推測しやすくなる。航行中最も使用頻度が高いと思われる曳船中心を中心とした Head UP 表示をメイン画面中央に配置した。(図 5-5 参照)

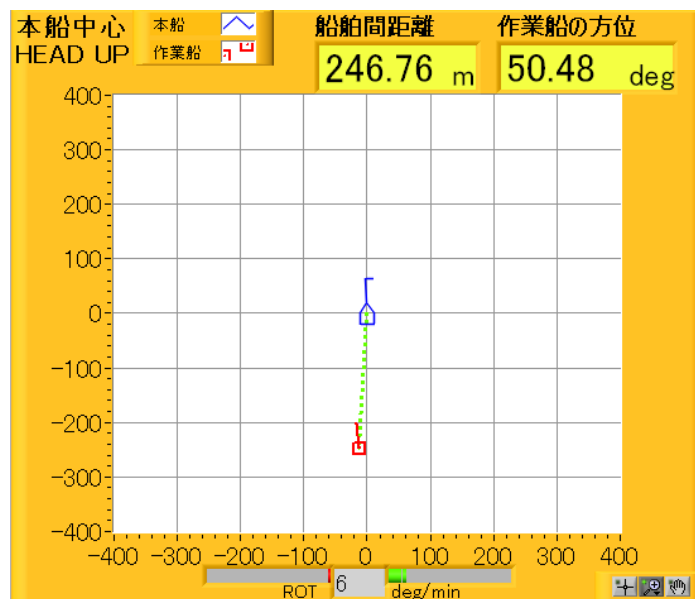


図 5-5： 位置関係図（曳船中心 HEAD UP 表示）

### ③曳航索伸出方向図

変針時に曳索の伸出角度は大きく変化する。その角度が大きくなると曳索のガイドからの滑落や構造物の破損等が懸念される。それを防ぐために、あらかじめ曳索伸出制限角を設定し、その範囲内に曳索があることを監視する表示器である。制限角の設定は曳船

のデータを入力することで各種船舶に対応できる。任意の角度設定も可能である。しかし、曳索は常にテンションがかからないよう弛ませて航行するため、GPS の位置情報のみから算出した曳索の伸出方向は正確ではない。(図 5-6 参照)

