

波浪中を航走する小型高速旅客船における
乗客の安全性に関する調査研究報告書

平成26年12月

日本小型船舶検査機構

「波浪中を航走する小型高速旅客船における乗客の安全性に関する調査研究報告書」

目 次

1	調査研究の目的及び実施方法	1
1.1	調査研究の目的	1
1.2	調査研究の内容及び実施方法	1
1.3	委員会等について	1
1.3.1	委員会の構成	1
1.3.2	委員会の経過	2
2	あんえい号の事故概要等	6
2.1	船舶事故の概要	6
2.2	関係機関等の対応	18
3	実船計測	21
3.1	目的	21
3.2	実船計測概要	21
3.2.1	対象船	21
3.2.2	計測航路及び時期	23
3.2.3	計測項目と計測方法概要	25
3.3	計測海域の海象	30
3.3.1	沿岸波浪実況図	30
3.3.2	波浪推算データ	30
3.4	計測結果	34
3.4.1	大きな上下加速度が発生する海域での航行	34
3.4.2	統計解析	39
3.4.3	船長方向の位置と上下加速度	46
3.5	まとめ	52
4	水槽実験	53
4.1	海上技術安全研究所における水槽実験	53
4.1.1	実験概要	53
4.1.2	実験結果	55
4.1.3	船首上下加速度の推定	65
4.1.4	まとめ	67
4.2	大阪府立大学における水槽実験	69
4.2.1	目的	69
4.2.2	船上上下加速度の計測方法	70
4.2.3	規則波中における船上上下加速度計測	74

4. 2. 4	不規則波中における船上上下加速度計測	86
4. 2. 5	まとめ	115
5	調査結果	118
5. 1	あんえい号安全運航チャートの検討	118
5. 1. 1	安全運航限界の推定	118
5. 1. 2	安全運航チャートの試設定	122
5. 2	波浪中高速航行に伴う腰痛損傷回避のための加速度基準についての考察	124
5. 3	下向き加速度が1Gとなる波高と船速についての船型影響	128
5. 4	船型影響を考慮した小型高速旅客船の安全運航のための操船資料の作成方法	135
5. 5	小型高速旅客船の安全運航のための12隻の操船資料	140
5. 6	平水海域における海難事故例での検証	147
6	安全運航に向けて	149
6. 1	小型高速旅客船事業者へのヒアリング概要	149
6. 2	安全運航の考え方	152
6. 3	安全運航のための操船資料の普及に向けて	154
7	結言	156

付録

付録1	第三/三十八あんえい号 船舶事故調査報告書説明資料	付-1
付録2	小型船舶における腰椎骨折事例	付-11
付録3	「高速船の座席、シートベルトの安全性に関する調査」報告書(抜粋)	付-13
付録4	シートベルト事例 (運航規則・基準関連通達等)	付-41
付録5	船舶設備規程、小型船舶安全規則	付-47
付録6	国土交通省旅客船安全管理規程例(抄)	付-52
付録7	荒天時安全運航マニュアル関連通達(抄) (実船計測)	付-59
付録8	西表島一波照間島付近の海域の波浪発現頻度分布	付-65
付録9	実船計測期間中の沿岸波浪実況図	付-73
付録10	実船計測期間中の波高、波向、波周期、風速、風向の変化	付-85
付録11	石垣島一波照間島間航路で実船計測した時系列データ	付-101
付録12	実船計測データの統計解析結果及び船長方向の位置と上下加速度の関係 (水槽実験)	付-102
付録13	客室位置での上下加速度(上向き)の計測結果(水槽実験)	付-109
付録14	船長方向の位置と上下加速度の関係(水槽実験)	付-118
付録15	あんえい号規則向波中運動計測予備実験	付-125

付録16 模型船の選定結果	付-137
付録17 船上上下加速度簡易推定法に基づく下向き加速度が1Gを超えない波長	付-139
付録18 加速度算出エクセルシート	付-140

1. 調査研究の目的及び実施方法

1.1 調査研究の目的

小型高速旅客船が波浪中を高速で航行した際の激しい縦動揺により乗客が負傷(腰椎圧迫骨折)する事故が散発していることから、乗客が受ける衝撃を緩和する方策について運航方法等について調査・検討を行い、同様の事故の再発防止に資することを目的とする。

1.2 調査研究の内容及び実施方法

「波浪中を航走する小型高速旅客船における乗客の安全性に関する検討委員会」を設置し次の調査、研究を行った。

- ① 小型高速旅客船の主要目、運航実態、座席クッション等の把握などの基礎調査
- ② あんえい号等の小型高速旅客船の波浪中における挙動を水槽模型実験により分析
- ③ あんえい号(実船)の波浪中における挙動を計測分析
- ④ あんえい号における波浪中における安全運航(加速度の閾値)が推定可能な簡易チャートの作成
- ⑤ 小型高速旅客船用の安全運航のための操船資料の作成

1.3 委員会等について

1.3.1 委員会の構成(委員50音順)

委員長	片山 徹	大阪府立大学 大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 海洋システム工学分野 准教授
委員	狼谷 喜和	墨田川造船株式会社 取締役技術本部長
委員	小野古志郎	一般財団法人日本自動車研究所 安全研究部 技監
委員	金岡 恒治	早稲田大学 スポーツ科学学術院 教授
委員	齋藤 徳篤	独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 共有船舶建造支援部 担当部長 (同上前任者 大島 寛、市川 政文)
委員	佐藤 幹夫	一般社団法人日本旅客船協会 工務相談室長
委員	田口 晴邦	独立行政法人海上技術安全研究所 流体性能評価系耐航性能研究グループ グループ長
委員	竹市 亨	天龍工業株式会社 シート開発本部 技術部 部長
委員	南 清和	東京海洋大学 海洋工学部 教授
委員	宮本 武	一般財団法人日本船舶技術研究協会 研究開発プロジェクトリーダー
関係省庁	加藤 光一	国土交通省 海事局 安全政策課長
	園田 敏彦	国土交通省 海事局 検査測度課長
	平原 祐	国土交通省 海事局 安全基準課長

山本 博之 国土交通省 海事局 運航労務課長

※ 国土交通省海事局では、H25年7月1日付けで、安全・環境政策課、運航労務課、安全基準課の3課が、安全政策課に組織改編された。改編以降は、安全政策課、検査測度課の2課から出席。

日本小型船舶検査機構	理事 (同上前任者)	秋田 務 澤山 健一、森 雅人)
	業務部 検査検定課長 (同上前任者)	山本 眞佐夫 山澤 時廣)
	業務部 検査検定課 課長代理 (同上前任者)	松井 英治 鈴木 輝昭)
事務局	業務部 業務部長 (同上前任者)	岩本 泉 浅野 富夫)
	業務部 調査企画課長 (同上前任者)	三野 雅弘 平野 智巳)
	業務部 調査企画課 課長代理	築山 直樹
	業務部 調査企画課 (同上前任者)	金子 知布 渡邊 和幸)

1.3.2 委員会の経過

第1回 委員会

- ① 開催年月日 平成25年3月6日(水)
- ② 開催場所 自動車会館 第一会議室
- ③ 出席者 (委員・オブザーバー50音順、敬称略)

委員 片山 徹(委員長)、狼谷 喜和、藤田 剛(代理:大島 寛)小野 古志郎、金岡 恒治、佐藤 幹夫、宮田 和彦(代理:竹市 亨)、田口 晴邦、南 清和、宮本 武

関係省庁 奥村 英輝企画調査室長(代理:海事局安全・環境政策課長)、矢島 優(代理:海事局運航労務課長)、齋藤 雅彦企画係長(海事局運航労務課)、岡井 功専門官(代理:海事局安全基準課長)、竹原 隆船舶検査官(代理:海事局検査測度課長)

日本小型船舶検査機構(以下「JCI」)

澤山(理事)、石井(監事)、浅野(業務部長)、武藤(業務部検査検定課長)、平野(業務部調査企画課長)、鈴木(業務部検査検定課課長代理)、築山(業務部調査企画課課長代理)、渡邊(業務部調査企画課企画係長)

- ④ 主な審議事項
事業計画について

事故概要等について(第九十八あんえい号、第三あんえい号、第三十八あんえい号)

乗船報告(第十二あんえい号)及び(有)安栄観光の安全管理規程等

「高速船の座席・シートベルトの安全性に関する調査」(独立行政法人海上技術安全研究所平成19年度調査報告書)の概要について

現行規制(基準)等について

模型実験及び実船実験について

第2回 委員会

① 開催年月日 平成25年12月10日(火)

② 開催場所 日本小型船舶検査機構 第一会議室

③ 出席者

委員長 片山 徹

委員 狼谷 喜和、市川 政文、金岡 恒治、佐藤 幹夫、田口 晴邦、竹市 亨、宮本 武

関係省庁 黒田 修安全監理室長(代理:海事局安全政策課長)、小柳 康一安全政策調整官(海事局安全政策課)、矢島 優次席運航労務監理官(海事局安全政策課)、岡井 功専門官(海事局安全政策課)、雨宮 政宏運航監理係(海事局安全政策課)、竹原 隆船舶検査官(代理:海事局船舶測度課長)

オブザーバー 黒田 貴子(独立行政法人海上技術安全研究所)

J C I 森(理事)、石井(監事)、浅野(業務部長)、武藤(業務部検査検定課長)、平野(業務部調査企画課長)、築山(業務部調査企画課課長代理)、渡邊(業務部調査企画課企画係長)

④ 主な審議事項

あんえい号実船計測結果報告

第三あんえい号模型による向波中運動計測実験結果報告

負傷事故発生状況

海象と有義波高との関係

あんえい号運航基準等の評価

あんえい号以外の船舶のための運航基準等作成指針の策定方針

第3回 委員会

① 開催年月日 平成26年2月20日(木)

② 開催場所 自動車会館 第一会議室

③ 出席者

委員長 片山 徹

委員 狼谷 喜和、市川 政文、金岡 恒治、佐藤 幹夫、田口 晴邦、竹市 亨、宮本 武

関係省庁 黒田 修安全監理室長(代理:海事局安全政策課長)、小柳 康一安全政策調整官(海事局安全政策課)、矢島 優一次席運航労務監理官(海事局安全政策課)、雨宮 政宏運航監理係(海事局安全政策課)、竹原 隆船舶検査官(代理:海事局検査測度課長)

J C I 森(理事)、浅野(業務部長)、平野(業務部調査企画課長)、松井(業務部検査検定課課長代理)、築山(業務部調査企画課課長代理)

④ 主な審議事項

あんえい号運航基準(案)

模型船による向波中運動計測実験結果報告

あんえい号以外の船舶の運航基準等作成指針(案)

事業計画変更

第4回 委員会

① 開催年月日 平成 26 年 6 月 11 日(水)

② 開催場所 自動車会館 第一会議室

③ 出席者

委員長 片山 徹

委員 狼谷 喜和、金岡 恒治、丸田 晋一(代理:齋藤 徳篤)、佐藤 幹夫、田口 晴邦、竹市 亨、宮本 武

関係省庁 黒田 修安全監理室長(代理:海事局安全政策課長)、青木 郁夫次席運航労務監理官(海事局安全政策課)、竹原 隆船舶検査官(代理:海事局検査測度課長)

J C I 秋田(理事)、岩本(業務部長)、山本(業務部検査検定課長)、三野(業務部調査企画課長)、松井(業務部検査検定課課長代理)、築山(業務部調査企画課課長代理)、金子(業務部調査企画課)

④ 主な審議事項

あんえい号運航基準(案)について

模型船による向波中運動計測実験結果報告

あんえい号以外の船舶の運航基準(案)

事業報告書作成(案)

第5回(最終回) 委員会

① 開催年月日 平成 26 年 7 月 31 日(木)

② 開催場所 日本小型船舶検査機構 第一会議室

③ 出席者

委員 長 片山 徹

委員 狼谷 喜和、金岡 恒治、佐藤 幹夫、田口 晴邦、竹市 亨、宮本 武

関係省庁 加藤 光一安全政策課長、黒田 修安全監理室長(海事局安全政策課)、酒巻 英一首席運航労務監理官(海事局安全政策課)、小柳 康一安全政策調整官(海事局安全政策課)、青木 郁夫次席運航労務監理官(海事局安全政策課)、竹原 隆船舶検査官(代理:海事局検査測定課長)

J C I 秋田(理事)、岩本(業務部長)、山本(業務部検査検定課長)、三野(業務部調査企画課長)、松井(業務部検査検定課課長代理)、築山(業務部調査企画課課長代理)、金子(業務部調査企画課)

④ 主な審議事項

あんえい号以外(12隻)の加速度チャートについて

小型高速旅客船事業者(石垣島)への出張調査の報告について

本事業結果の成果普及について

事業報告書作成について

2. あんえい号の事故概要等

2.1 船舶事故の概要(旅客船第九十八あんえい号旅客負傷事故(平成21年4月30日)の概要)

平成21年4月30日(木)09時40分頃、有限会社安栄観光(以下「A社」という。)が運航する旅客船第九十八あんえい号(総トン数19トン、乗員2名、旅客28名。以下「あんえい号」という。)が西表島(いりおもてじま)から石垣島(いしがきじま)に向けて航行中、西表島北東方沖(鳩間島(はとまじま)灯台から137° 5.6M付近)において船体が縦に動揺した際に旅客2人が負傷(いずれも腰椎圧迫骨折)した。

※ 本資料は、運輸安全委員会船舶事故調査報告書(平成23年3月25日公表資料)を元に委員会資料として作成したものである。

表2.1-1 第九十八あんえい号の主要目

総トン数	19トン	用途	旅客船
L×B×D	25.60×4.00×1.45	航行区域	限定沿海区域
船質	軽合金	進水年月	平成17年4月
推進機関	ディーゼル機関3基	最大搭載人員	旅客99人、船員2人(計101人)
出力	1,545kW(連続最大)	最大速力	約40ノット(時速74km)
推進器	ウォータージェット推進器3基		

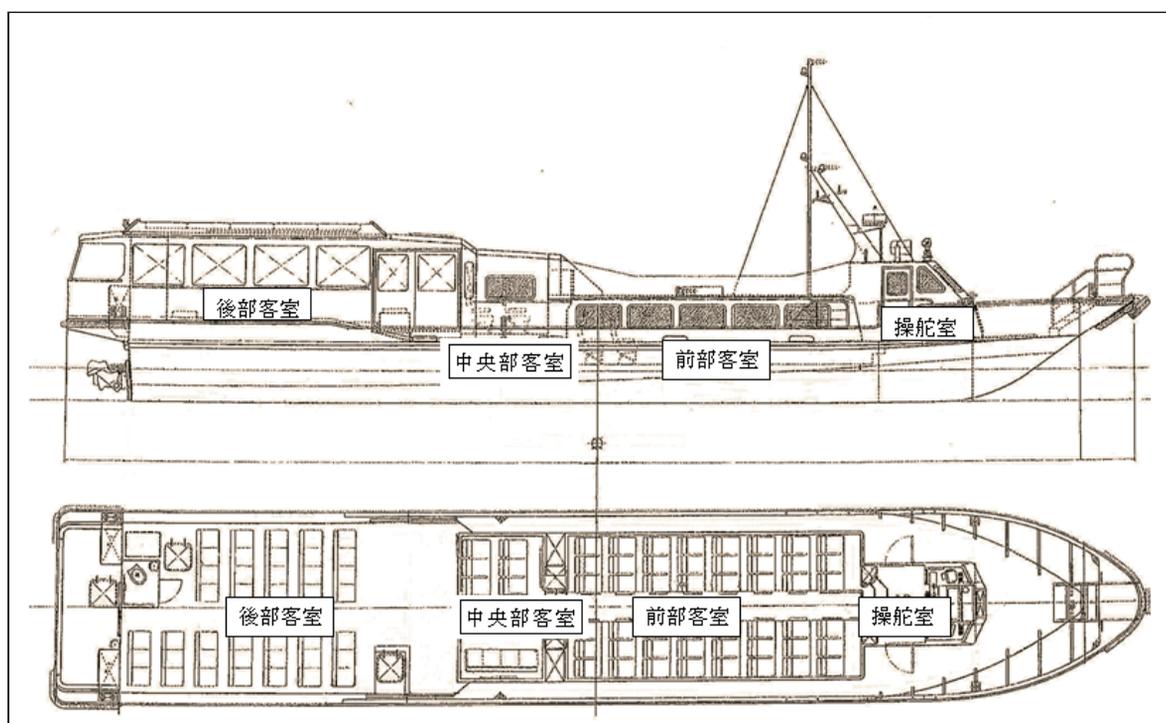


図2.1-1 第九十八あんえい号の一般配置図

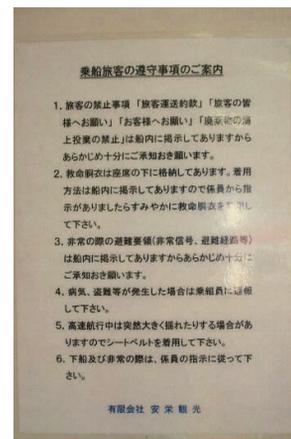
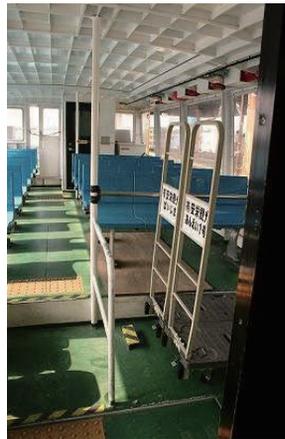
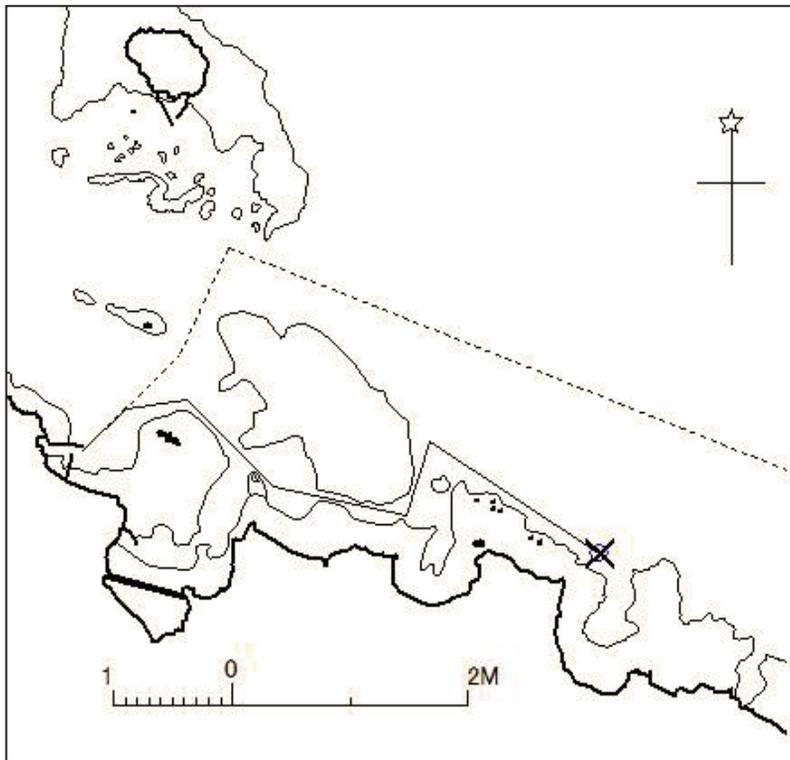
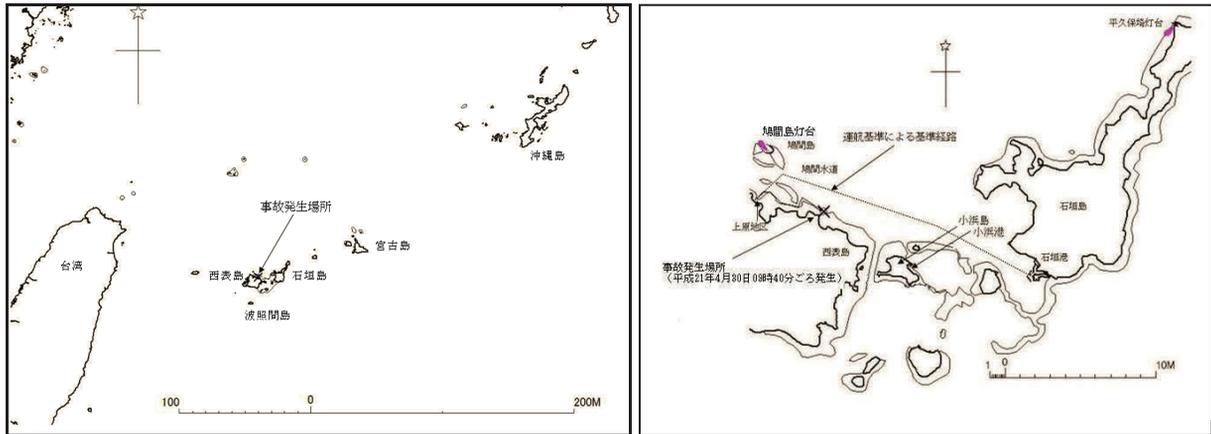


写真 2.1-1 あんえい号の外観及び客室、船内表示



- (上左)
八重山列島周辺海域
- (上右)
推定航行経路図
- (左)
推定航行経路図の拡大図
(破線は基準航路、実線は事故時の航路、×は事故発生場所)

図2.1-2 事故発生水域

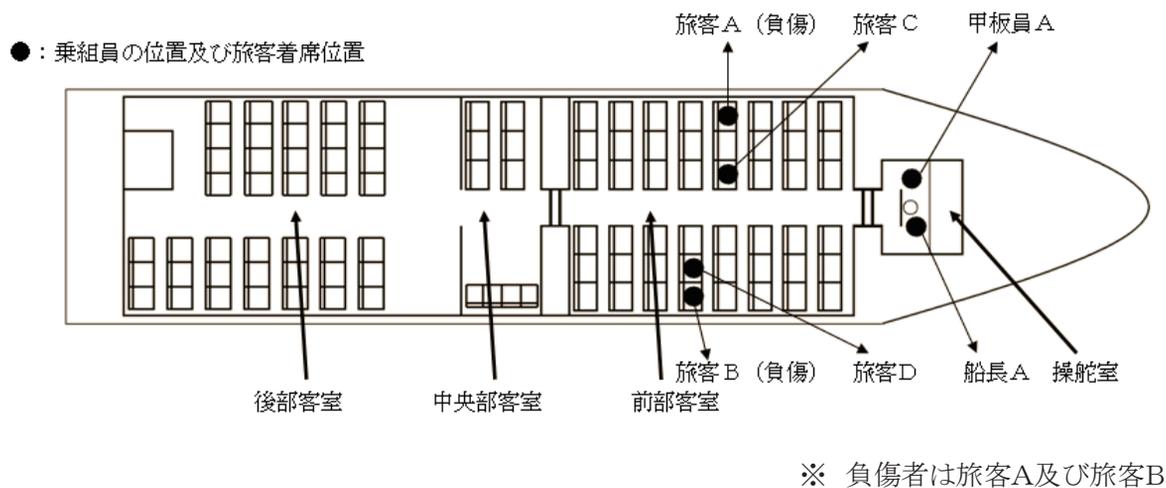


図2.1-3 事故発生時の旅客の着席状況

事故発生時の状況について

- ① 船長A(30歳男性、一級小型船舶操縦士、船長としての乗務は平成19年8月頃から)の口述
 - 前回旅客負傷事故(平成21年1月26日に発生した第78あんえい号の事故を指していると思われる)の発生後、A社から乗組員に対し、時化たときには速力を落として航行するよう注意があった。事故当時は、赤離島(あかばなりじま)北北西方沖から、約25knまで減速して航行した。大きな波が来ると、更に約12～13knまで減速するとともに、波頂を正船首から受けないよう右に変針し、船体が縦に動揺するのを抑え、波を越えてから約25knまで増速することを繰り返す操船を行っていた。
 - 上原(うえはら)地区栈橋を出航して約15分後、船首方の赤離島東方リーフ近くの変針予定場所に近づき、船首方及び右舷側のリーフとの距離を確認するため右舷船首方を見ていたとき、突然、甲板員Aが声を上げたので、視線を左に向けると左舷船首方から接近する大波(以下「本件大波」という。)を発見し、あんえい号は、針路を変えることも減速することもできず、船首が波頂に乗り、そのまま波間に落ちた。
 - 船首が波間に落ちたとき、大きな衝撃を感じた。
 - 本件大波の波高は約2.5mであったと思った。
 - 前部客室から叫び声が聞こえたので、甲板員Aに見回るよう指示をし、速力を約5knまで減じた。
 - 甲板員Aから報告を受けたのち、石垣港離島ターミナル内のA社事務所に携帯電話により負傷した旅客の状況を伝え、速力を約17～18knまで増速して石垣港に向かった。
- ② 甲板員A(26歳男性、平成18年8月頃入社)の口述
 - 事故当時は約26～27knで航行していた。もっと速力を落としていれば波による衝撃は小さくなったと思うが、あまり速力を落とし過ぎると船が波に負けて航行できないものと思った。約

20knぐらいまでは減速できると思った。

- 船体が持ち上がったとき、屈み込む体勢で身構え、目の前にあったジュース缶が約20cm 浮き上がったのを認め、あんえい号が波間に落ちた時の衝撃が、今までになく大きなものであったと思った。本件大波は、この日に遭遇した波の中で、最も大きな波であったと思った。
 - (船長の指示により) 前部客室に入ると、旅客Bが痛みを訴えていることに気付いて声を掛けしたが、旅客Bが歩ける状態ではなかったため、旅客Dとともに旅客Bの両脇を抱きかかえて中央部客室に運び、3人掛けの座席のひじ掛けを上げて、その上に横たわらせた。
 - その後、前部客室に戻り、痛みを訴えている旅客Aに近づき、旅客Bと同様に中央部客室に移動させようとしたが、旅客Cが1人で旅客Aを支えながら、中央部客室の3人掛けの座席の上に横たわせ、操舵室に戻り、船長Aに旅客2人が負傷したことを伝えた。
 - 石垣港に着くまで負傷した旅客を数回にわたり見回った。
- ③ 旅客A(58歳女性、身長154cm、体重約60kg、本事故による負傷者)の口述
- 自分の前の座席の、背もたれの背面に取り付けられていた手すり(以下「手すり」という。)を握り、窓から大きな波や窓にかかるしぶきの様子を見ていたが、本件大波により船首が波間に落ちた際、身体が宙に浮き、天井に頭部が当たったのち、臀部から座席に落ちて腰部に動けないほどの痛みを感じた。
 - 石垣港離島ターミナル前の栈橋に着栈後、待機していた救急隊員により運び出され、車椅子に乗せられ、救急車により病院に搬送された。
 - 腰椎圧迫骨折及び頭部打撲と診断された。
 - 骨密度の検査を毎年行っているが、骨粗鬆症の疑いがあるとの診断を受けたことはなかった。
 - 事故から11ヶ月後の平成22年4月1日現在、体を自由に動かせない状態であった。
- ④ 旅客B(60歳女性、身長157cm、体重64～65kg、本事故による負傷者)の口述
- 自分の前の座席の手すりを握り、怖くて冷や汗をかいたが、本件大波により船首が波間に落ちた際、身体が宙に浮いたのち、臀部から座席に落ちて腰部にそれまで経験したことがない痛みを感じ、大声を上げた。
 - 石垣港離島ターミナル前の栈橋に着栈後、待機していた救急隊員により運び出され、ストレッチャーに乗せられ、救急車により病院に搬送された。
 - 腰椎圧迫骨折と診断された。
 - 以前、膝を痛めたときに骨密度検査を受けており、骨密度は年相応との診断を受けていた。

船舶の運航管理について

(1) A社安全管理規程の運航基準による運航可否判断基準

① 発航の可否判断

船長は、発航前に運航の可否判断を行い、発航地港内の気象・海象が次に掲げる条件の1に達していると認めるときは、発航を中止しなければならない。

港名 気象・海象	風速	波高	視程
石垣港	15m/s以上 (S～SE の風 10m/s以上)	1m以上	500m以下
船浦港(上原地区)	15m/s以上 (N～NE の風 10m/s以上)	1m以上	500m以下

船長は、発航前において、航行中に遭遇する気象・海象(視程を除く。)に関する情報を確認し、次に掲げる条件に達するおそれがあるときは、発航を中止しなければならない。

平 水	風速15m/s以上 (但し風向がS～SEの場合 13m/s以上)	波高2.5m以上
沿 海	風速15m/s以上 (但し風向がN～NEの場合 13m/s以上)	波高2.5m以上

② 基準航行の可否判断等

船長は、基準航行を継続した場合、船体の動揺等により、旅客の船内における歩行が著しく困難となるおそれがあると認めるときは、基準航行を中止し、減速、適宜の変針、基準経路の変更その他の適切な措置をとらなければならない。

前項に掲げる事態が発生するおそれのあるおおよその海上模様及び船体動揺は、次に掲げるとおりである。

風速15m/s以上 (船首尾方向の風を除く)	波高2.5m以上又はうねり	横揺れ30度以上
---------------------------	---------------	----------

船長は、航行中、周囲の気象・海象(視程を除く。)に関する情報を確認し、次に掲げる条件の一に達するおそれがあると認めるときは、目的港への航行の継続を中止し、反転、避泊又は臨時寄港の措置をとらなければならない。ただし、基準経路の変更により目的港への安全な航行の継続が可能と判断されるときは、この限りでない。

風速15m/s以上	波高2.5m以上
-----------	----------

(2) 事故発生時の気象・海象

① 平久保埼(ひらくぼさき)灯台の気象観測結果

本事故発生場所の東北東方約49kmに位置する平久保埼灯台の気象観測結果によれば、本事故前日06時25分から本事故当時までの風向は、およそ東北東～東南東で、風速は10～12m/s。本事故当時の風向は東で、風速は約12m/s。

② 八重山地方の気象情報

本事故発生場所の東南東方約29kmに位置する石垣島地方気象台の本事故発生日の05時発表の八重山地方の気象情報は、次のとおり。

● 06～24時の天気予報

天気	晴れ
風向	東、やや強く
波高	2.5m、のち3m うねりを伴う

日中の最高気温 25℃
降水確率 0%
海上の最大風速 10m/s以上

● 06～24時の地域時系列予報

天気 晴れ
風向 東
風速 10m/s 以上

(3) 事故当時の船長A及びA社の判断

① 船長Aの口述

- 気象情報の入手及び確認・・・ふだんから、毎朝、A社事務所が配布する気象情報を受け取り、A社事務所で行われる運航前ミーティングで気象情報を確認していた。
- 発航の可否判断・・・いつも平久保埼灯台の気象情報を運航の可否判断の参考にしていましたが、石垣港を出港してみないと実際の海上模様は分からないことから、石垣港を出港したのち自らが運航の可否を判断するようにしていた。この航路におけるA社の基準風速は18m/sで、A社の運航基準に定める波高(以下「基準波高」という。)は2.5～3mであり、出港後はこれより数値が大きくても船長判断で航行できると思っていた。

② 甲板員Aの口述

- 発航の可否判断・・・発航後の運航の可否は、船長が判断し、運航を中止すれば、運航管理者に連絡していた。

③ A社安全統括管理者及びA社運航管理者の口述

- 発航の可否判断・・・毎朝の運航前ミーティングで、運航管理側から本日のスケジュール並びに気象及び海象の報告をし、各船の船長にその内容を確認してもらっていた。運航管理側と各船の船長側とで安全に関してミーティングを行い、運航及び欠航を決めていた。発航後も事務所で気象情報を確認し、船長と相談しながら運航の可否判断を行っていた。

(4) 基準航路と事故当時の航路

① 運航基準図

安全管理規程の運航基準図には、上原地区から石垣港に至る基準経路として、針路、航程(航程の合計約39km)及び速力等が、次のとおり定められていた。

- | | | | |
|----------------------|------|--------|-------|
| ● 上原地区棧橋～上原地区北口 | 043° | 2.7km | 8～9kn |
| ● 上原地区北口～鳩間水道 | 043° | 1.4km | 30kn |
| ● 鳩間水道～赤離島北方 | 107° | 4.2km | 30kn |
| ● 赤離島北方～嘉弥真島北東 | 107° | 16.6km | 30kn |
| ● 嘉弥真島(かやまじま)北東～中央浮標 | 117° | 8.7km | 30kn |
| ● 中央浮標～沖西灯台 | 118° | 3.2km | 30kn |
| ● 沖西灯台～石垣港離島棧橋 | 085° | 2.2km | 8～9kn |

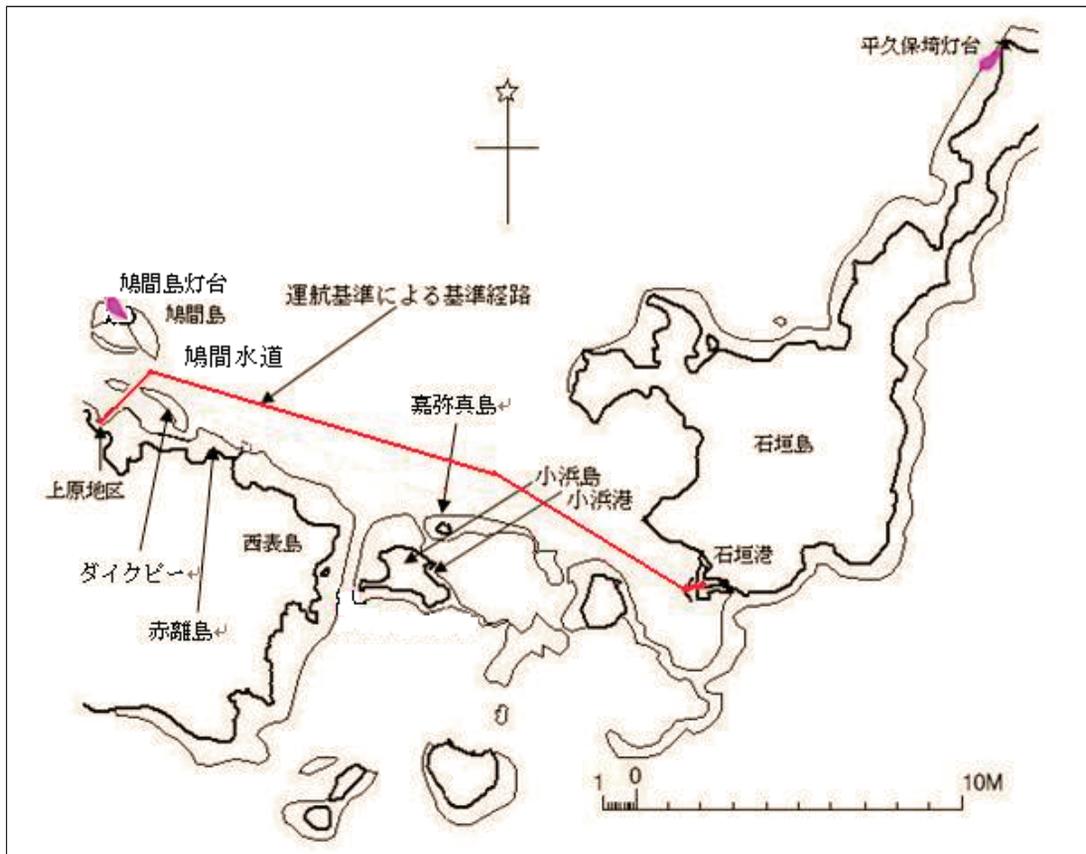
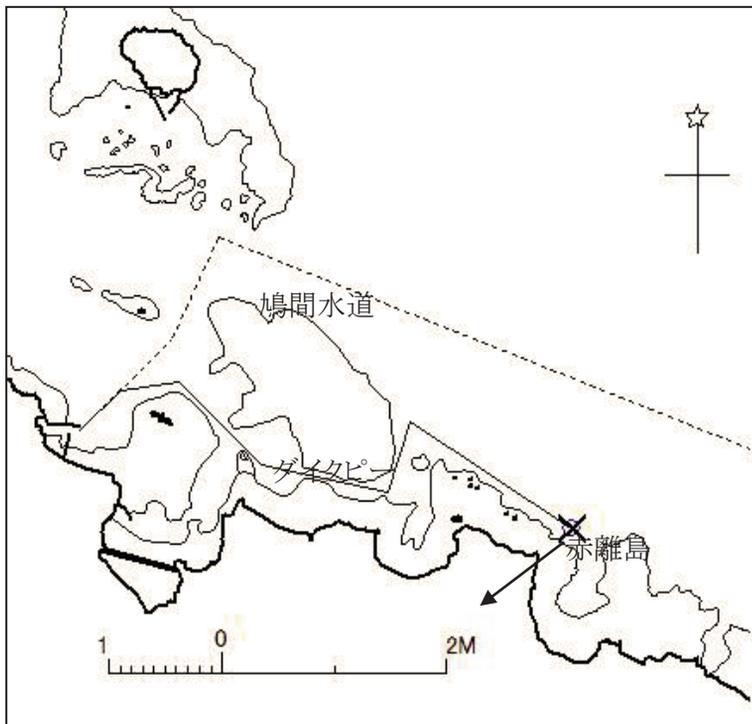


図2,1-4 運航基準図



基準航路は左図破線のとおりであるが、事故当時の実際の航路は実線のとおりであり、基準航路を大きく逸脱していた。
(×は事故発生場所)

図2,1-5 事故発生時の航路

③ 船長Aの口述

- 他船船長からの西表島北東岸のリーフ沿いを航行すれば、リーフにより波が打ち消されるといふアドバイスを思い出し、第1便復路より波による船体の動揺が小さくなると思い、第1便復路とは異なるダイクピーの南方及び東方の経路を航行した。(本事故後、この時の他船船長からのアドバイスが、南風が強い時のことであり、自分が思い違いをしていたことに気付いた。)
- 安全管理規程は見たことがあり、内容は少しだけ分かっていたが、基準経路図を見たことがなかった。本事故当時の第1便往復路の経路及び第2便復路の経路(以下「本件経路」という。)が全て基準経路であるとふだんから思っていた。また、本事故当時、GPSプロッターには基準経路を表示する設定はなされていなかった。

④ 甲板員Aの口述

- 安全管理規程は、見たことがなく、本船に備え付けられているかどうかも知らなかった。上原航路は、第1便復路のような上回り(西表島北東岸から離れダイクピーの北を回る経路)と、第2便復路のような下回り(西表島北東岸に近寄りダイクピーの南を回る経路)の2つの経路があると思っており、どちらの経路を通るかについては、船長がいつも判断していた。

⑤ A社安全統括管理者及びA社運航管理者の口述

- 事故当時の経路は、運航基準で定めている経路ではないが、A社として航行することに問題はない経路であり、他社も同様に航行している経路であった。ふだんから船長A及び他の旅客船の船長は、北から東の風のと看、往路は、石垣島の島陰に入りながら北の方に進路をとって、その後、進路を西表島の方に変えて追い波を受けながら航行し、復路は、西表島北東岸のリーフ沿いに航行することもあった。本事故後、船長Aに対し、南風のと看であれば、風を遮り波が立たないリーフ際を走ることとはあっても、本事故当時はリーフ際を走るべきではなく、もっとリーフから離して速度を落とすべきであったという指摘をした。

荒天時の安全運航対策等について

(1) シートベルト

① 船長Aの口述

- 船内の前部客室及び中央部客室の3人掛けの座席にシートベルトが備え付けられていたが、シートベルトが座面クッションの下に置かれたままになっているのを認めた。また、シートベルトについて、着用した方がよいが、そこまではする必要はないと思っており、A社からの指導も聞いておらず、旅客からシートベルトが邪魔だと以前から言われていたことなどにより、シートベルトを座面クッションの下に置いたままにしていた。シートベルト着用についての船内放送も行わなかった。

② 旅客Aの口述

- 乗船時から下船時まで、シートベルトに気付かなかった。

③ 旅客Bの口述

- 乗船時から下船時まで、シートベルトに気付かなかった。

④ A社安全統括管理者の口述

- シートベルトがない旅客船があるので、それなりの注意を払い、お年寄り、妊婦、子供が前部客室の前方の座席に座らないようにすることについて、乗組員を指導していた。特に、時化のときには、旅客にシートベルトを着用するよう、船内アナウンスを行っていた。
- あんえい号のシートベルトが座面クッションの下に置いたままの状態になっていたのは知らなかった。

⑤ A社運航管理者の口述

- シートベルトを着用するよう、船内に「乗船旅客の遵守事項のご案内」が掲示してあることから、シートベルトの着用は推奨していたが、船長任せにしていた。
- 乗組員から、旅客がシートベルトを着けたがらないという話を聞き、以前からあんえい号及びあんえい号以外の他の旅客船についてもシートベルトを座面クッションの下に置き、シートベ

ルトが見えない状態となっているのを知っていた。

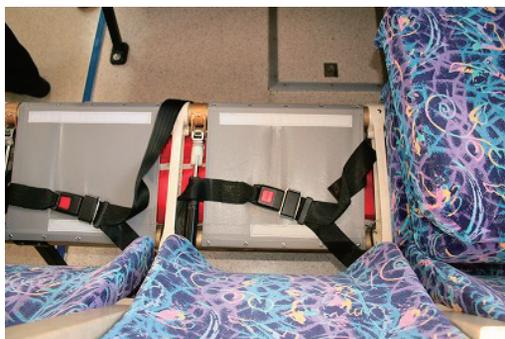


写真2.1-2 前部客室のシート
(座面クッションを外したところ。シートベルトの上にクッションが乗せられていた。)

(2) その他の安全運航対策

① 船長Aの口述

- 乗船する旅客に対し、揺れの少ない後方の客室に着席するよう勧めなかった。
- 過去、前部客室の最前列から2列目までの座席で船体動揺により旅客が負傷する事故が発生していたので、旅客がそこに座らないようにするため、黄色の鎖を架けて通路をふさいでいた。
- 出航前に、「本日、海の方が時化しけています。大きく揺れますので、席は立たないで下さい」と1回だけ船内放送を行ったが、前部客室の最前列から2列目までの座席には座らないことについての説明や揺れの少ない後方の客室に着席するよう船内放送を行わなかった。

② 甲板員Aの口述

- 後部客室は機関室の真上となっており、また、FRP製の堅い座席 (FRP製ベンチシート) となっていることから、乗船する旅客に対し、揺れの少ない後方の客室に着席するよう勧めなかった。

③ 旅客Aの口述

- 「席は立たないで下さい」という船内放送を聞いており、前部客室の最前列から2列目の通路に鎖が架けられていたのを見ていた。

- 揺れが少ない後方の客室に座るよう案内があれば、後方の客室に座っていただろうと本事故後に思った。(旅客Cも同じ)
- ④ 旅客Bの口述
- 「席は立たないで下さい」という船内放送を聞いており、前部客室の最前列から2列目の通路に鎖が架けられていたのを見ていた。
- ⑤ A社安全統括管理者の口述
- 前部客室の最前列から何列目かまで鎖を架けて通路をふさいだり、船内に貼り紙をするなどし、使用禁止の座席を示すようにしていた。また、お年寄りや特に妊婦の方には乗船窓口で申し出てもらうよう看板を出し、優先席券を配布して優先席に案内するようにして旅客に対しては常に気を遣うよう乗組員へ何度も指示しており、これらの指示はA社運航管理者にも伝えていた。
 - 船体の揺れの対応策とし、出航前に「走行中、席を立たないで下さい」という船内アナウンスをしっかりと行うよう、乗組員に徹底して指示をしてきた。今でも、たまに船内アナウンスを行わないという船の話は聞くが、まだ抜けているところがあるものの、だんだん良くなってきている。
- ⑥ A社運航管理者の口述
- 荒天下にあっては、定期運航に遅延が発生する可能性があるとしても、安全運航を第一に考え、波の衝撃を極力低減できるまで減速して航行するよう指導していた。
 - 時化たときは、前部客室の最前列から3列目には座らせないよう、鎖を架けて通路をふさいだりすることを徹底していた。また、前部客室の後ろの3列に優先席のヘッドカバーを付け、高齢者などに優先的に座ってもらうようにしていた。特に、妊婦の方には、乗船窓口で申し出てもらうよう看板を出して案内し、優先席券を配布して優先席に案内するようにしていた。
 - 航行中は大きく揺れるので、席を立たないよう、必要に応じて旅客に周知してほしいということ乗組員に伝えていた。



写真2.1-3 前部客室のシート

(前のシートの背もたれに手摺がある。前2列を黄色い鎖でふさいでいる。)