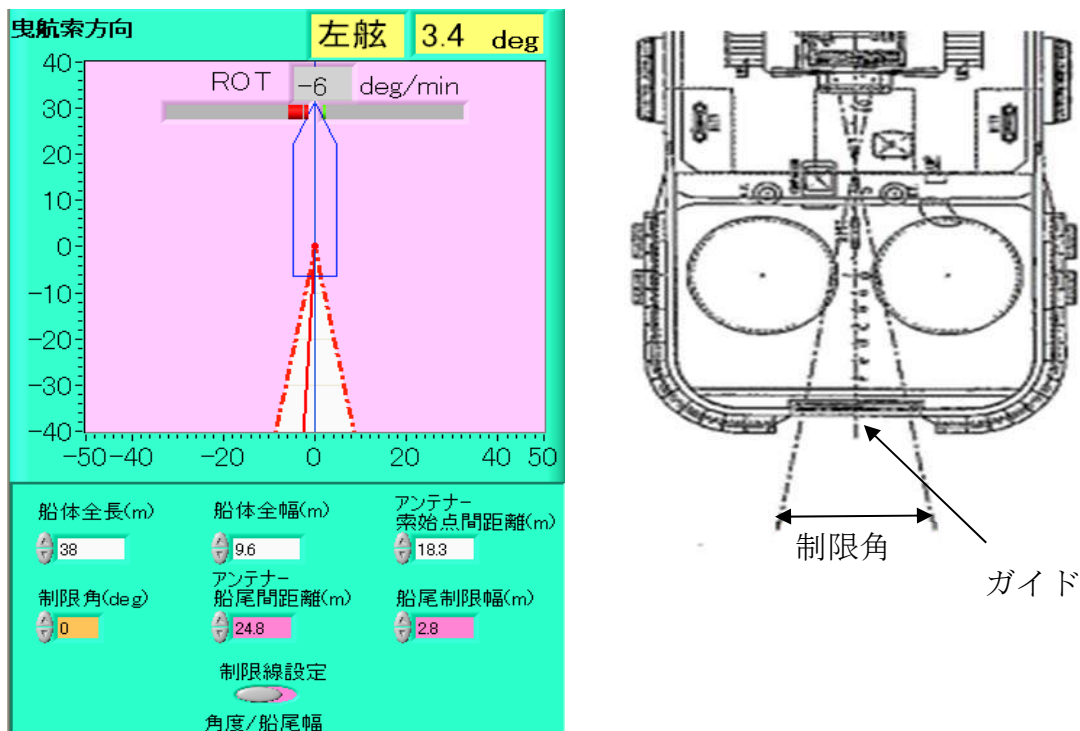


図 5-6：曳索方向表示器と曳船船尾の曳索伸出角度制限

④ROLL 角表示器 PITCH 角表示器

被曳航船の ROLL 角は船体断面図を模して図で傾斜姿勢を表示する。(図 5-7 参照)

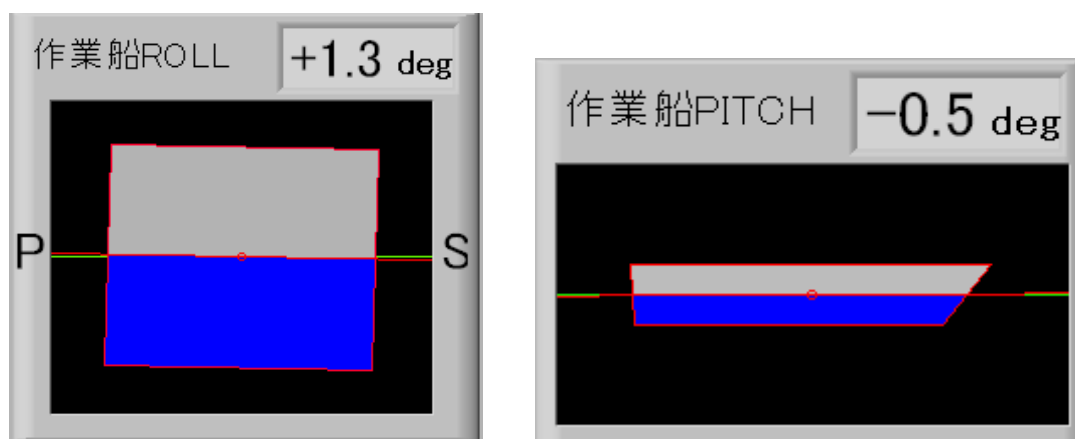


図 5-7：被曳航船 ROLL 角表示・PITCH 角表示器



⑤位置関係図

曳船中心 HEAD UP 表示以外の位置関係図は通常時は格納する。曳航開始時、停船時等で使いやすいモーション表示を選択しサブ画面としてポップアップ表示する。(図 5-8 参照)