(2) 安全教育・内部監査等

A社運航管理者の口述によれば、A社では安全管理規程に基づく安全講習会により、乗組員等への安全教育が行われており、安全講習会は、年2回程度開催される全体会議と、1～2か月に1回程度開催される定例の安全講習会とに分けて実施されていた。なお、安全講習会は、前回旅客負傷事故の発生以前から行われていた。

安全管理規程によれば、経営トップの支援を得て関係者とともに年1回以上船舶及び陸上施設の状況並びに安全管理規程の遵守状況のほか、安全マネジメント態勢全般にわたり内部監査を行うとされ、また、内部監査を行ったときは、その内容を記録するとされていた。

A社運航管理者の口述によれば、年1回の年末年始の安全総点検のときに、発航前検査、船内巡視、操練などの実施状況、乗組員の免許証、船員手帳の確認などの内部監査を行っていたが、その実施内容について、記録をしていなかった。

安全管理規程によれば、経営トップは、事故の原因及び事故処理の適否を調査し、事故の再発の防止及び事故処理の改善に資するため、必要に応じ、事故調査委員会を設置することとされていたが、A社運航管理者の口述によれば、事故調査委員会は設置されなかった。

運輸安全委員会による分析・結論

(注)運輸安全委員会報告書には「～ものと考えられる」、「～可能性があると考えられる」などと記述されており、断定はされておらず可能性が示されているにとどまるが、ここでは「考えられる」などの表現を省略した。

- ① あんえい号は、基準経路から外れて西表島北東方沖のリーフ沿いに赤離島の東方沖を波高約1.5～2mの東北東からの連続した波を左舷船首から受けて東南東進中、船長Aが本件大波の接近に直前に気付いたものの、原速力(25～26kn)で航行していたため、船首が本件大波の波頂に乗って波間に落下し、前部客室の旅客2人が、座席から身体が浮いて離れた後、座席に自由落下した衝撃で腰椎を圧迫骨折した。
- ② 事故が起きた際の経路は基準経路ではないが、船長Aはこれも基準経路であると思い込んでいた。A社は、各船の船長判断に任せて(基準経路ではない)リーフ際の航行を認めていた。A社は、安全管理規程に定めた基準経路及び経路変更について、適切な安全教育を行っていなかった。
- ③ 船長Aは、本件大波が間近に接近するまで気付かずに原速力(25～26kn)で航行しており、操船及び見張りが適切でなかったことなどから、A社は、適切な安全教育を行っていなかった。
- ④ A社は、前回旅客負傷事故が発生した際に、事故調査委員会を設置しなかった。
- ⑤ 船長Aは、次のことについては船内放送等による案内を行わなかった。
 - a 最前列から2列目までの座席には座らないこと
 - b 船体の同様が少ない後方の客室に着席すること

- c シートベルトを着用すること
 - d 波により船体が縦に動揺するので注意すること
- ⑥ 船長Aは旅客にシートベルトの着用を周知する考えはなかった。A社運航管理者はシートベルトの着用を推奨していると口述しているが、実際には船長任せにしていた。

2.2 関係機関等の対応

(1) 運輸安全委員会のA社に対する勧告

運輸安全委員会は、本事故調査の結果に鑑み、旅客の安全を確保するため、A社に対して、運輸安全委員会設置法第27条に基づき、次のとおり勧告した。

- ・ 安全管理規程等に係る安全教育について

A社は、A社の運航基準等について、乗組員に対し、荒天時の安全運航方策等の内容を踏まえた適切な安全教育を継続的に行い、これらを乗組員に遵守させること。

- ・ 運航する旅客船の実情に応じた荒天時安全運航マニュアルの作成及び遵守について

A社は、安全管理規程を確実に実施するため、運航する旅客船の大きさ、客室の状況などを考慮して、経路、速力、シートベルトの着用、船体の動揺の少ない客室への誘導など、荒天時の安全対策について検討し、荒天時安全運航マニュアルとしてとりまとめ、同マニュアルを乗組員に教育し、確実に遵守させること。

(2) 運輸安全委員会の国土交通大臣に対する意見

運輸安全委員会は、本事故調査の結果に鑑み、旅客船の利用者の安全を確保するため、国土交通大臣に対して、運輸安全委員会設置法第28条に基づき、次のとおり意見を述べた。

平成17年以降、旅客船、交通船等において、本事故と同種の事故が8件発生し、旅客12人が腰椎圧迫骨折等を負っており、その原因は、荒天時、波浪により船体が激しく動揺する航行中において、航路及び針路の選定並びに減速措置が適切でなかったこと、船体動揺が比較的少ない船体後方へ誘導したり、シートベルトの着用を要請するなどの旅客に対する安全対策が十分でなかったことがあげられる。

このため、国土交通大臣は、高速船により事業を営む旅客運送事業者等の関係者が、荒天時の操船方法(速力、針路を含む)等の旅客の安全対策を作成し、乗組員等の関係者に周知、徹底するよう高速船により事業を営む旅客運送事業者等の関係者を指導するべきである。

(3) A社の事故後の対応

- ・ 安全講習会

A社は、平成21年5月23日船員及び陸上勤務員など合計66人が参加する安全講習会を開催し、旅客に対するシートベルト装着の要請、高齢者等に対する後部座席への移乗の要請、気象及び海象に応じた安全速力での運航の徹底並びに旅客に対する船体の動揺についての注意喚起及び的確な船内放送の実施について周知した。また、平成21年9月30日安全講習会を開催し、安全

管理規程などについて周知した。

・ 内部監査

A社は、監査期間を平成21年4月30日から8月20日までの間とし、監査リーダーをA社安全統括管理者、監査員をA社運航管理者とする本事故特別監査を実施した。また、この間、本事故特別監査とは別に、6月25日、7月18日及び8月13日に乗船監査を、8月5日に船員ヒアリング監査(安全管理規程の把握状況)を、8月7日に早朝ミーティング監査を実施した。

・ 事故調査委員会

A社は、平成21年7月15日に事故調査委員会を開催し、協議の内容について、総括として次のとおりまとめた。なお、船内アナウンスについては、船内アナウンス要綱に、シートベルト着用要請を追加した。

- ① 始業前のミーティングにおいて、船長に対し船内放送の実施及び船内巡視の徹底を繰り返し要請する。特に、荒天時には、波浪に対する適切な速度調整及び操船を行うとともに、乗客に対してシートベルトの着用要請を行い、着用の確認を実施するよう毎回指導する。
- ② 若年船長を熟年船長と乗船させ、時化に対応する操船技術の指導を実施する。
- ③ 旅客に対してアンケート調査を行い、上記①に関する実施状況及び旅客の要望を把握し、今後の業務改善に役立てる。
- ④ 就業規則に基づく懲戒を実施する。
- ⑤ 時化時の前方座席の使用禁止については、状況により各船において対応する。
- ⑥ 輸送の安全確保に関する指導書に係る報告

平成21年6月26日付で内閣府沖縄総合事務局運輸部から輸送の安全確保に関する指導書の交付を受け、同年7月8日付で内閣府沖縄総合事務局長に対し、事故防止対策の徹底及び事故発生時の関係機関への迅速な通報の徹底について報告を行い、同年8月18日付で内閣府沖縄総合事務局運輸部長に対し、内部監査及び事故調査委員会の実施について報告を行った。

なお、第三及び第三十八あんえい号の事故調査報告説明資料を付録1に示す。

(参考)類似事故例

旧海難審判庁の裁決等によれば、平成17年以降、全国におけるあんえい号と同様の座席への落下等事故は、8件発生している。

表2.2-1 座席への落下事故

	発生日時	場所	船種	船名	総トン数	概要	気象及び海象	負傷状況
1	H17.11.21 10:50	島原湾 早崎瀬 戸東	遊覧船	生漁丸	2.7	乗員1人+乗客10人でイルカウォッチングの目的で航行中、高起した波に当たり船体が強い衝撃を受け、甲板上に座って長いすにつかまっていた乗客が胸部を長いすに打ちつけ負傷。	晴れ 風力3(北) 波高約1m	乗客1人が左第9肋骨骨折

2	H19.02.10 15:40	沖縄県 慶良間 列島座 間味港 西方沖 合	遊覧船	フリッパ ー	4.8	乗員2人＋乗客16人でホ エールウォッチングを終 え帰港中、波により船体 が大きく傾斜した際、船 尾甲板の乗客が長いす から投げ出され反対舷の 長いすに顔面をぶつけ 負傷。	曇り 風力4(北)	乗客1人が解 放性鼻骨骨折
3	H19.02.23 16:20	早崎瀬 戸	遊覧船	漁栄丸	4.3	乗員1人＋乗客12人でイ ルカウォッチングの目的 で航行中、高起した波を 乗り切る際、船体が強い 衝撃を受け、乗客が長い すから放り出されるなどし て甲板構造物等に身体 を打ち付け負傷。	曇り 風力3(西北 西) 波高約2m	乗客1人が第2 腰椎圧迫骨 折、 乗客1人が全治 6ヶ月の両膝打 撲、乗客3人が 臀部及び足の 打撲等
4	H19.05.19 17:04	伊豆諸 島大島 東方沖 合	旅客船	セブン アイラ ンド愛	279	乗員5人＋乗客208人で 久里浜に向け航行中、 三角波の波頭に隠れて 目視し得ない深い谷を 伴う急峻な波浪に遭遇し た際、船首水中翼が波 浪の斜面で飛び出し揚 力を失い、船首部が落下 して前方の波浪の下方 に突入したとき、旅客室 前面の窓ガラスが破損し て破片が飛散し、乗客30 人が負傷。	晴れ 風力5(南 西) 波高約2m 海上風警 報発令中	乗客30人が顔 面挫創、頭部 挫創、腰部打 撲など
5	H19.10.27 09:21	福岡県 福岡湾	旅客船	ニュー げんか い	105	乗員4人＋乗客27人で 福岡市玄海島に向け航 行中、風浪を船首方から 受けて進行する際、大波 を受けてスラミングが生 じ、衝撃により乗客が負 傷。	晴れ 風力6(北 東) 波高約3m 強風・波浪 注意報発 令中	乗客1人が第3 腰椎圧迫骨 折、 乗客1人が腰椎 捻挫及び左第3 肋骨骨折
6	H20.01.16 09:55	沖縄県 波照間 島北方 沖	交通船	第78あ んえい 号	19	乗員2人＋乗客29人で 石垣港に向け航行中、 急激な船体動揺により着 座していた乗客が上方 に跳ね上げられて座席 に身体を打ち付け負傷。	曇り 風力5(北北 東) 波高約3m 強風・波浪 注意報発 令中	乗客2人が腰椎 圧迫骨折 乗客1人が腰 椎圧迫骨折及 び左鎖骨不全 骨折、 乗客1人が腰部 打撲
7	H20.05.03 11:45	熊本県 天草下 島北方 沖の五 通礁から 336度 1400m	遊覧船	恵丸	2.9	乗員1人＋乗客9人でイ ルカウォッチングのため にポイントに向け北上 中、船体が上下に動揺し た衝撃で乗客が負傷。	晴れ 風速約3m (西南西) 波高50cm	乗客1人が胸腰 椎圧迫骨折
8	H21.01.11 10:17	岡山県 笠岡市 真鍋島 西沖	旅客船	さかもと 3	11	乗員2人＋乗客28人で 目的地に向け航行中、 船体が縦に動揺した際 に乗客が負傷。	風速10m (西) 波高約1m	乗客2人が腰椎 圧迫骨折

(運輸安全委員会報告書)

3. 実船計測

3.1 目的

旅客負傷事故が発生した石垣島～波照間島航路に就航している小型高速旅客船（あんえい号）において船体運動、客室内上下加速度等を計測し、計測時の海象（波高等）、運航条件（速力等）と船体運動、船体各部の上下方向の加速度との関係を分析し、同船の海象、速力等に応じた船体運動及び客室内上下加速度の特性を把握する。

3.2 実船計測概要

平成 25 年 6 月 28 日～30 日に旅客負傷事故が発生した石垣島～波照間島航路に就航している小型高速旅客船 2 隻に乗船して客室内に計測機器を設置し、船体運動及び上下加速度の計測を行った。以下に詳細を述べる。

3.2.1 対象船

計測対象船は沖縄県八重山諸島で運航する安栄観光の小型高速旅客船「第三あんえい号」（以下、3号）と「第三十八あんえい号」（以下、38号）の2隻である。対象船「3号」と「38号」はほぼ同型船*であり、全長（ L_{OA} ）25.55m、旅客定員90名、総トン数は19GTである。表3.2-1に「3号」と「38号」の主要目を、図3.2-1、3.2-2に「3号」と「38号」の一般配置を、写真3.2-1に波照間港での「3号」の写真を示す。

表 3.2-1 第三・第三十八あんえい号主要目

	3号・38号
L_{OA} [m]	25.550
B[m]	4.000
D[m]	1.430
定員[名]	90
総トン数[GT]	19
主機関数[基]	3
推進器	サーフェイスプロペラ

*：後部客室側壁の形状等が異なる。

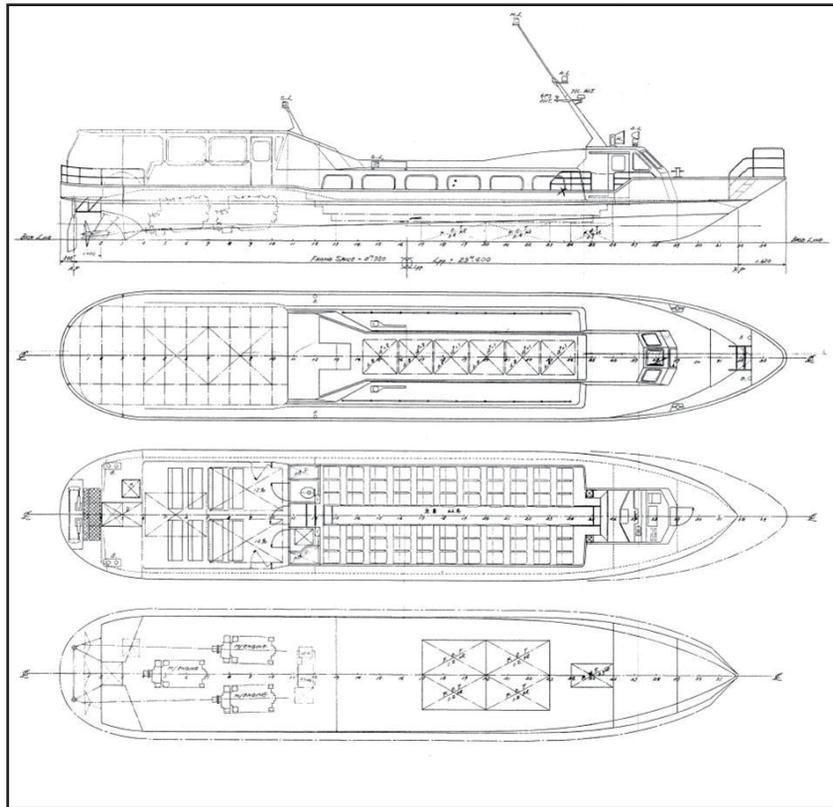


図 3.2-1 第三あんえい号一般配置図

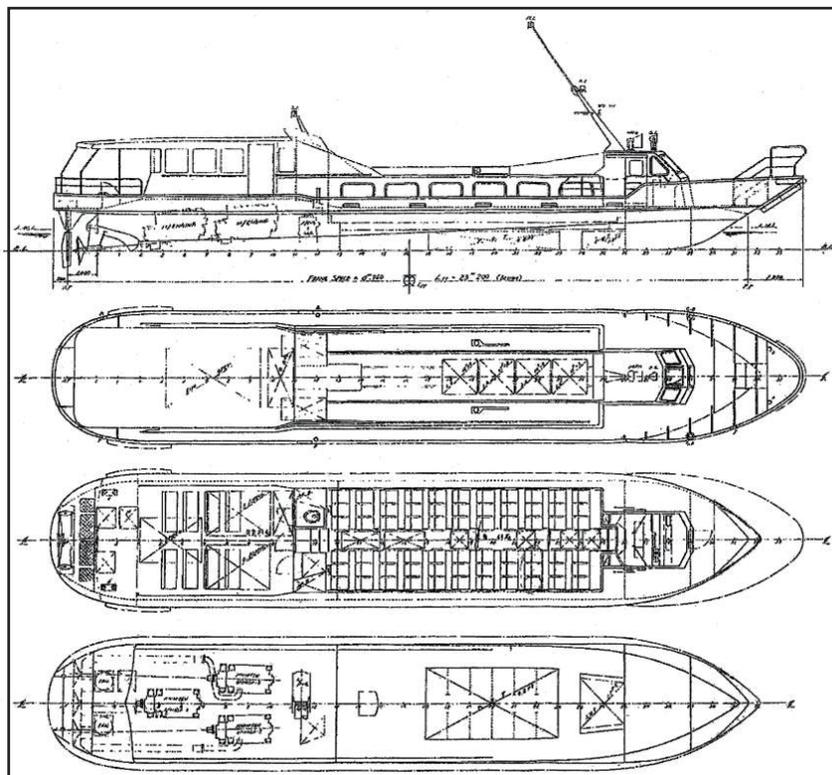


図 3.2-2 第三十八あんえい号一般配置図



写真 3.2-1 第三あんえい号（波照間港にて）

3. 2. 2 計測航路及び時期

今回の計測では旅客負傷事故が発生した石垣島－波照間島間航路において、「3号」では石垣島－波照間島航路直行2往復を、「38号」では石垣島－大原経由－波照間島航路1往復を計測した。ただし、計測期間中に波照間航路周辺海域の波高が高いため運休が続き、波照間島航路の計測ができなかったため、その期間は石垣島－大原航路往復、石垣島－鳩間島経由－上原航路、鳩間島－石垣島航路及び石垣島－小浜島航路往復での計測も実施した。図 3.2-3 に計測した石垣島－波照間島航路（赤線）とその他計測した航路（黄線）を示す。

この海域では6月下旬の梅雨明け時に夏至南風（かーちばい）という強い南風が約2週間吹くことが知られており、旅客負傷事故が発生したのもこの時期である。計測時期はこの時期に合わせるために平成25年6月25日から6月30日の6日間の間で実施した。表 3.2-2 に計測日と計測航路を示す。なお、表中（）内の数字・アルファベットは計測番号である。6/24（月）から6/27（木）までは石垣島－波照間島航路は欠航しており、計測ができたのは6/28（金）の最終便の往復と、6/29（土）の石垣島－大原経由－波照間島航路の往復及び6/30（日）の石垣島－波照間島航路の往復である。ただし、6/28（金）の便は計測機器を設置する時間が確保できなかったため、上下加速度1点とGPSによる航跡・船速のみ計測した。

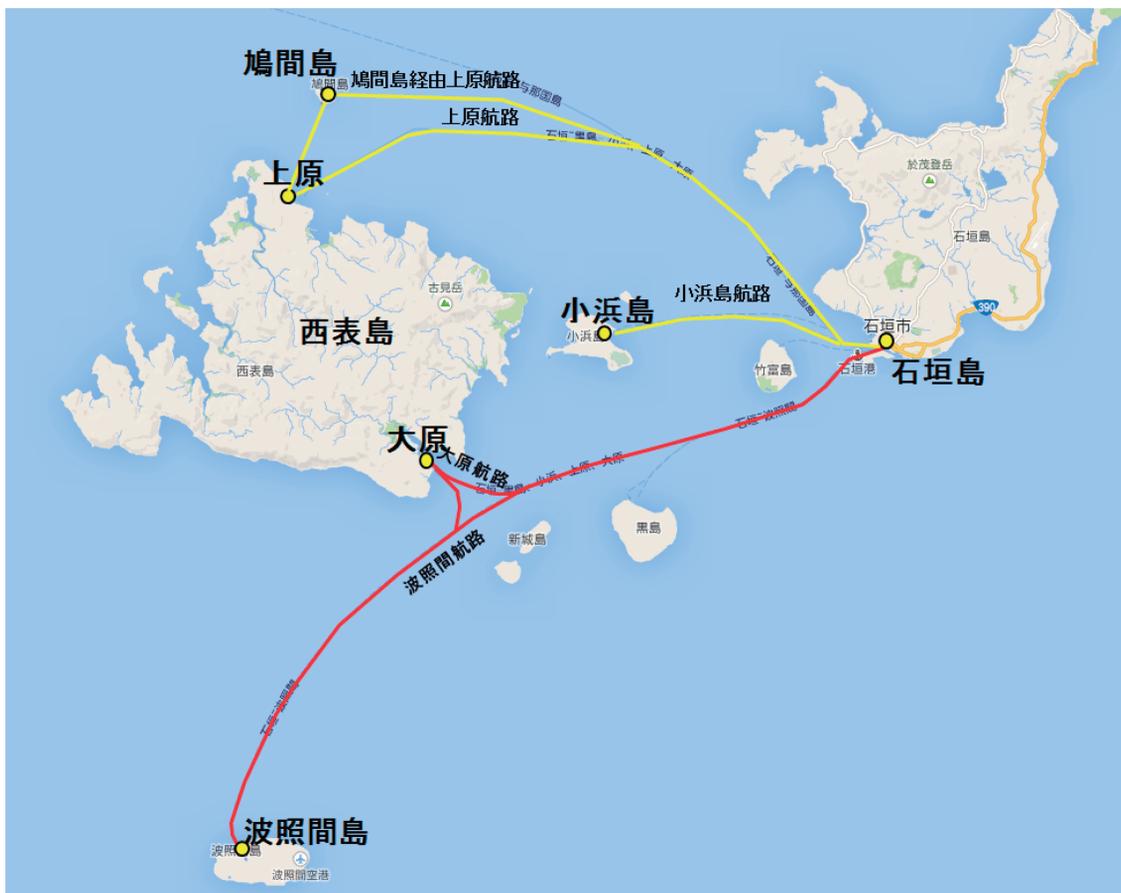


図 3.2-3 計測した石垣島—波照間島航路

表 3.2-2 計測日と対象船及び計測航路

月日	波照間便	対象船	計測航路 (計測番号)
6/24 (月)	×	—	—
6/25 (火)	×	38号	<ul style="list-style-type: none"> ・【往路】石垣-大原 (1)【復路】大原-石垣 (2) ・【往路】石垣-鳩間 (3)/鳩間-上原 (4) ・【復路】上原-石垣 (5)
6/26 (水)	×	—	—
6/27 (木)	×	38号	<ul style="list-style-type: none"> ・【往路】石垣-小浜 (6)【復路】小浜-石垣 (7)
6/28 (金)	○	3号	<ul style="list-style-type: none"> ・【往路】石垣-波照間 (A)【復路】波照間-石垣 (B) 最終便/上下加速度計測 1点のみ
6/29 (土)	○	38号	<ul style="list-style-type: none"> ・【往路】石垣-大原 (8)/大原-波照間 (9) ・【復路】波照間-大原 (10)/大原-石垣 (11)
6/30 (日)	○	3号	<ul style="list-style-type: none"> ・【往路】石垣-波照間 (12)【復路】波照間-石垣 (13)

3.2.3 計測項目と計測方法概要

計測項目は、客室内の上下加速度と船体運動及び航跡と船速である。客室は上甲板に設けられており、前部客室と後方にある半暴露状態の後部客室の2つである。前部客室の様子を写真3.2-2に、後部客室の様子を写真3.2-3に示す。



写真 3.2-2 前部客室の様子



写真 3.2-3 後部客室の様子

上下加速度は前部客室3点と後部甲板客室1点を加速度計3台とジャイロ2台を用いて計測した。計測点は前部客室の前方から1列目、3列目及び9列目（後方から3列目で、後方2列は優先席である）の座席下の3点と、後部甲板客室最後尾の座席下の1点である。船体運動は前部客室の前後重心位置付近になる前部客室の前方から9列目の座席下1点でジャイロ2台を設置して計測した。航跡と船速は船首ブリッジと後部甲板客室後方の2ヶ所でGPSロガーを用いて計測した。

表 3.2-3 に計測項目と機器及び計測点を、また図 3.2-4、図 3.2-5 に「3号」と「38号」の計測点配置を示す。計測点は旅客負傷事故が起きた当時、負傷者が座っていた座席舷側に設けており、「3号」は左舷側に、「38号」は右舷側で計測を行った。

表 3.2-3 計測項目と機器及び計測点

計測項目	計測機器	計測点
上下加速度	加速度計 3 台/ジャイロ 2 台	4 点 (前部客室 3 点・後部客室 1 点)
船体運動	ジャイロ 2 台	1 点 (前部客室)
航跡・船速	GPS ロガー	ブリッジ 1 点、後部甲板暴露部 1 点
海象	ビデオ、聞き取り	ブリッジ
船首尾喫水	メジャー	船首 1 点・船尾 1 点
乗客	聞き取り	片道乗客数

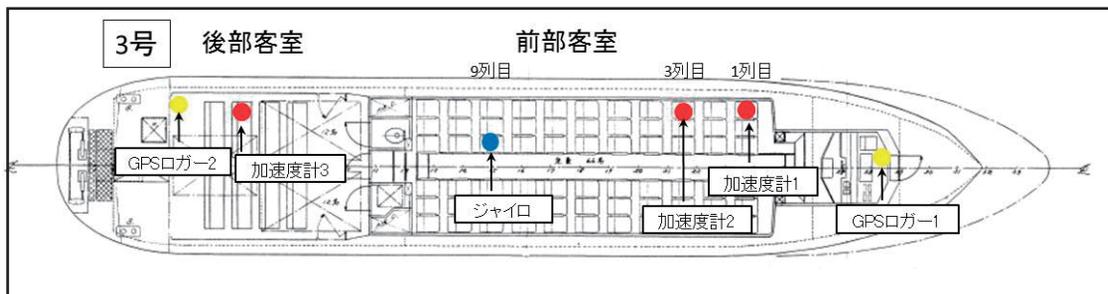


図 3.2-4 「3号」計測点配置

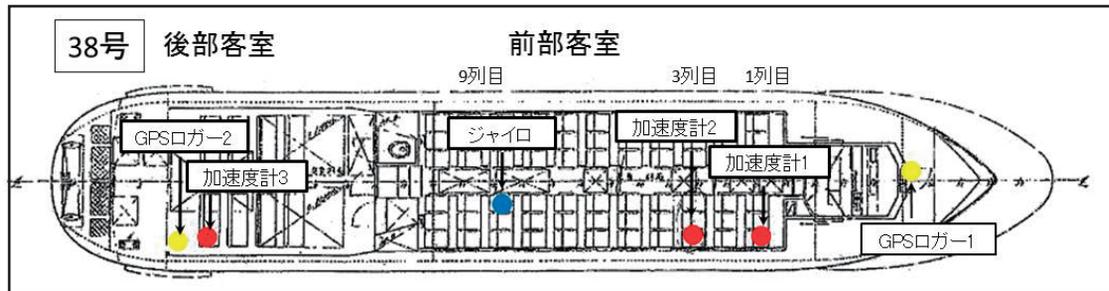


図 3.2-5 「38号」計測点配置

「3号」、「38号」の加速度計、ジャイロ及びデータロガーの機器及び配線配置を図3.2-6に示す。前部客室と後部客室の計測システムはそれぞれ独立しており、後部客室の計測システムの電源はバッテリーでまかなっている。航行中はブリッジからの海象の様子をビデオで撮影し、計測終了後には乗船者数と海象を乗組員から聞き取りした。

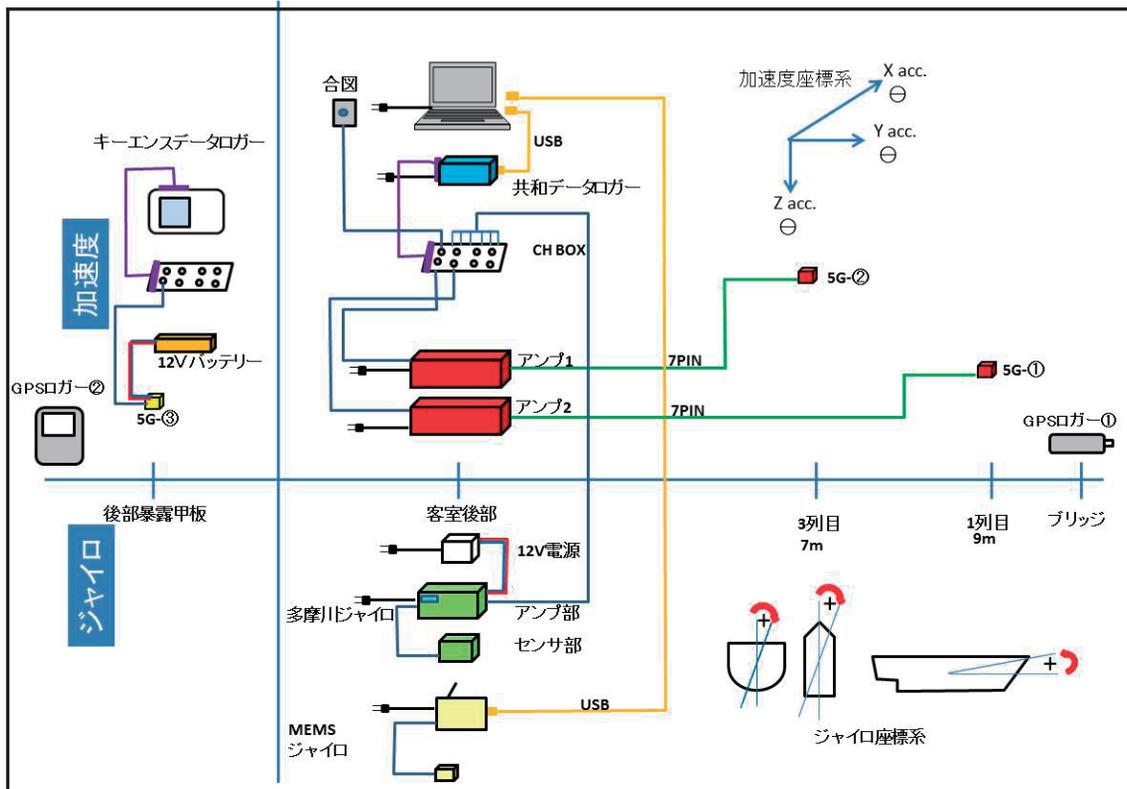


図 3.2-6 計測機器・配線配置 (2隻共通)

写真3.2-4に前部客室1列目及び3列目座席下に設置した加速度センサを、写真3.2-5に前部客室9列目座席下に設置したジャイロ2台を、写真3.2-6に後部客席座席下に設置した加速度センサの様子を示す。また、ブリッジに設置したGPSロガーとカメラの配置の様子を写真3.2-7、3.2-8にそれぞれ示す。

なお、対象船の船首・船尾喫水は計測前後どちらかで乾舷をメジャーで計測した。対象船の喫水と、計測時の乗船者数を表3.2-4に示す。



写真 3.2-4 前部客室座席下の加速度センサ



写真 3.2-5 前部客室9列目座席下のジャイロ2台



写真 3.2-6 後部客室座席下の加速度センサ



写真 3.2-7 ブリッジ計器盤上の GPS ロガー



写真 3.2-8 ブリッジに設置したビデオカメラ

表 3.2-4 喫水と乗船者数

月日	船名	航路	喫水(m)		乗船者数 (人)	備考
			船首端	船尾端		
6月25日	第38あんえい号	石垣-大原	0.436	0.802	85	喫水: 乗客乗船前計測 乗船者は計測員のみ
		大原-石垣			5	
		石垣-鳩間			81	
		鳩間-上原			8	
		上原-石垣	0.391	0.797	53	喫水: 乗客下船後計測
6月27日	第38あんえい号	石垣-小浜	0.411	0.790	27	喫水: 6/26給油後計測
		小浜-石垣			28	
6月28日	第3あんえい号	石垣-波照間	0.650	0.832	49	喫水: 乗客乗船前計測
		波照間-石垣			16	
6月29日	第38あんえい号	石垣-波照間	0.411	0.772	67	喫水: 6/28給油後計測
		波照間-石垣			34	
6月30日	第3あんえい号	石垣-波照間	0.525	0.822	73	喫水: 6/29給油後計測
		波照間-石垣			55	

3.3 計測海域の海象

計測海域での計測時期の海象について述べる。なお、参考のため西表島一波照間島付近の海域の波浪発現頻度分布を付録8に示す。

3.3.1 沿岸波浪実況図

気象庁は漁船や商船などの船舶、海上の気象を観測するためのブイ、沿岸に設置している波高計、地球観測衛星などによる計測値を用いて数値モデルで計算した推定値を沿岸波浪実況図として毎日9時と21時の2回発表している。実況図では有義波高の分布と全国26ヶ所の沿岸代表点の波浪の推定値（波向、波周期、有義波高）と海上の風向風速の推定値が表示されている。

石垣島一波照間島航路の計測期間における計測海域に近い沿岸代表点（地点 O: 24° 30′ N, 124° 35′ E）での風波浪の推定値を表 3.3-1 に示す。対象船の運航限界波高（有義波高）は 1.5m と推測されるので、石垣島一波照間島航路の運休期間が 6/28 まで続いたことと一致する。なお、計測期間中（H25/6/24～6/30）の沿岸波浪実況図は付録9に示す。

表 3.3-1 沿岸波浪実況図の地点 O での風波浪推定値

年月日時	WAVE (sec) / (m)	風 (knots)
13062409	SSW 5 / 1.5	SSW 18
13062421	SSW 4 / 1.3	SSW 16
13062509	SSW 5 / 1.9	SSW 19
13062521	SSW 5 / 1.8	SSW 19
13062609	SSW 5 / 2.1	SW 23
13062621	SSW 4 / 1.7	SSW 18
13062709	SSW 5 / 1.9	SSW 20
13062721	SSW 5 / 1.5	SSW 17
13062809	SSW 5 / 1.7	SSW 19
13062821	SSW 7 / 1.5	SSW 14
13062909	S 6 / 1.4	SSW 14
13063009	SSW 4 / 0.9	SSW 12

3.3.2 波浪推算データ

日本沿岸局地波浪推算データベース（以後、波浪推算データ）は一般財団法人日本気象協会が提供する格子間隔が緯度経度2分での1時間間隔の波浪推算値である。NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 及び気象庁から提供される毎時大気解析値（海上風）を入力値として、第3世代の波浪推算モデル(WAM)を用いて計算したものである。ただし、この波浪モデルは深海波用のモデルで、屈折、海底摩擦、浅水変形は考慮されていない。この波浪推算データを用いて計測海域の海象を把握する。

6/28-6/30の石垣島一波照間島航路での計測のうち、大きな上下加速度を計測した西表島の大原から波照間島までの航跡に近い3点の座標（A: 24° 08′ N, 123° 50′ E、B: 24° 12′ N, 123° 52′ E、C: 24° 14′ N, 123° 54′ E）での波浪推算データを用いて、計測時にその3点のそばを通過した時刻の風波浪を内挿して求めた。図 3.3-1 に波浪推算データの3点（A、B、C）の位置と、6/28の石垣島一波照間島航路往復の航跡を緑線で、6/29の石垣島一大原経由一波照間島航路往復の航

跡を赤線で、6/30 の石垣島－波照間島航路往復の航跡を黄線で合わせて示す。石垣島－波照間島間の航跡は全日ほぼ同じである。

表 3.3-2 に 6/28 の計測時（図 3.3-1 の緑線）の風波浪を抽出した結果を、表 3.3-3 に 6/29 の計測時（図 3.3-1 の赤線）の風波浪を抽出した結果を、表 3.3-4 に 6/30 の計測時（図 3.3-2 の黄線）の風波浪を抽出した結果を示す。波向、風向は北から時計回りである。

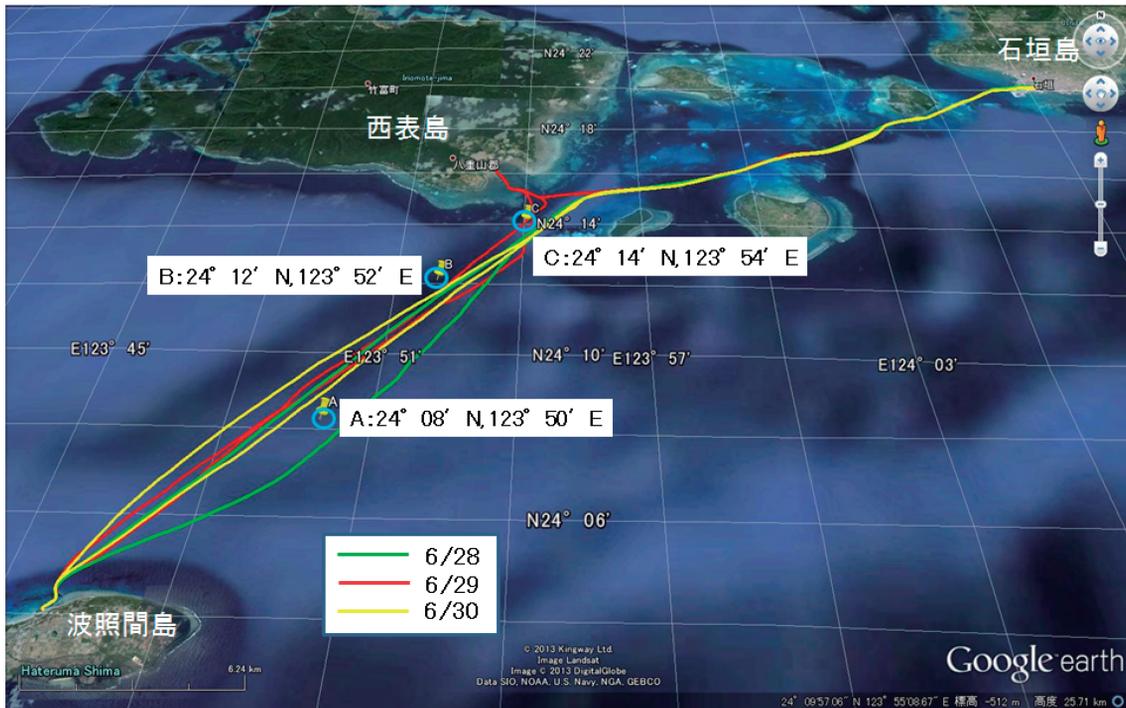


図 3.3-1 石垣-波照間航路（6/28, 29, 30）の航跡と波浪推算データの座標

表 3.3-2 6/28 石垣島－波照間島航路での風波浪推定値

"A" 【往路】石垣-波照間								
地点	月	日	時間	H_w [m]	T_w [sec]	χ_{wave} [deg]	χ_{air} [deg]	V_{air} [m/s]
C	6	28	16.17	1.28	5.70	187.5	222	6.753
B	6	28	16.32	1.35	6.10	177.3	218	6.65
A	6	28	16.50	1.33	6.20	173.7	214	6.95
"A"	平均			1.32	6.00	179.5	218	6.78
"B" 【復路】波照間-石垣								
地点	月	日	時間	H_w [m]	T_w [sec]	χ_{wave} [deg]	χ_{air} [deg]	V_{air} [m/s]
A	6	28	17.00	1.33	6.20	175	211	7.50
B	6	28	17.15	1.36	6.10	179	212	7.56
C	6	28	17.22	1.29	5.70	189	209	7.48
"B"	平均			1.33	6.00	181	211	7.51

表 3.3-3 6/29 石垣島－大原－波照間島航路での風波浪推定値

⑧ 【往路】石垣-大原								
地点	月	日	時間	H_w [m]	T_w [sec]	χ_{wave} [deg]	χ_{air} [deg]	V_{air} [m/s]
C	6	29	11.00	1.33	5.60	194	205	6.70

⑨ 【往路】大原-波照間								
地点	月	日	時間	H_w [m]	T_w [sec]	χ_{wave} [deg]	χ_{air} [deg]	V_{air} [m/s]
C	6	29	11.40	1.33	5.60	194	201	6.86
B	6	29	11.75	1.43	6.10	180	202	7.43
A	6	29	12.10	1.39	6.20	173	198	7.52
⑨	平均			1.38	5.97	182	200	7.27

⑩ 【復路】波照間-大原								
地点	月	日	時間	H_w	T_w	χ_{wave}	χ_{air}	V_{air}
A	6	29	13.42	1.38	6.24	172	205	7.57
B	6	29	13.58	1.41	6.10	178	206	7.34
C	6	29	13.68	1.30	5.60	193	207	6.96
⑩	平均			1.36	5.98	181	206	7.29

⑪ 【復路】大原-石垣								
地点	月	日	時間	H_w [m]	T_w [sec]	χ_{wave} [deg]	χ_{air} [deg]	V_{air} [m/s]
C	6	29	14.00	1.29	5.60	193	208	6.80

表 3.3-4 6/30 石垣島一波照間島航路での風波浪推定値

⑫ 【往路】石垣-波照間								
地点	月	日	時間	H_w	T_w	χ_{wave}	χ_{air}	V_{air}
C	6	30	9.18	0.98	5.40	168	184	4.95
B	6	30	9.30	1.15	6.33	140	186	5.08
A	6	30	9.47	1.15	6.65	132	184	5.16
⑫	平均			1.09	6.13	147	184	5.06

⑬ 【復路】波照間-石垣								
地点	月	日	時間	H_w	T_w	χ_{wave}	χ_{air}	V_{air}
A	6	30	10.07	1.14	6.70	131	186	4.96
B	6	30	10.20	1.14	6.42	139	190	4.66
C	6	30	10.28	0.95	5.43	167	190	4.56
⑬	平均			1.08	6.18	145	188	4.73

また、計測番号ごとの波高と波向の平均値を図 3.3-2 に、波高と波周期の平均値を図 3.3-3 に示す。計測時の波高は 1.0m 以上 1.5m 以下、波向は南からであることが分かる。6/28 から 6/30 の計測期間中の 3 地点での波高、波向、波周期、風速、風向の変化は付録 10 に示す。

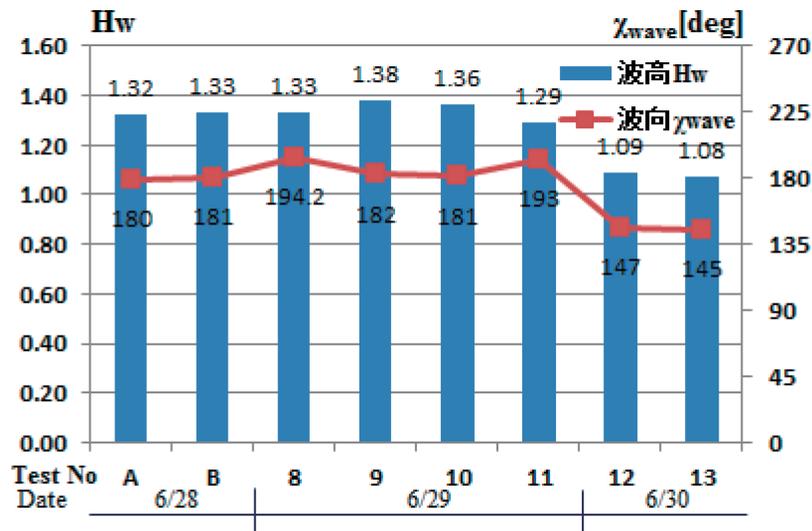


図 3.3-2 波照間島航路の計測時の波高と波向の平均値

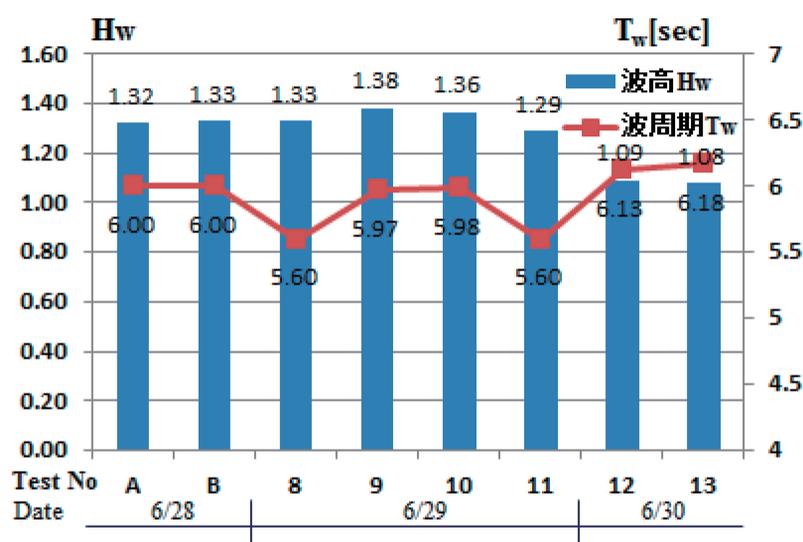


図 3.3-3 波照間島航路の計測時の波高と波周期の平均値

3.4 計測結果

石垣島－波照間島航路での計測結果について以下に述べる。

3.4.1 大きな上下加速度が発生する海域での航行

今回の計測の中で最も船の動揺が大きくなった 6/29 の大原－波照間島航路（計測番号 9）の計測結果を示す。初めに、大原－波照間島航行中の船速 V(kts) の変化を図 3.4-1 に示す。大原を出て船速を約 32kts まで上げるが、島影から出ると波高が大きくなり、すぐに船速を落としていることが分かる。