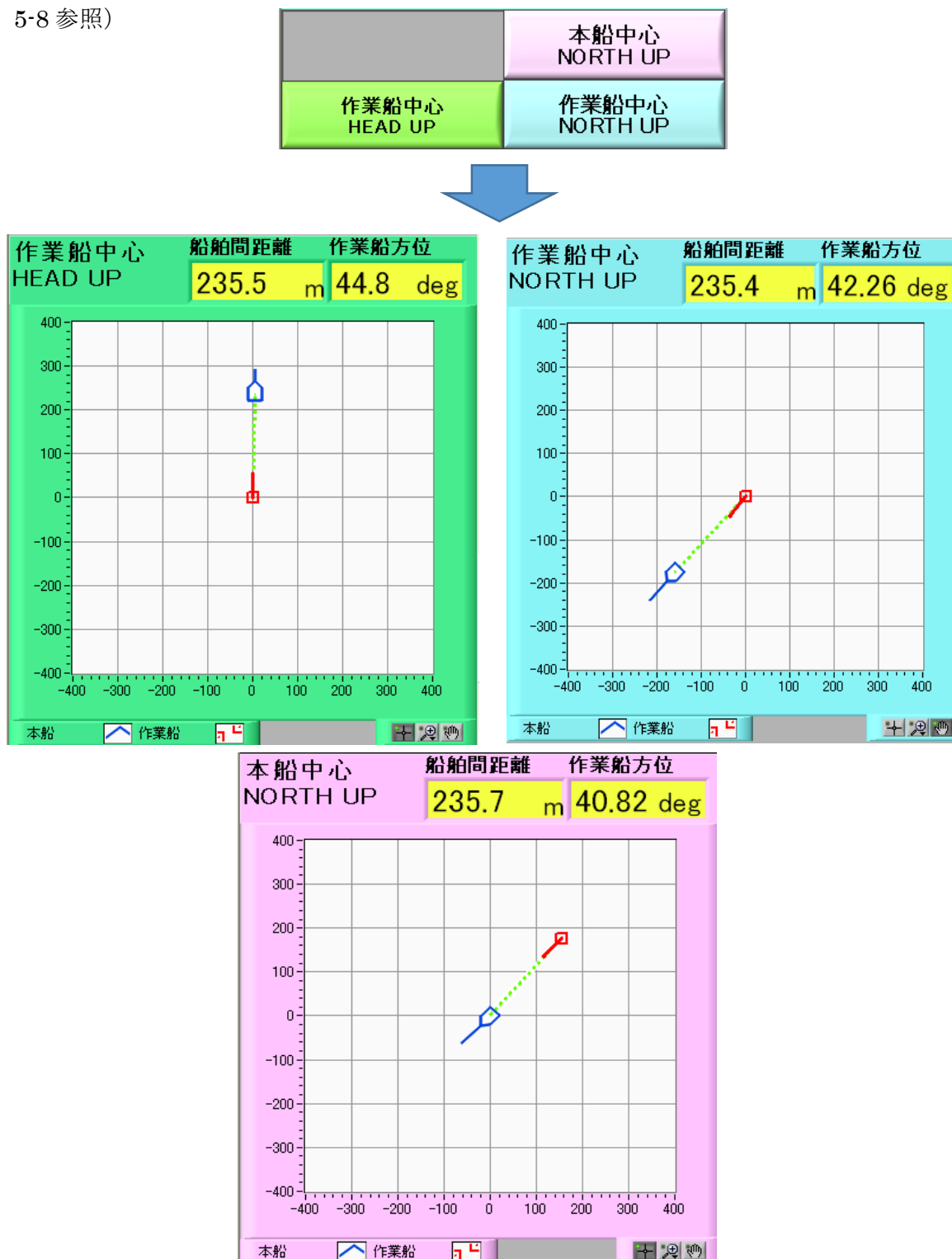


図 5-8 : 位置関係図表示ボタンによりサブ画面で表示される位置関係図

## ⑥ROLL 角・PITCH 角時系列グラフ

ROLL 角と PITCH 各の時系列データをグラフで表示する。毎分ごとに更新。後の船体動揺の予測に使用できることを期待して作成した。使用頻度が低いと予想し、メイン画面では格納している。(図 5-9 参照)