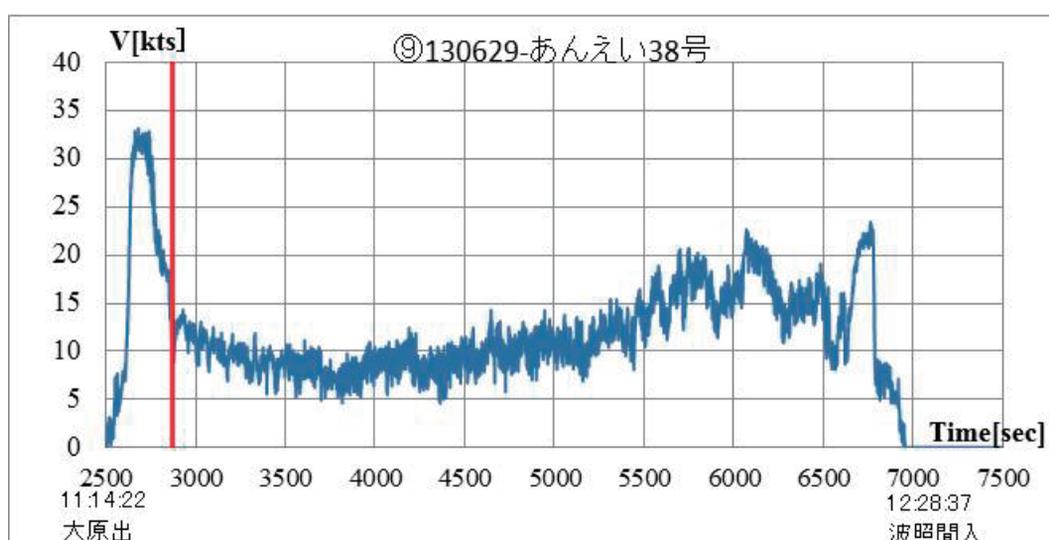


図 3.4-1 船速の変化（6/29/計測番号⑨）

図中、赤線で示す船速を著しく落とした場所を図 3.4-2 に示す。この時、船の針路 ψ は 169 度、波は表 3.3-3 より波高 $H_w=1.33\text{m}$ 、波向 $\chi_{\text{wave}}=194$ 度であり、船は向波の状態で航行していた。ここでの上下加速度と船体運動の計測での座標系を図 3.4-3 に、4 点での上下加速度 G_{Z-1-4} と横揺 ϕ 、縦揺 θ 、船首揺 ψ 及び船速 V の計測結果を時系列で図 3.4-4 に示す。なお、他の日に計測した時系列データは付録 1 1 に示す。

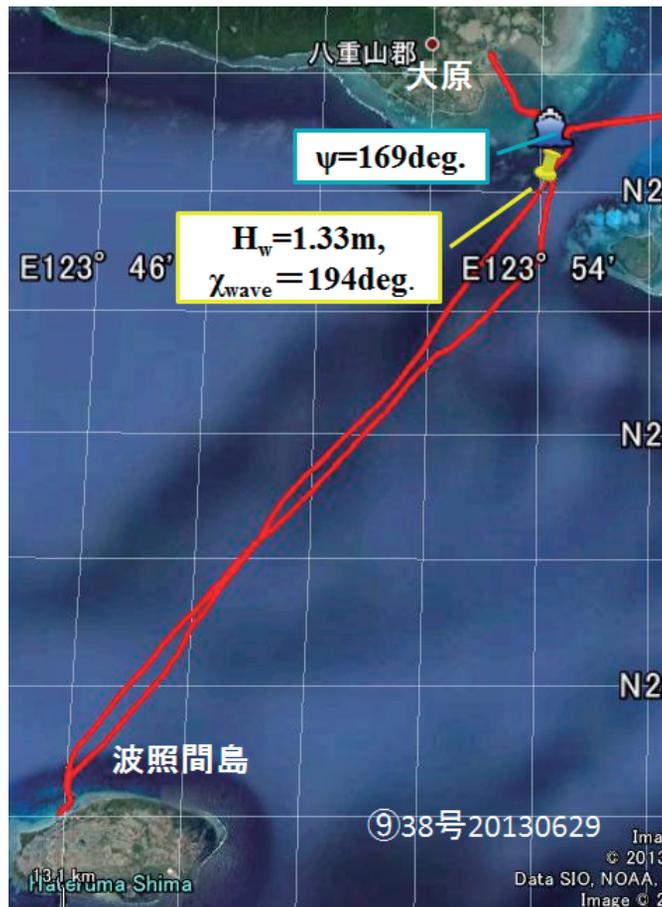


図 3.4-2 減速位置と海象 (6/29/計測番号⑨)

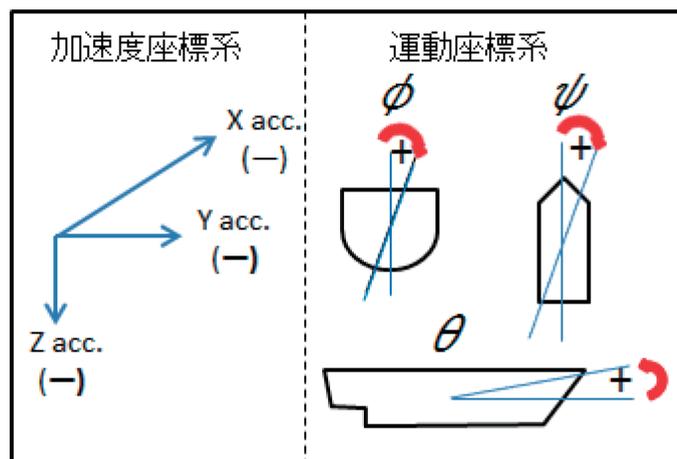


図 3.4-3 座標系

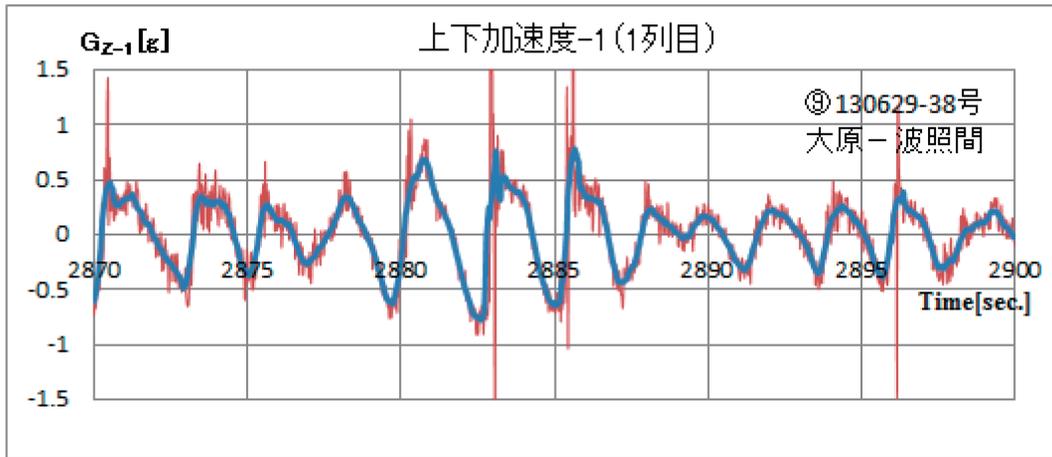


図 3.4-4-a 前方客席 1 列目の上下加速度 G_{Z-1} (6/29/計測番号㊟)

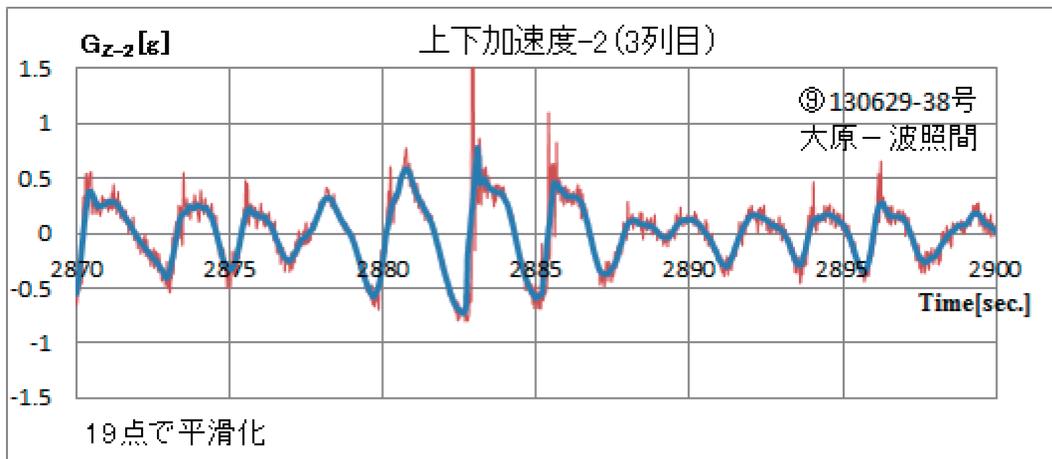


図 3.4-4-b 前方客席 3 列目の上下加速度 G_{Z-2} (6/29/計測番号㊟)

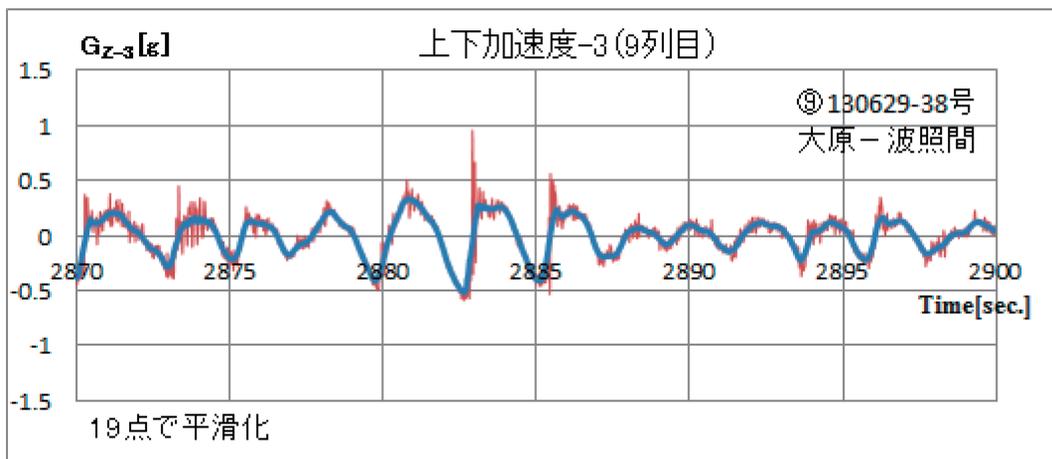


図 3.4-4-c 前方客席 9 列目の上下加速度 G_{Z-3} (6/29/計測番号㊟)

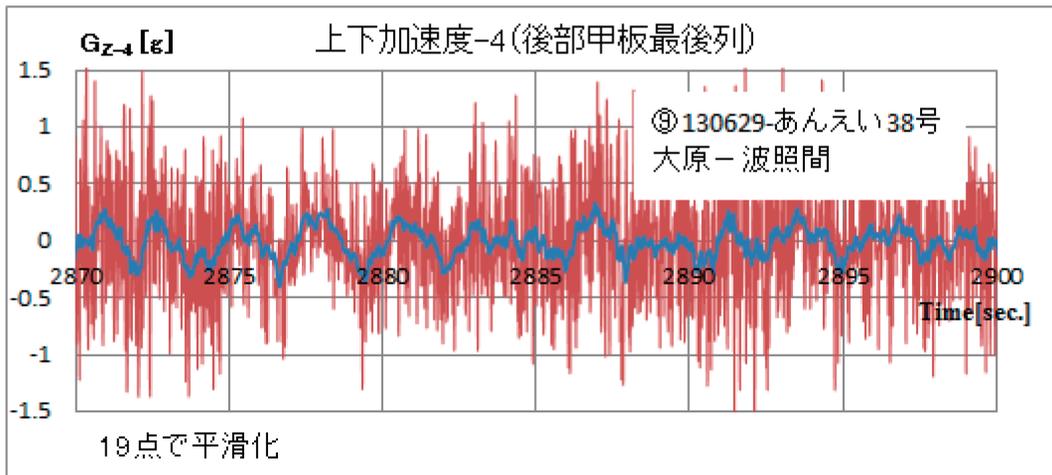


図 3.4-4-d 後部客室の上下加速度 G_{Z4} (6/29/計測番号⑨)

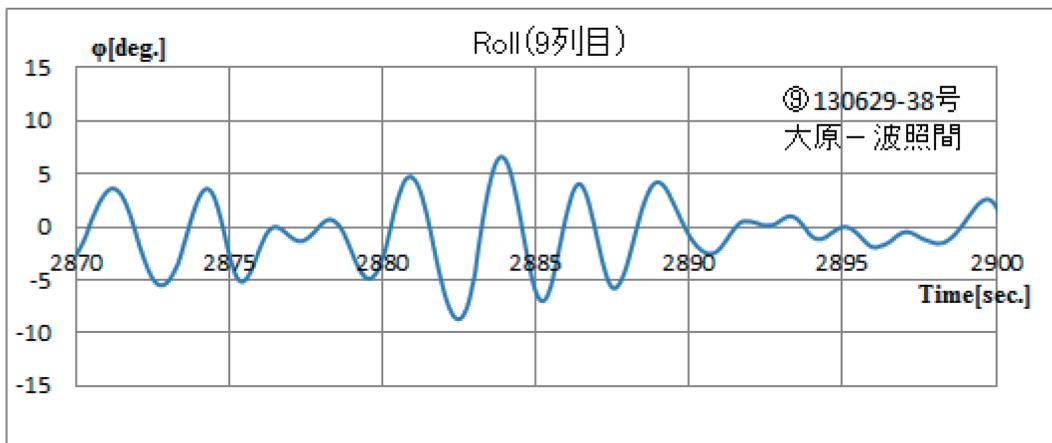


図 3.4-4-e 横揺 ϕ (6/29/計測番号⑨)

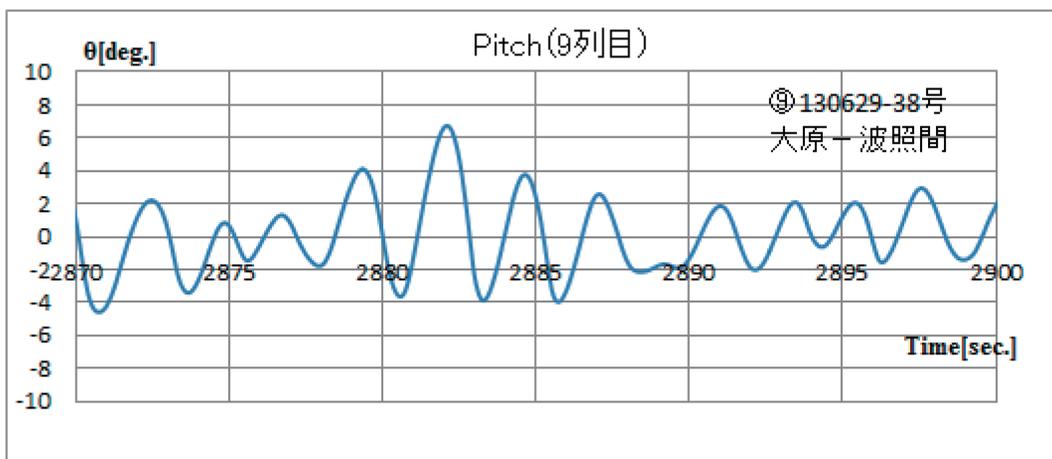


図 3.4-4-f 縦揺 θ (6/29/計測番号⑨)

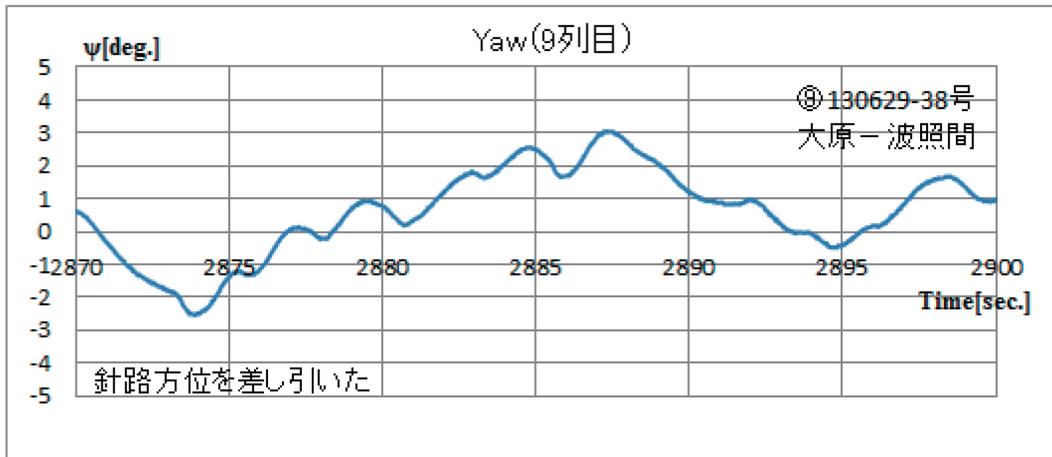


図 3.4-4-g 船首揺 ψ (6/29/計測番号⑨)

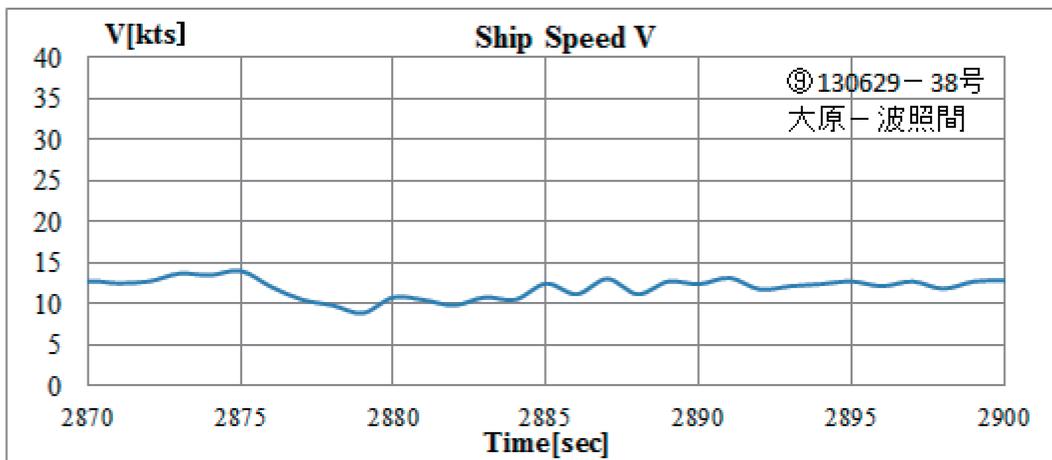


図 3.4-4-h 船速 V (6/29/計測番号⑨)

図 3.4-4-a~d は図 3.4-2 に示す減速位置での座席前方 1 列目から後部客室最後列までの 4 点の上下加速度を、図 3.4-4-e~g は船体運動の横揺 ϕ 、縦揺 θ 及び船首揺 ψ を、図 3.4-4-h は船速 V をそれぞれ 30 秒間の時系列で示している。なお、計測時のサンプリング周波数は 50Hz で行い、上下加速度はノイズ処理のため計測データを 19 点で平滑化した。

図 3.4-4-a~d の図中、赤線は計測値、青線は平滑化処理した値である。図 3.4-4-d に示す後部客室での上下加速度の高周波数の振動は、計測位置の下が機関室のため、主機の振動が伝わっていると考えられる。上下加速度は前部客室の 1 列目 (図 3.4-4-a) が最も振幅が大きく、位置が後ろになるに伴って小さくなるのが分かる。向波中で航行しているため縦揺 θ (図 3.4-4-f) が大きくなり、上下加速度と縦揺の周期はほぼ同じである。上下加速度の波形より、上向きの加速度の方が下向きの加速度よりやや大きく、波に乗った後、波の山を下りながら低速で進んでいることが分かる。

船首揺 (図 3.4-4-g) と船速変化 (図 3.4-4-h) をみると、1 波乗り越える毎に変化していることが分かる。海象が荒れた中、船速を通常の航海速力の約 1/3 まで落としているため保針性が低下し、1 波毎に舵を大きく切る様子が客室から伺えた。

上下加速度は図 3.4-2 に示す減速を始めた時が一番大きく、その後は船速を下げたため、抑えられている。図 3.4-5 に船速を約 10kts まで下げて航行した範囲を示す。船は 10kts まで減速してい

る間に波向は向波から左斜め向波になり、その後ゆっくりと 20kts まで増速した。運航限界と推測される波高 1.5m に近い海象の中を向波で航行する大原―波照間島間は、このように船速を大幅に下げて航行することで大きな上下加速度の発生を抑えている。