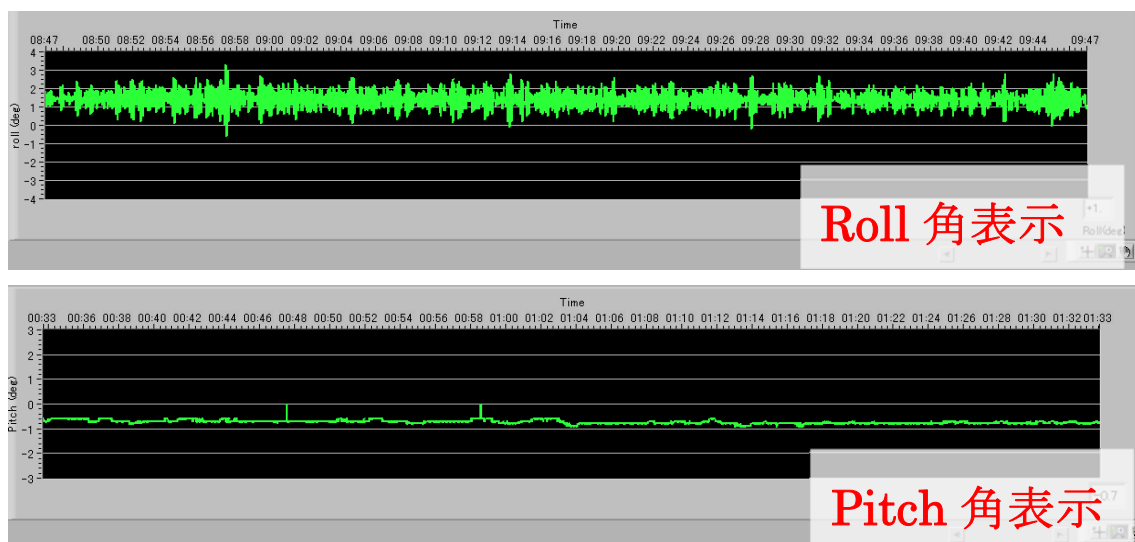


図 5-9： 被曳航船 ROLL 角時系列グラフ・PITCH 角時系列グラフ

## 5.4 検証と実践

### (1) 検証

台船、曳船に GPS コンパスを設置し、それぞれの航行データを記録した。記録したデータ 4 月に取得した袖ヶ浦-沖縄間の曳航情報を実際の GPS データ信号の代わりに LabView 上で走らせることで曳航中の表示をシミュレーションした。

### (2) 実践

本システムを設置し、むろつ丸乗組員に表示システムを実際の航海において使用してもらった。そして、曳航作業において、どのような場面でどのような表示がどのように利用できたか、不足している情報、必要のない情報などを確認する予定であった。しかし、通信不良のため実行は叶わず、次年度以降を見越して改良する。

## 6. 今後の予定

本年度共同研究では、曳航船・被曳航船の操船情報表示システムを構築し、陸上での前予備実験を終え、平成 29 年 11 月の実験航海では、試行まで実施した。本操船情報表示システム内には、GPS 位置より曳航船と被曳航船の関係を点で示すモニタが付いてい

るが、実際に必要となるのは、被曳航船の姿勢である。つまり図 6-1 のように曳航船・被曳航船を合わせた全長・幅で航行可航水域に対して、どれくらいの余裕があるか等である。

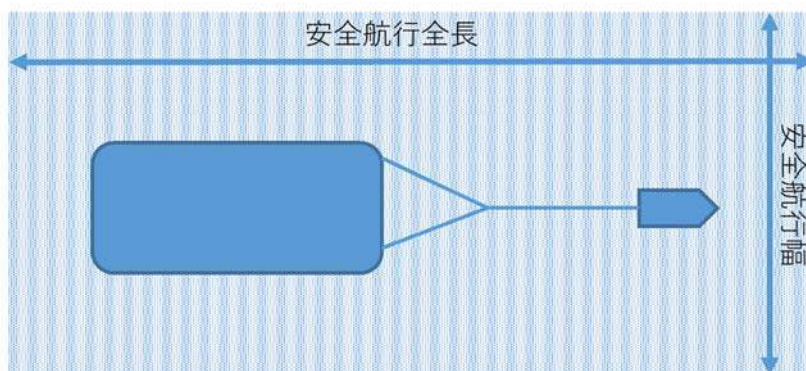


図 6-1：安全可航水域

既存の実験では、曳航船・被曳航船の船首尾線上に GPS デバイスを設置し、それぞれの真針路 (T.co) を計測してきた。平成 27 年度の実験 (大分～神戸) では図 6-2 に表すように、曳航船は被曳航船を真っすぐに曳航するために針路を左右に振り調整しながら進んでいることが分かった。

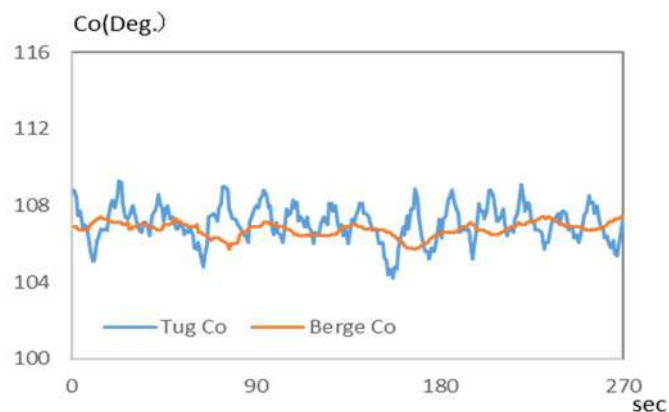


図 6-2：大分～神戸間の曳航船・被曳航船の真針路 (通常航海時) H27 年度報告書

しかし本年度の実験では、曳航船・被曳航船の真針路が完全にずれたまま曳航されていることが観察された。(図 6-3 下参照)