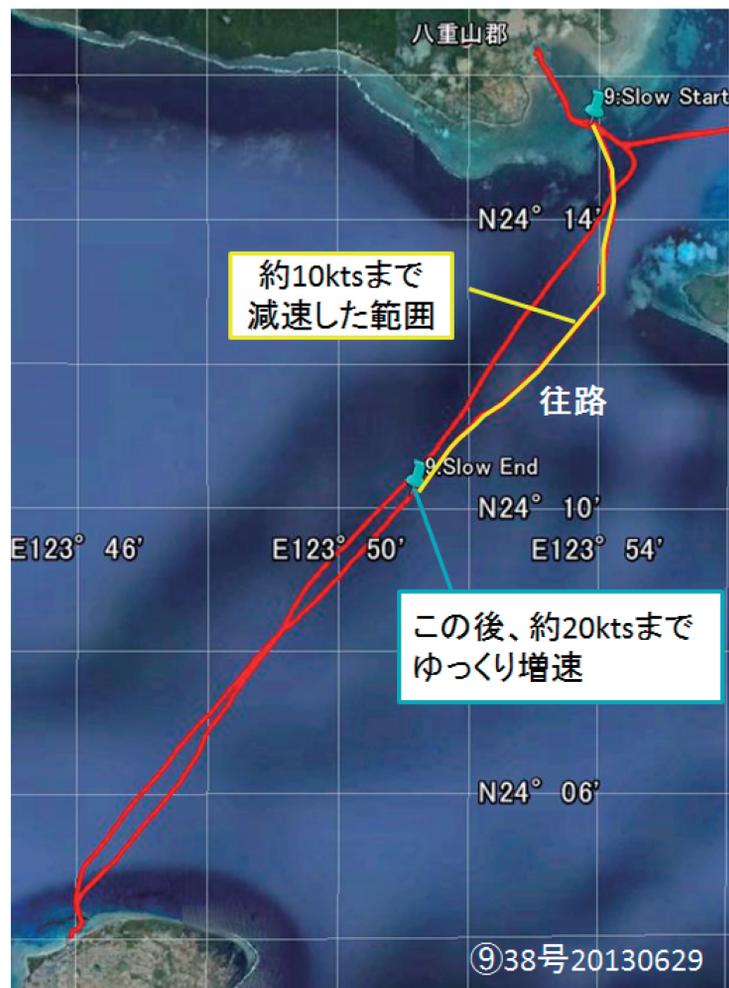


図 3.4-5 船速を抑えた範囲

3. 4. 2 統計解析

6/28 に計測した石垣島―波照間島航路（試験番号 A, B）と、6/29 に計測した石垣島―大原経由―波照間島航路（試験番号 8, 9, 10, 11）および 6/30 に計測した石垣島―波照間島航路（試験番号 12, 13）のデータの統計解析を行った。解析の範囲は各航路の減速した範囲と上下加速度が大きい範囲の 2 種類である。ここでは減速した範囲での解析を述べ、上下加速度が大きい範囲での解析は付録 1 2 に示す。

(1) 解析範囲

図 3.4-6, 7, 8 に 6/28, 29, 30 に石垣島-波照間島航路計測時に減速した範囲を示す。図中、黄線は往路、緑線は復路で示しており、減速する海域は西表島の沖から波照間島手前までの間である。

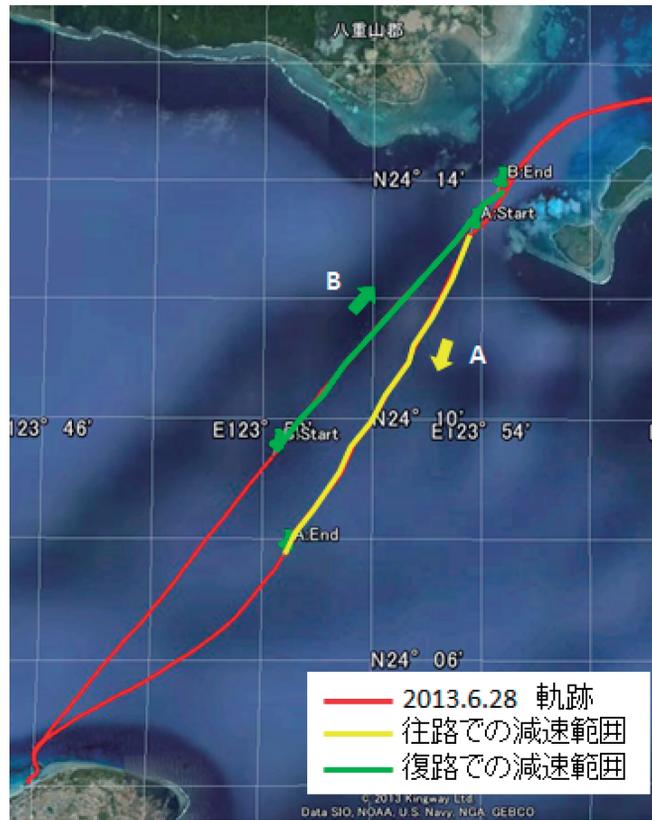


図 3.4-6 6/28 石垣島-波照間島間航路で減速した範囲（試験番号 A, B）

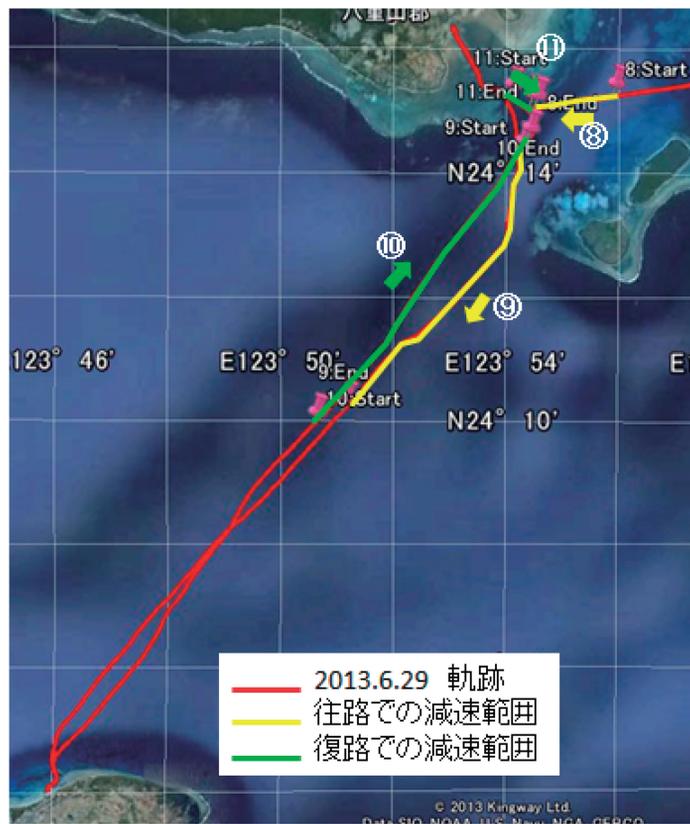


図 3.4-7 6/29 石垣島-波照間島間航路で減速した範囲（試験番号 9, 10, 11, 12）

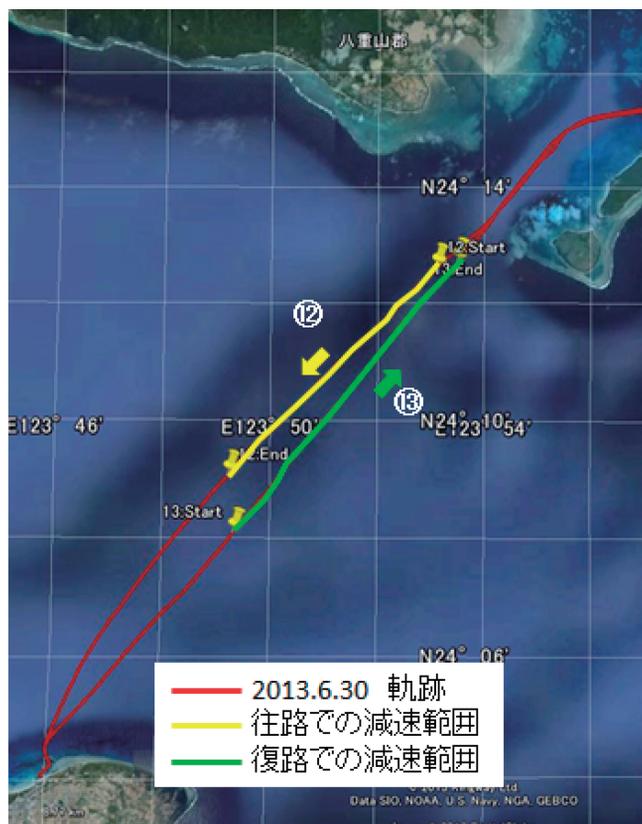


図 3.4-8 6/30 石垣島-波照間島間航路で減速した範囲（試験番号 12, 13）

図 3.4-9 に減速時の平均船速と、波との出会角の平均を計測番号ごとに示す。図中、添え字で示すのは平均船速であり、波との出会角は向波が 0 度で右舷側が正、左舷側が負の値で表わしている。6/29 の往路の大原から波照間島（計測番号 9）航路は著しく減速していたことが分かる。

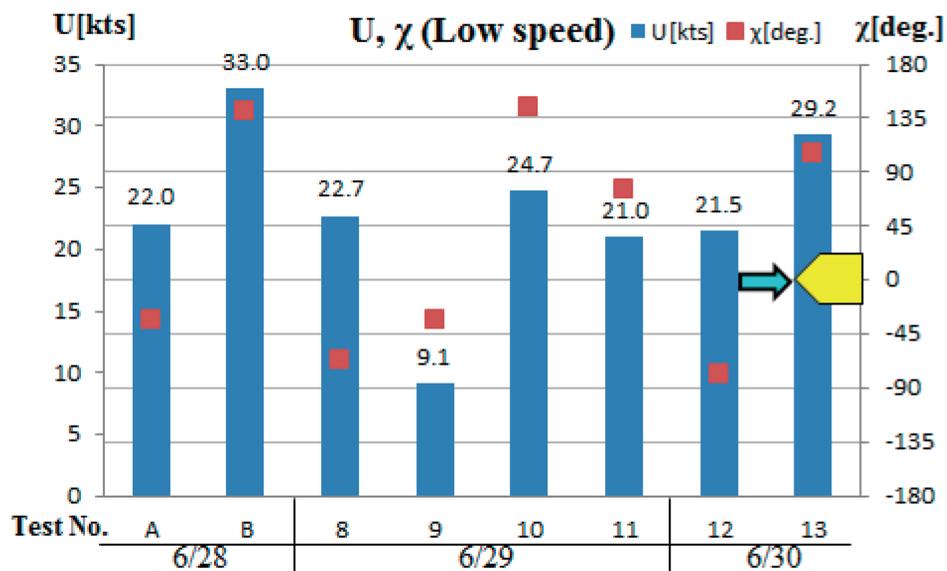


図 3.4-9 減速時の平均船速と波との平均出会角

なお、表 3.3-2, 3, 4 より大原沖から波照間へ向かう海域を航行する 6/28 の計測番号 A での平均波高は 1.32m、波向きは 179 度、6/29 の計測番号 9 での平均波高は 1.38m、波向きは 182 度で、6/30 の試験番号 12 での平均波高は 1.09m、波向きは 147 度である。

(2)統計解析結果

計測した 4 点の上下加速度のうち、値が最も大きくなった前部客室 1 列目での上下加速度 G_{Z-1} の減速時の有義値 $H_{1/3}$ 及び 1/10 最大平均値 $H_{1/10}$ を求めた結果を図 3.4-10 に示す。海象が厳しくなる大原から波照間までの往路での減速範囲では、6/28 に 22.0kts で航行した試験番号 A の上下加速度がやや大きい、6/29 に 9.1kts で航行した計測番号 9 と 6/30 に 21.5kts で航行した試験番号 12 の上下加速度の大きさに大きな差はないことが分かる。前部客室 1 列目での上下加速度 G_{Z-1} の $H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}$ 及び H_{max} (最大値) と船速 V の関係を図 3.4-11 に、上下加速度 G_{Z-1} と波高 H_w の関係を図 3.4-12 に示す。上下加速度の有義値は船速及び波高に関わらずほぼ同じである。また、石垣から波照間への往路である試験番号 A、9、12 での波高と船速の関係を図 3.4-13 に示す。波高が高く上下加速度が大きくなる時は船速を落とすことで上下加速度を抑えていることが分かる。

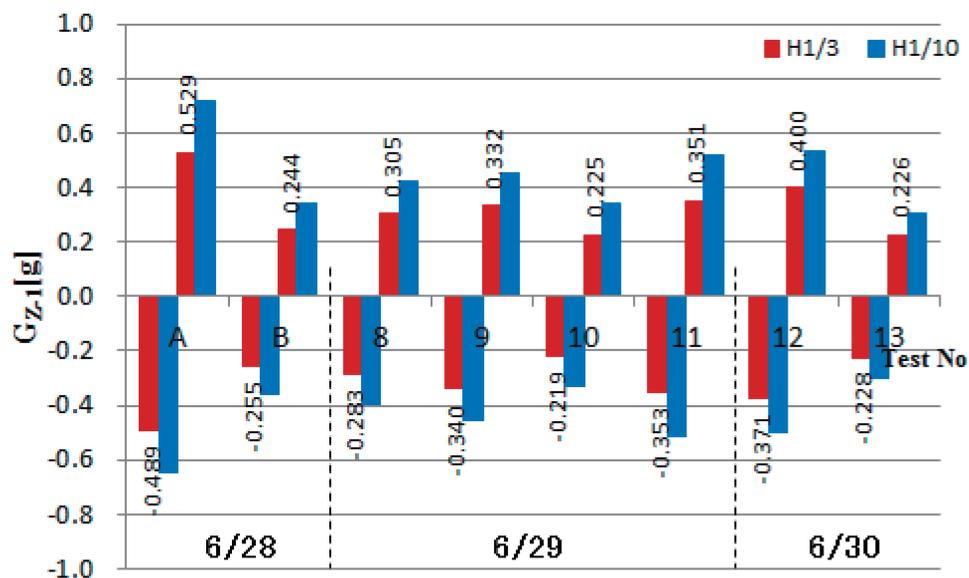


図 3.4-10 客席 1 列目の上下加速度の解析結果

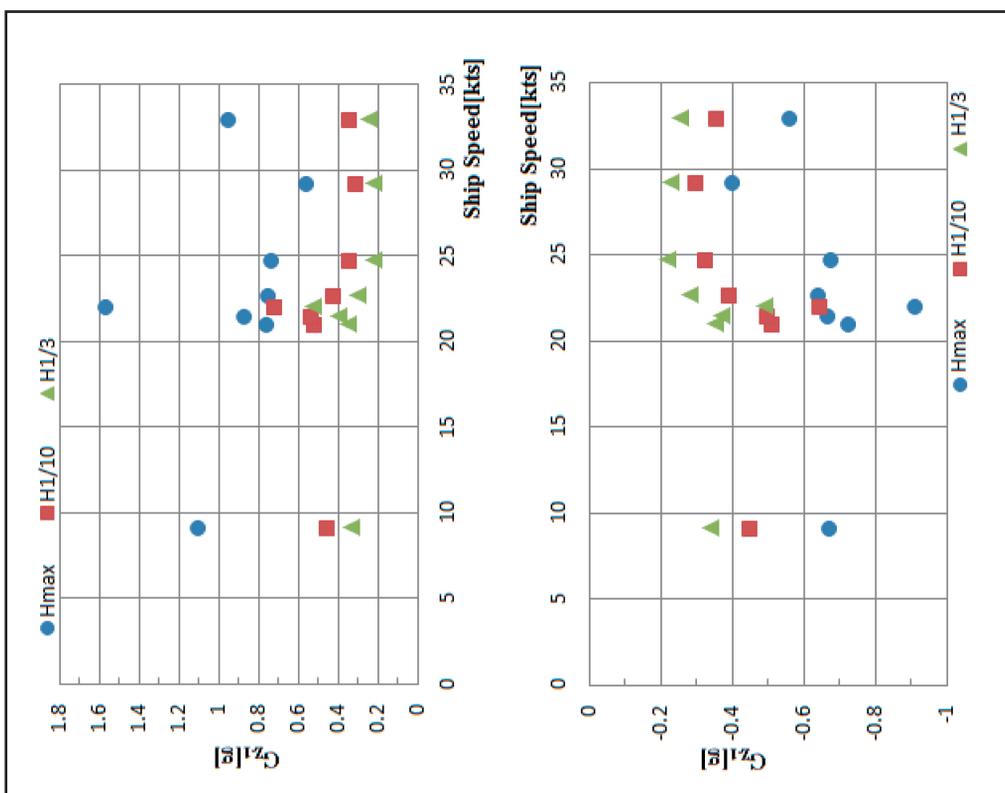


図 3.4-11 上下加速度 G_{z-1} と平均船速 (上図：上向き、下図：下向き)

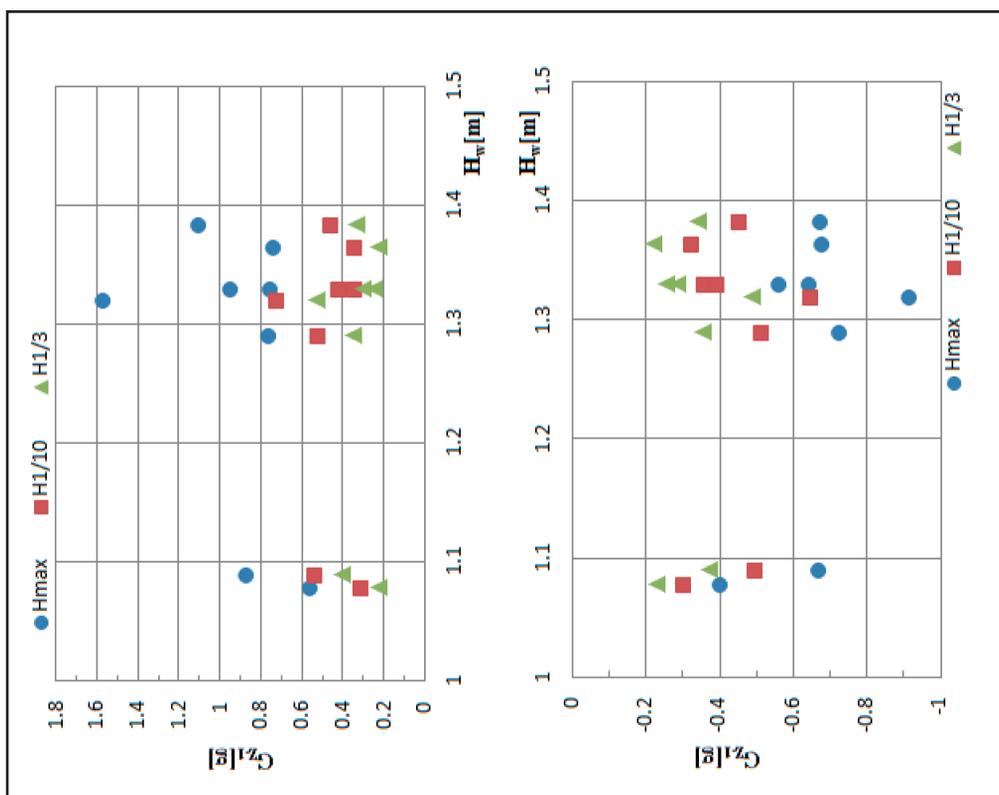


図 3.4-12 上下加速度 G_{z-1} と波高 (上図：上向き、下図：下向き)

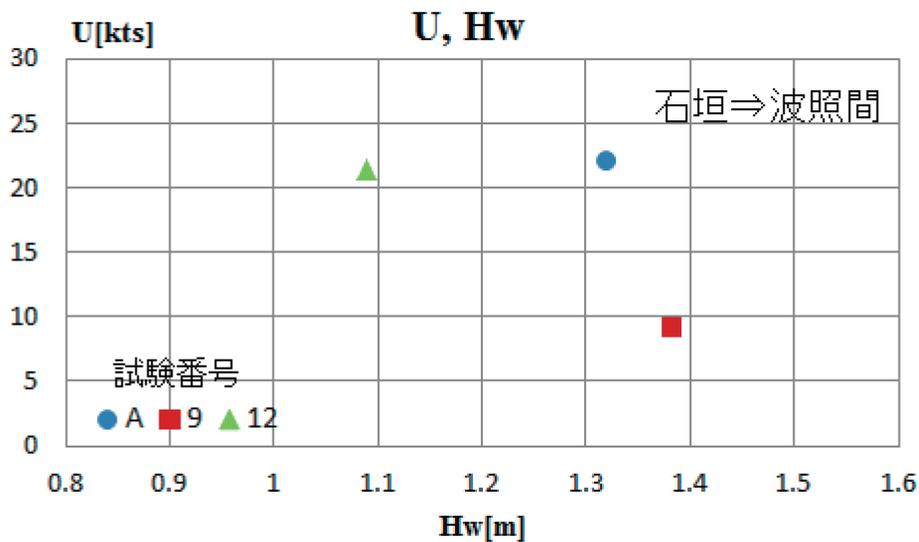


図 3.4-13 波高と船速の関係

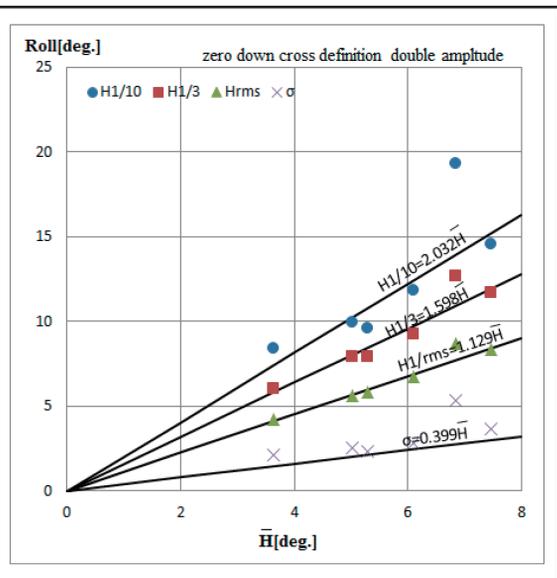
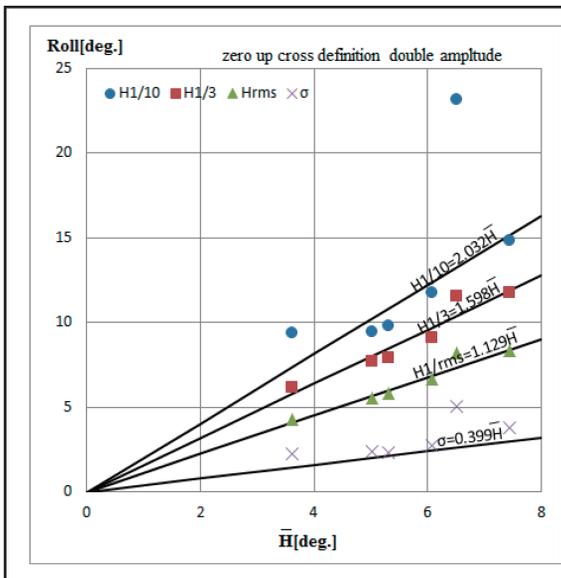
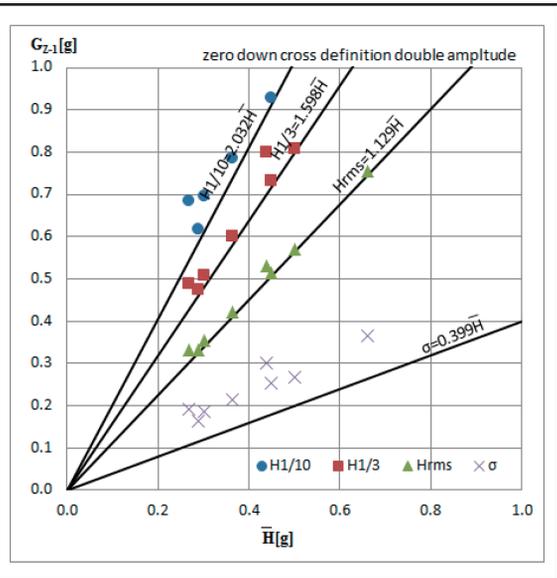
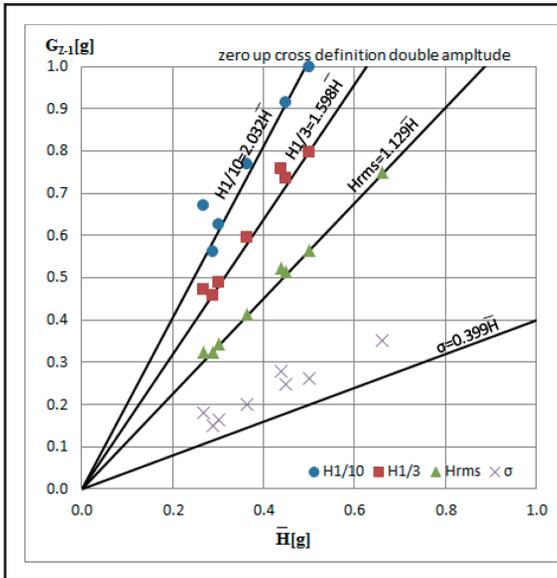
(3) 船体応答の短期予測