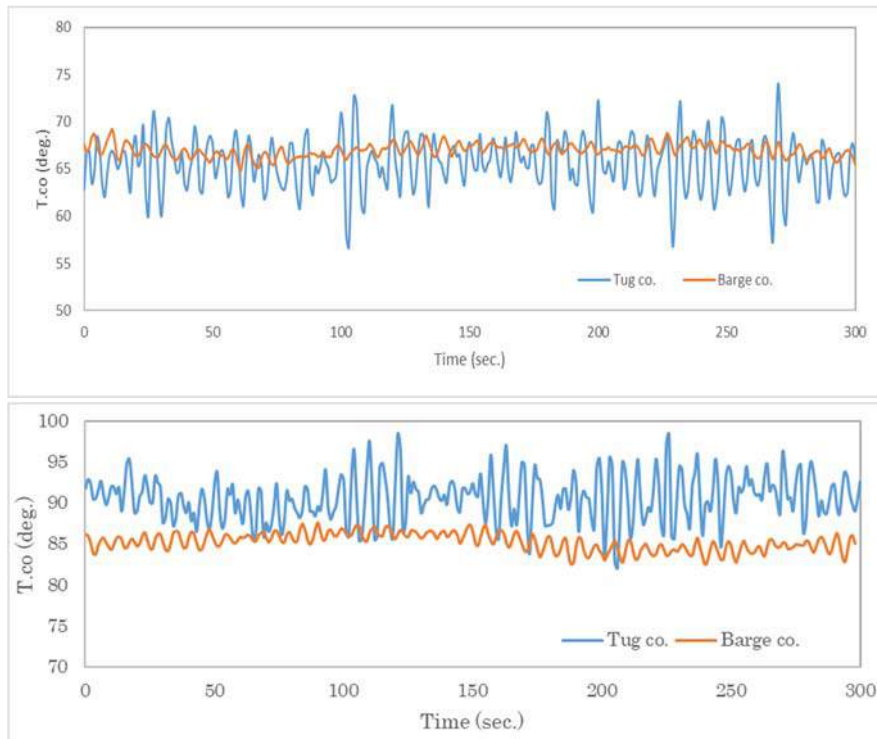


図 3 : 波向き<math>\langle 000 \rangle</math>の場合 (上)、波向き<math>\langle 270 \rangle</math>の場合 (下) の曳航船・被曳航船の真針路

従って図 6-3 の波形から、曳航船・被曳航船の関係は平行ではなく、被曳航船は外力の影響で片側のワイヤーロープが緩み、斜めを向いたままの姿勢が継続されたまま曳航されていると推測する。(図 6-4 右下の状態)