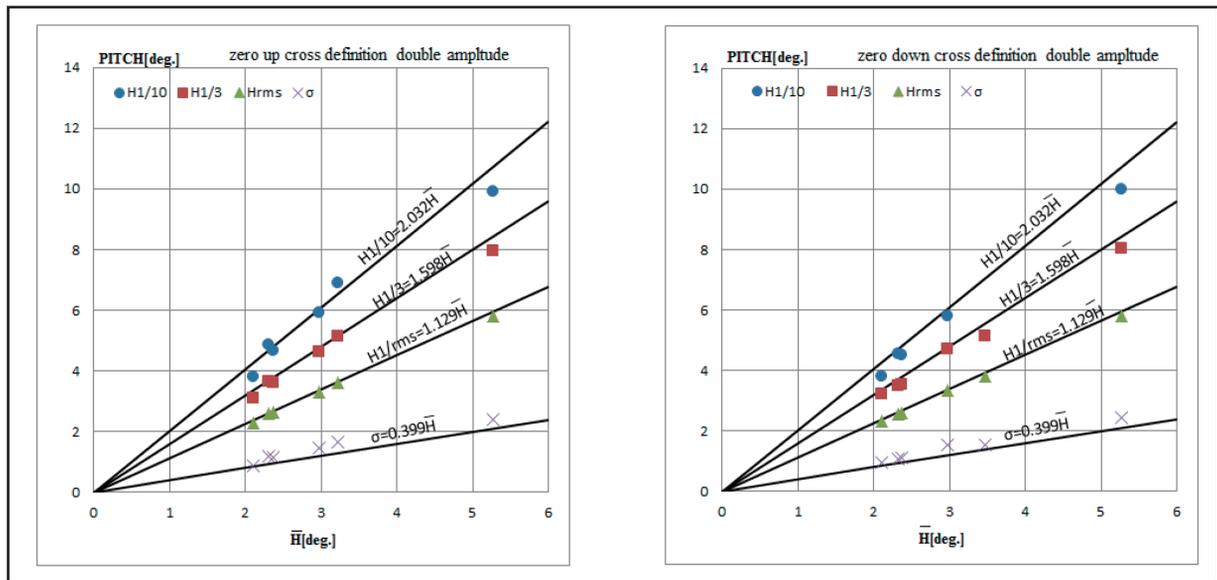
船体応答の標準偏差 σ を求め、確率分布が Rayleigh 分布で近似できれば、短期波浪海面における船体応答の統計的予測を行うことができる。Rayleigh 分布の場合、(3.4-1) 式の関係がある。なお、式中の H_{rms} は二乗平均平方根(Root Mean Square)である。

$$\begin{aligned}
 H_{\frac{1}{3}} &= 1.598\bar{H} = 1.416H_{rms} = 4.0\sigma \\
 H_{\frac{1}{10}} &= 2.032\bar{H} = 1.800H_{rms} = 5.09\sigma \\
 H_{\frac{1}{100}} &= 2.57\bar{H} = 2.28H_{rms} = 6.45\sigma \\
 H_{rms} &= 1.129\bar{H} = 2.828\sigma \\
 \bar{H} &= 0.886H_{rms} = 2.506\sigma \\
 \sigma &= 0.399\bar{H} = 0.354H_{rms}
 \end{aligned}
 \tag{3.4-1}$$

この関係は、ある短期の波浪海面における船の動揺角、加速度、波浪荷重、応力等の推定に利用されている。

今回の計測値の Rayleigh 分布への適応度を把握するために、全振幅の平均値 \bar{H} で上下加速度 G_{Z-1} の σ 、 H_{rms} 、 $H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}$ の値を整理して図 3.4-14 に示す。左図は全振幅のゼロアップクロスで解析したもの、右図は全振幅のゼロダウンクロスで解析したものである。また、同様に整理した横揺の実測短期分布を図 3.4-15 に、縦揺の実測短期分布を図 3.4-16 に示す。全振幅の分布をとると、振動の影響が大きい上下加速度も横揺や縦揺と同様に Rayleigh 分布に近い値になることが分かる。よって上下加速度の計測値は Rayleigh 分布で近似でき、短期波浪海面における統計的予測を行うことができる。





3.4.3 船長方向の位置と上下加速度

客室内の座席位置と上下加速度の関係について解析する。向波で海象が厳しくなる大原沖から波照間島の往路で計測した計測番号9(6/29_38号)、12(6/30_3号)の上下加速度が大きくなった範囲での重心からの距離と上下加速度 G_z の $H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}$ 及び H_{max} の関係を解析した。6/29と6/30で上下加速度が特に大きくなった範囲を図3.4-17, 18に、重心からの距離と上下加速度の関係を図3.4-19に示す。なお、ここでの重心の前後位置は完成図書に記載されているものを採用しており、ジャイロを設置した前部客室9列目よりやや後方の位置にある。上下加速度が一番大きい座席は、船首側で重心位置から最も離れた1列目の座席である。上下加速度は重心位置付近に近づくに伴い小さくなり、前部客室9列目の座席が最も小さい。上下加速度の最大値は座席前方で変化が大きく、3列目、1列目では急に大きくなるので注意が必要である。

今回の計測で得られた各計測番号での座席位置と上下加速度の有義値 $H_{1/3}$ の関係から船首部の上下加速度の有義値を外挿して求めた結果を図3.4-20に示す。図は計測番号ごとの上向きの加速度(正)と下向きの加速度(負)を分けて示しており、船首上下加速度の位置は喫水線長での船首部とした。船首上下加速度は有義値でも座席9列目での上下加速度の約3倍になることが分かる。なお、減速した範囲で解析した場合の座席位置と上下加速度の関係および船首上下加速度は付録12に示す。

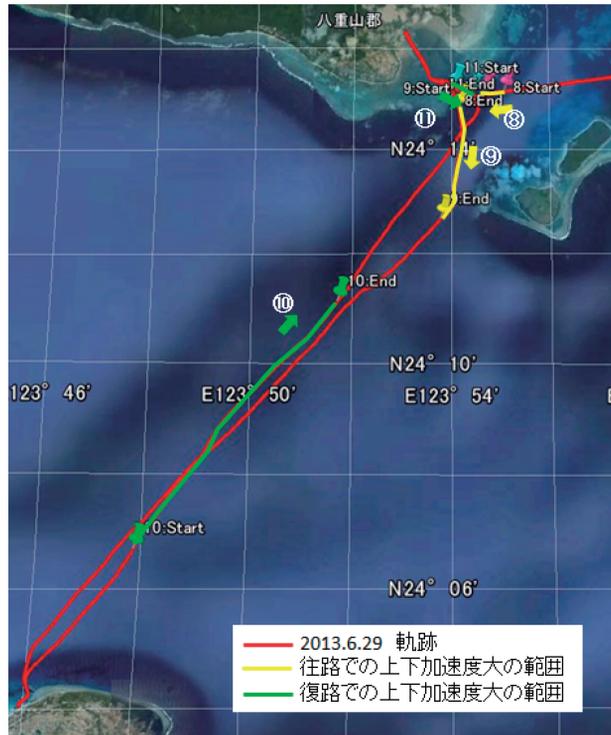


図 3.4-17 6/29 石垣島-波照間島間航路で加速度が大きくなった範囲

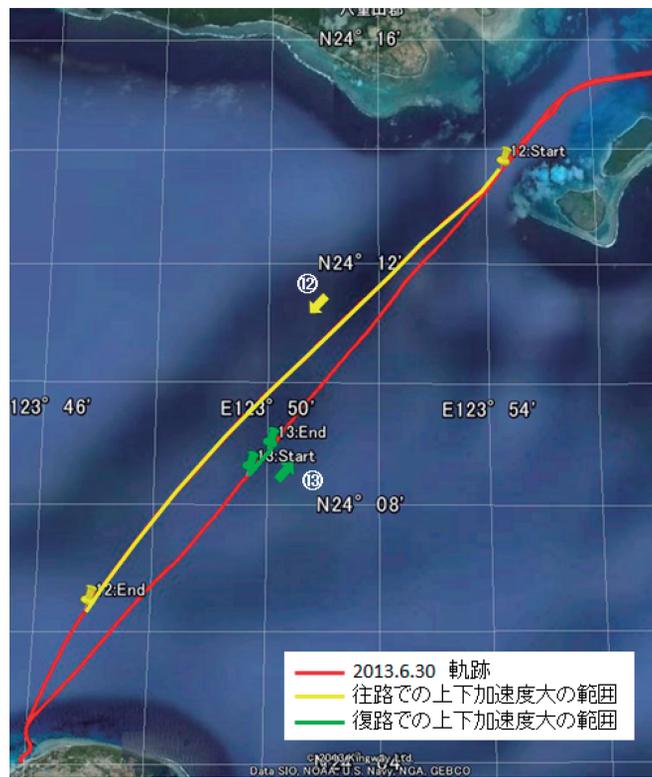


図 3.4-18 6/30 石垣島-波照間島間航路で加速度が大きくなった範囲

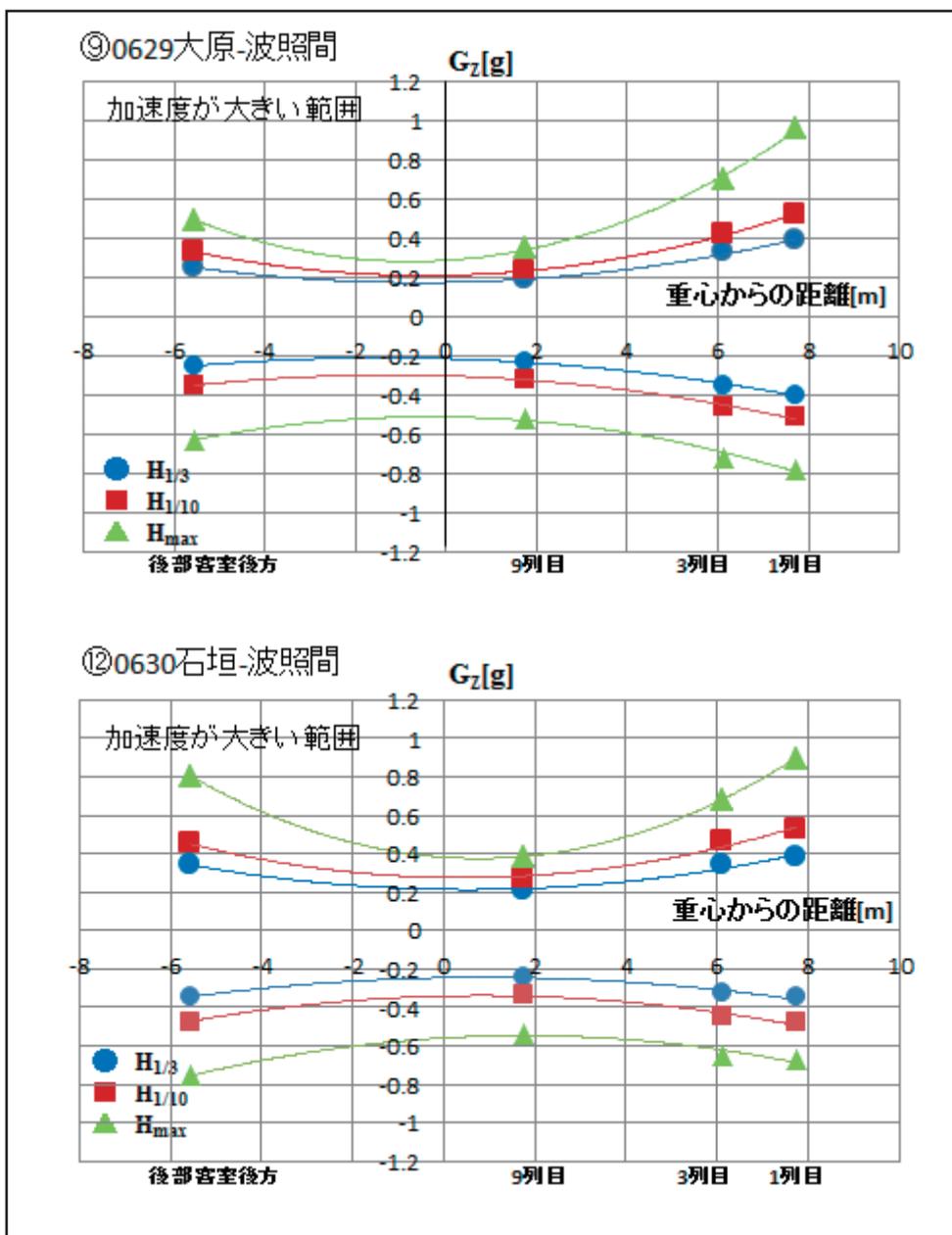


図 3.4-19 座席の船長方向位置と上下加速度の関係（上図：計測番号 9、下図：計測番号 12）

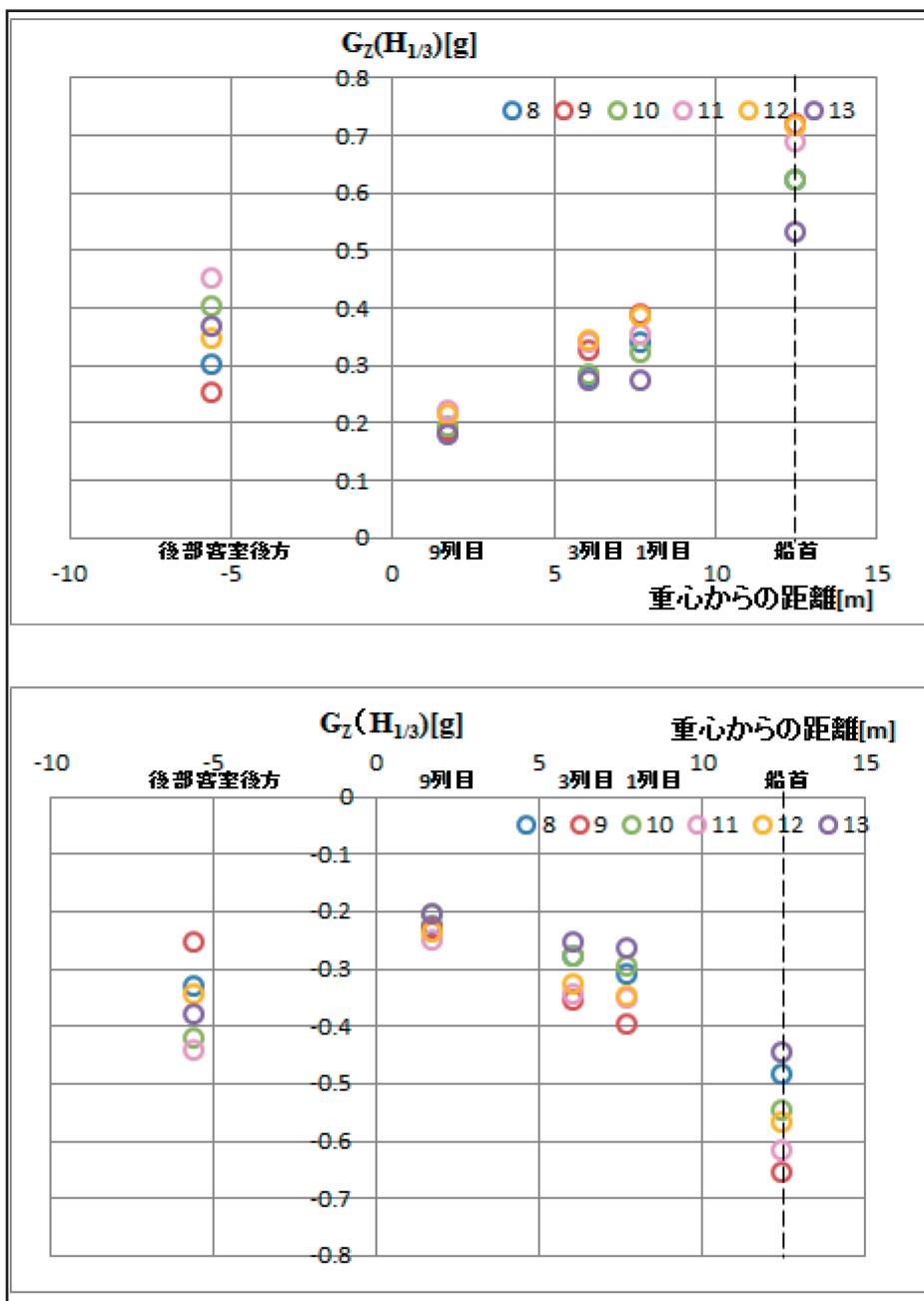


図 3.4-20 計測番号ごとの船首上下加速度の推定
(上図：上向きの加速度、下図：下向きの加速度)

(1) 木原の資料との比較

木原¹⁾は寸法、船型の異なる数種の高速艇船型について船体運動計算及び水槽試験を行い、船首上下加速度は船の喫水線長によって一義的に決定できることを示し、風浪階級によって定義した海象毎に向波中の船首上下加速度 α_F と船の喫水線長 (L_{WL}) との関係を、船速をパラメータとして求めている。

表 3.4-1 風浪階級

風浪階級	$H_{w1/3}$ [m]
3	0.50~1.25 (1.0)
4	1.25~2.50 (2.0)
5	2.50~4.00 (3.0)

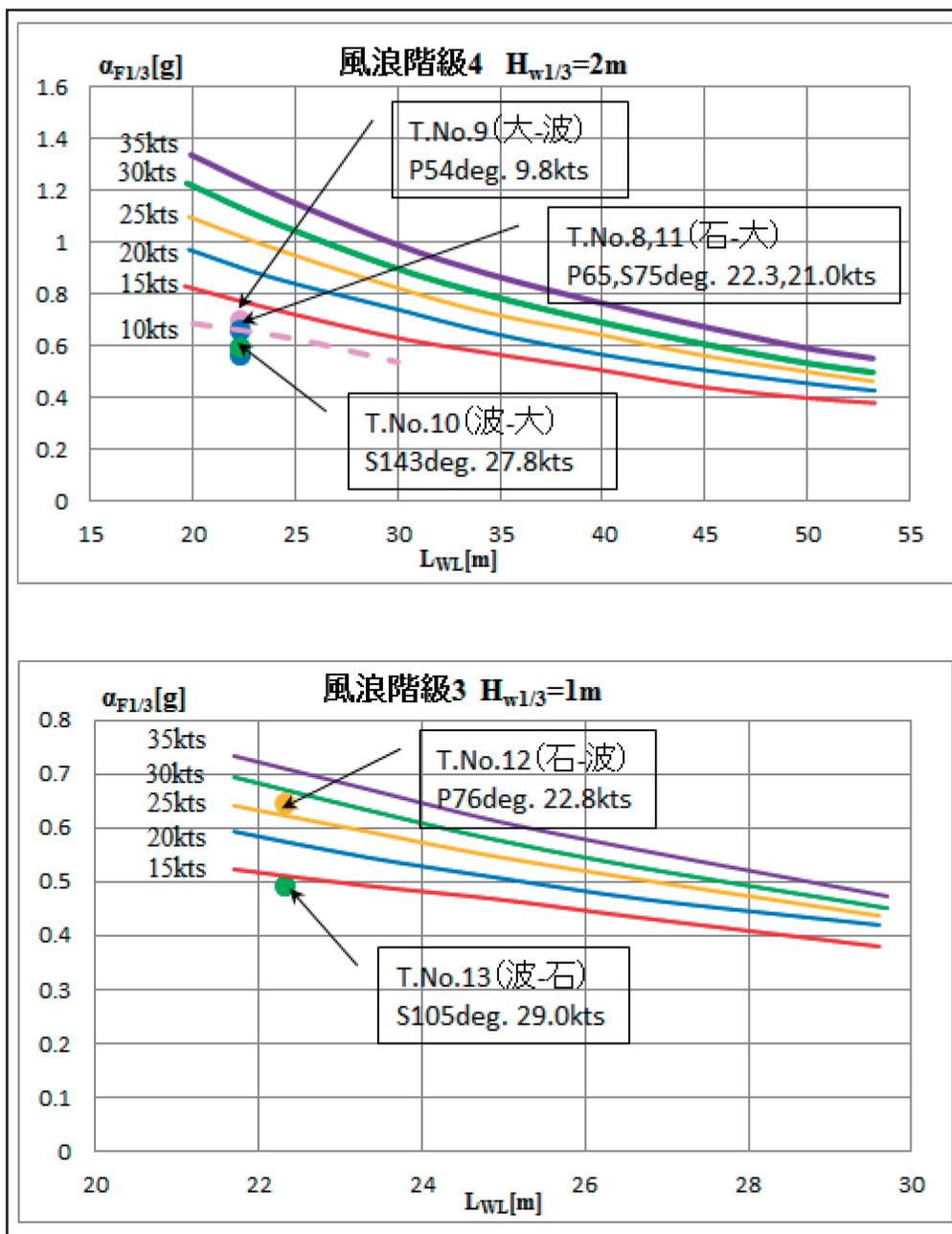


図 3.4-21 船速ごとの船長と船首上下加速度の関係 (上図：風浪階級 4、下図：風浪階級 3)