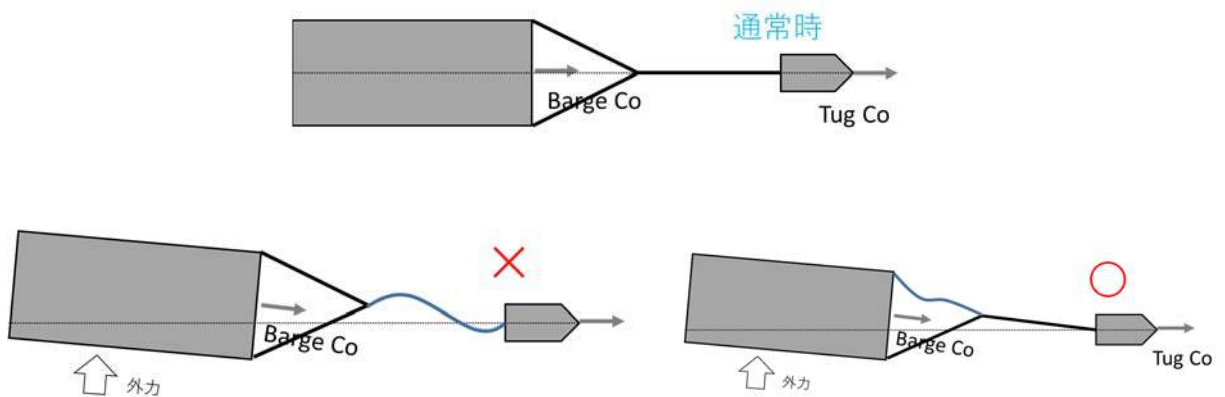


図 6-4 : 曳航船・被曳航船の状態

仮に沿岸や狭い水域で、図 6-2 の安全可航水域が狭まる場合、図 6-5 に示すように想定

した安全可航水域をはみ出しながら航行する可能性もある。

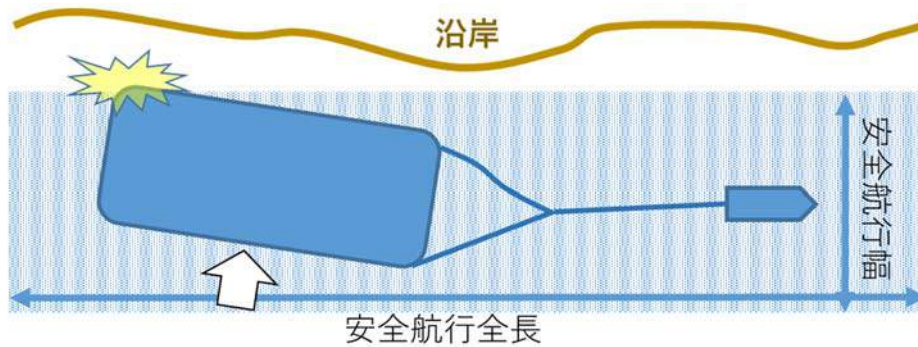


図 6-5 : 狭い水道における危険性

そこで今後の計測実験では、被曳航船の片舷に外力を受け、ワイヤーロープが緩む場合、ワイヤー固定点を支点に傾くことが予想される。従来通り船首尾線上に GPS デバイス 2 台を置くと被曳航船の真針路は分かるが、傾きは分からない。そこで、図 6-6 の様に、被曳航船の船首側にワイヤーロープ近傍に船首線と直角に両舷に GPS デバイス各 1 台そして曳航船側には GPS スピードログ 1 台、計 3 台を置き、図 6-6 の赤色で結んだ三角形の距離と角度を求め、曳航船・被曳航船の位置関係・変化を求める。

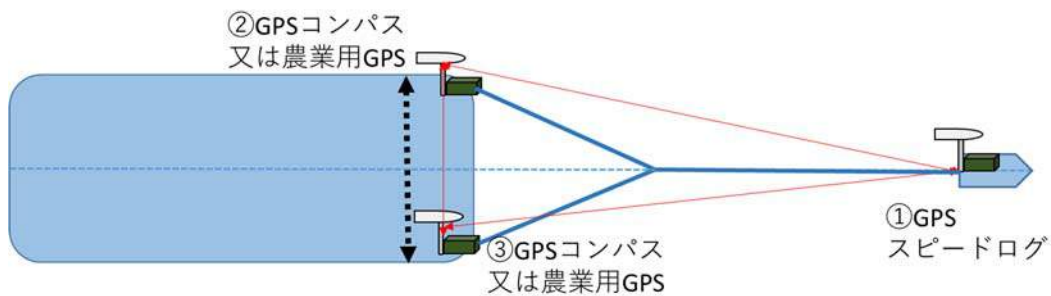


図 6-6 : GPS デバイス配置図

なお GPS スピードログは GPS の HDG (船首方位) を記録できるため、被曳航船の船首尾船上に GPS を置き、船首方位と真針路の差異を比較も解析に加える。

次年度は、計測および解析を実行するが、展望としては、操船情報表示システムを改良し、リアルタイムでの実験を実現するとともに、ARPA や ECDIS のような安全可航水域を示す表示器を構築したい。

## 参考文献

- (1) 海上保安庁, 海の事故情報 現況と対策 2017,  
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/doc/hakkou/toukei/28.html>, 03.2017
- (2) H28 年度報告書, P38~64, 04.2017.
- (3) 海上保安庁, 海洋速報&海流推測図  
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/index.html>
- (4) 海事实務研究会編, 図説 海事概要, 海文堂, P69-71, 1999
- (5) Micro Stone HP 「信号波形の強度を調べる」  
<http://www.microstone.co.jp/case/technical-13.html>
- (6) 橋本進他, 操船の基礎【二訂版】, 海文堂, P124-126, 2012