今回の計測結果を木原が示す船長（喫水線長 L_{WL} ）と船首上下加速度 a_F との関係の図と比較する。計測結果の解析範囲は上下加速度が大きい範囲とした。なお、風浪階級の定義は表 3.4-1 のとおりである。今回の計測では有義波高は 1.5m 未満であったため、比較できる風浪階級は階級 4 と階級 3 の 2 つであり、6/29 に計測した計測番号 8-11 を風浪階級 4、6/30 に計測した計測番号 12-13 を風浪階級 3 として扱った。なお、比較する計測した船首上下加速度 a_F は下向きである。比較した結果を図 3.4-21 に示す。図中、線で示すのが木原の示す値であり、風浪階級 4 の図中、ピンクの破線で示す船速 10kts の値は 15kts から 35kts の値から外挿したものである。大原から波照間島へ向かう向波での船首上下加速度（試験番号 9、12）は、木原の船速をパラメータとした船首上下加速度と船長（喫水線長）の関係とおおよそ一致している。

(2) 大隅の資料との比較

大隅²⁾は中速艇の向波での実艇による波浪中航走試験結果を基にした船首上下加速度の簡易推定法を横軸は λ/L_{WL} 、縦軸は $A_F \cdot L_{WL}/H_w$ 、パラメータは F_n で整理して図で示している。大隅の船首上下加速度推定図と今回計測した値を比較した結果を図 3.4-22 に示す。なお、ここでの船首上下加速度は全振幅の有義値 $H_{1/3}$ であり、計測値は上下加速度が大きくなった範囲での解析値を用いている。おおよそ向波であった試験番号 9、12 は他の計測番号の場合よりも比較的近い値になっているが、先に述べた木原の関係図（図 3.4-21）の方が良い一致を示す。

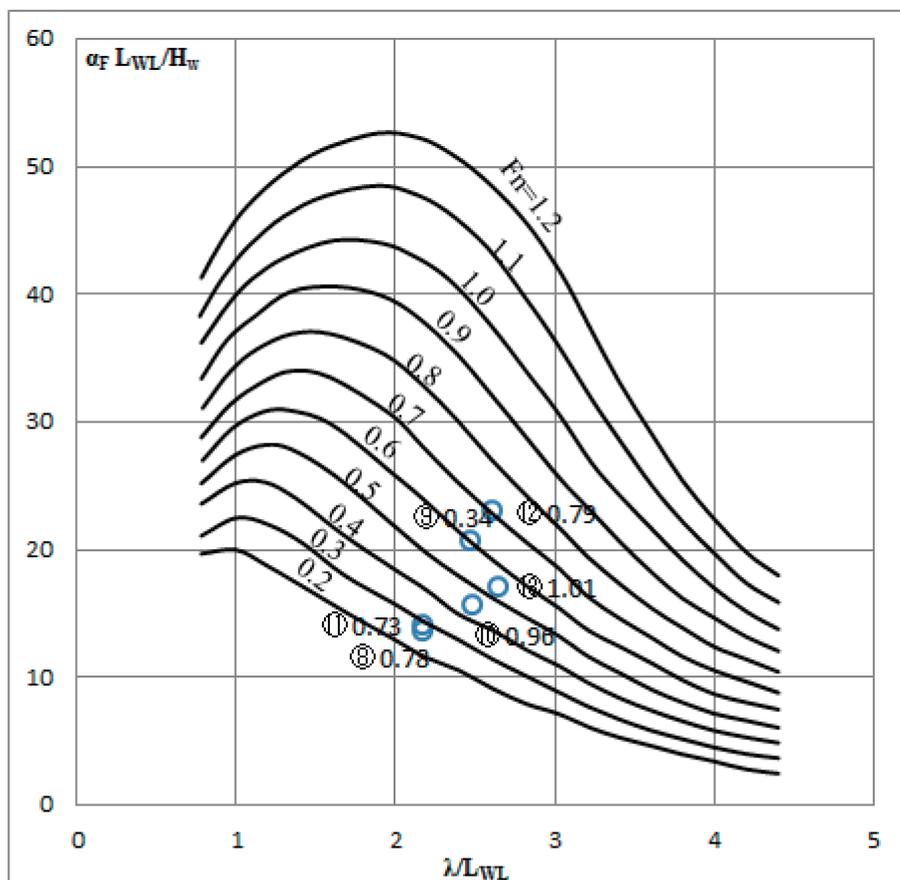


図 3.4-22 大隅の船首上下加速度推定図との比較

3.5 まとめ

旅客負傷事故が発生した石垣島－波照間島航路に就航している小型高速旅客船 2 隻において上下加速度と船体運動を計測、解析し、同船の海象、船速に応じた船体運動特性及び客室内上下加速度を調査した。以下に得られた結果を述べる。

- 1) 運航限界と推測される波高である 1.5m に近い海象の中を向波で航行する大原－波照間島間は、船速を大幅に下げた航行することで大きな上下加速度の発生を抑えていた。
- 2) 上下加速度の計測値は Rayleigh 分布で近似でき、短期波浪海面における統計的予測を行うことができる。
- 3) 上下加速度が一番大きい座席は、船首側で重心位置から最も離れた 1 列目の座席である。上下加速度は座席が後方になるにつれて小さくなり、重心位置付近（前部客室 9 列目）の座席が一番小さい。上下加速度の最大値は座席前方で変化が大きく、3 列目、1 列目では急に大きくなるので注意が必要である。
- 4) 計測した向波での船首上下加速度（試験番号 9、12）は、木原の船速をパラメータとした船首上下加速度と船長（喫水線長）の関係とおおよそ一致している。

最後に、実船計測にご協力を頂いた有限会社安栄観光の関係各位に関して謝意を表します。特に、各船の船長及び甲板員の方々には、計測準備や計測時に種々のご配慮を頂きましたことを付記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 木原和之：耐航性を考慮した高速艇の設計法に関する研究（その 1）、西部造船会会報第 71 号、pp.107-116、昭和 61 年 3 月
- 2) 大隅三彦：続・中速艇の一設計法（1）、船の科学第 45 巻第 12 号、pp.35-43、平成 4 年 12 月

4. 水槽実験

4.1 海上技術安全研究所における水槽実験

4.1.1 実験概要

旅客負傷事故が発生した小型高速旅客船（第三あんえい号）の模型を事故発生時の海象に相当する不規則波中等で曳航して船体縦運動、客室位置での上下加速度を計測する水槽実験を実施し、旅客負傷事故発生時の上下加速度等の状況を把握するとともに、計測条件（有義波高、平均波周期、船速）と船体縦運動及び客室位置での上下加速度の関係を調べた。

(1) 供試模型船

供試船は、第三あんえい号の 1/9.36 縮尺模型（写真 4.1-1、表 4.1-1）である。実験は完成重量重心復原性報告書に示された満載出港状態（表 4.1-2）で行った。



写真 4.1-1 供試船

表 4.1-1 主要目

	実船	模型船
Lpp (m)	23.40	2.500
B (m)	4.00	0.427
D (m)	1.45	0.155
縮尺		1/9.36

表 4.1-2 計測状態（満載出港状態）

	実船	模型船
W (t)/(kg)	36.762	43.737
da (m)/(mm)	0.815	87.1
df (m)/(mm)	0.705	75.3
dm (m)/(mm)	0.760	81.2

(2) 実験方法

実験は、海上技術安全研究所の三鷹第三船舶試験水槽（中水槽）（長さ 150m、幅 7.5m、水深 3.5m：写真 4.1-2）において模型船を曳引台車（最大速度 6m/sec）上に設置したガイド装置に取付け（Heave-rod 取付け位置：重心位置及び S.S.9 付近：写真 4.1-3）、プランジャー式の造波装置で発生させた不規則波中を向波状態で曳航して実施した。その際、船体応答の計測結果が統計的に有意な値となるように、出会波数約 200 波を目安に造波信号を変えて繰り返し計測を行った。



写真 4.1-2 使用水槽（三鷹第三船舶試験水槽：中水槽）

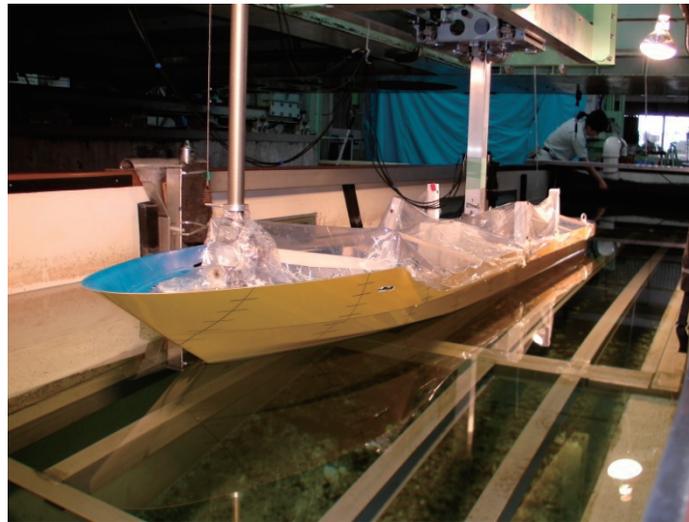


写真 4.1-3 ガイド装置に取付けた模型船

(3) 計測項目及び計測装置

計測項目及び計測装置は以下のとおりである。また、計測状況をビデオ撮影した。

①上下揺および縦揺（ガイド装置ポテンショ）

上下加速度3点（一軸加速度計）

②出会波高（非接触型波高計）

なお、上下加速度の計測位置は表 4.1-3 のとおりである。

表 4.1-3 上下加速度計測位置（船体中央からの距離：実船(m)、模型船(cm)）

	実船	模型船	備考
(heave rod fore)	10.20	134.0	船首甲板
V_Acc-1	5.50	58.8	前部客室前から1列目
V_Acc-2	1.45	15.5	前部客室前から6列目
(heave rod aft)	-1.95	-20.8	前部客室前から10列目
V_Acc-3	-8.08	-86.3	後部客室前から4列目

(4) 計測条件

計測は、①事故の発生状況の把握、及び、②波浪条件及び運航条件と船体運動、客室位置での上下加速度の特性との関係の明確化ができるよう、推定されている事故発生時の波浪状況(有義波高 $H_{1/3}=1.91\text{m}$ 、波周期 $T_m=6.7\text{s}$) と船速 ($V_S=15\text{kn}$) を基本に、有義波高、波周期及び船速(台車速度)を変化させて行った。計測条件をまとめて表 4.1-4、表 4.1-5 に示す。何れも実船スケールの値で示している。

なお、基礎データとして航走時の姿勢変化を把握するため、平水中での計測(実船船速: $5\text{kn} \sim 30\text{kn}$) も行った。

表 4.1-4 計測条件(有義波高、船速変化: 波周期 $T_m=6.7\text{s}$)

V_S (kn)	$H_{1/3}$ (m)		
	1.00	1.50	1.91
10	/	○	/
15	○	○	○
20	○	○	○
25	○	/	/

表 4.1-5 計測条件(波周期変化)

$H_{1/3}$ (m)	T_m (s)	V_S (kn)
1.00	4.5	20
	6.7	
	8.0	

4.1.2 実験結果

(1) 平水中

平水中の計測結果を実船スケールに換算して図 4.1-1 に示す。船速 15kn を超えると船首が持ち上がり、トリム角(●印)が 2.5 度以上増加し半滑走状態で航走するようになる。

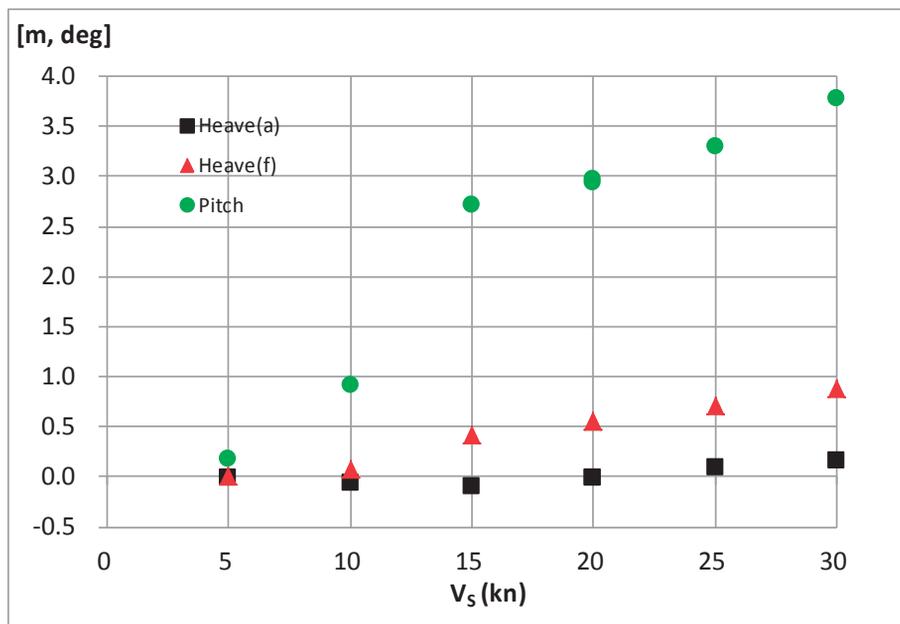


図 4.1-1 平水中の航走姿勢

(2) 波浪中

(i) 計測例

大きな上下加速度が生じた状態の計測例を図 4.1-2 に示す。計測条件は、事故発生時の推定値である、実船スケールで有義波高 $H_{1/3}=1.91\text{m}$ 、波周期 $T_m=6.7\text{s}$ 、船速 $V_S=15\text{kn}$ に対応する値である。

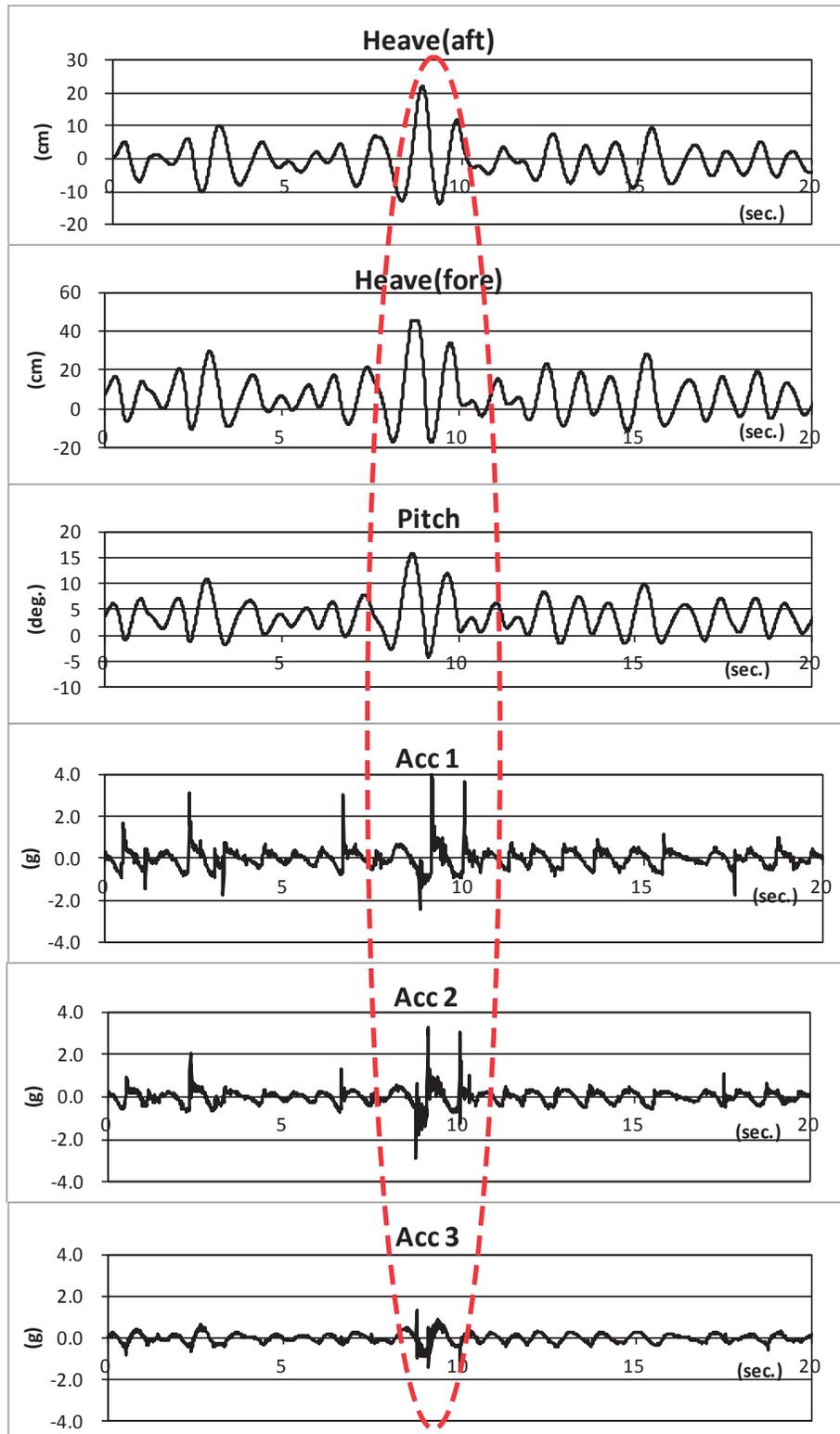


図 4.1-2 計測例 ($H_{1/3}=1.91\text{m}$, $T_m=6.7\text{s}$, $V_S=15\text{kn}$)

上下揺は上向き変位、縦揺は船首上げ、上下加速度は上向き加速度を正にとって示している。図 4.1-2 から、計測開始から約 8.7 秒後に船首部が 40cm 以上上昇し、船首上げ 15 度を超える縦揺を生じ、船首下げに移行する状況で最も前方に配置した加速度計（ACC1：前部客室 1 列目）で 1G を超す下向き加速度が生じていることが分かる。その後、船首が下がり波面に衝突する際に 4G を超す非常に大きな上向きの加速度が生じている。

本船の事故に関する運輸安全委員会の報告書¹⁾によると、事故の際に前から 3 列目に乗船していた乗客は、航行中、時折身体が浮き、天井に頭部が当たっていたが、負傷した時にも大きな動揺によって座席から身体が浮いて臀部から座席に落下したと話しているとのことである。また、同報告書¹⁾では、座席に座った状態で船体に 1G 以上の下向き加速度が一旦掛かって腰が浮き、続けて腰が座席にたたきつけられて衝撃力が座席から身体に伝わることで腰椎損傷が引き起こされる可能性を指摘していることから、本船の事故は図 4.1-2 に示した状況に近い状況で発生したと推測される。

なお、図 4.1-2 では、船首が下がり波面に衝突する際に生じる上向きの衝撃的な上下加速度が船首から後方へ離れた位置程小さくなることも示されており、特に最後尾の後部客室 4 列目の位置（ACC3）では、2G を超えるような上向き加速度は計測されていない。

(ii) 波浪条件(有義波高、平均波周期)及び運航条件(船速)と船体運動、上下加速度の関係

事故の発生に関連すると考えられる、船体運動（縦揺の極大値片振幅、zero down cross 両振幅）、上下加速度（極小値片振幅、zero up cross 両振幅）の計測値を有義波高、平均波周期及び船速で整理して図 4.1-3～図 4.1-5 に示す。

図中には、各項目の統計解析結果を計測時の有義波高等で無次元化して示しており、■は平均値、▲は 1/3 最大平均値（有義値）、●は 1/10 最大平均値、×は最大値である。また、上下加速度極小値の片振幅を示す図には、-1G に対応する値を点線で示している。

なお、運輸安全委員会の報告書¹⁾では、非常に大きな上向き加速度、つまり衝撃力が直接座席から身体に伝わる場合にも腰椎損傷が引き起こされる可能性が指摘されているので、上向きの上下加速度（極大値片振幅）についても同様の整理を行って付録 1 3 にまとめた。

①船速の影響

有義波高 $H_{1/3}=1.50\text{m}$ 、平均波周期 $T_m=6.7\text{s}$ で船速 V_S を 10kn, 15kn, 20kn の 3 ケース変化させて計測した結果をまとめて図 4.1-3 に示す。計測した範囲では、船速が速くなるにつれて、縦揺の大きさは若干減少する。一方、上下加速度は船速の増加と共に、客室内のいずれの位置でも大きくなっており、特に、前部客室 1 列目（ V_Acc1 ）では、船速が 15kn、20kn で下向きの最大加速度が点線で示した 1G を超える場合もあるので、同様の事故を防止するためには、減速することが重要であることが分かる。

②波高の影響

船速 $V_S=15\text{kn}$ 、平均波周期 $T_m=6.7\text{s}$ で有義波高 $H_{1/3}$ を 1.00m, 1.50m, 1.91m の 3 ケース変化させて計測した結果をまとめて図 4.1-4 に示す。計測した範囲では、波高が高くなるに従い、縦揺は大きくなり^{注)}、それに伴い、上下加速度も大きくなる^{注)}。特に、前部客室 1 列目（ V_Acc1 ）では、事故に結びつく下向きの加速度が波高の増加とともに急激に 1G に近くなるので、同様の事故を防止するためには、大きな波を受けないような操船が重要である。

注) 図 4.1-4 に示した縦揺及び上下加速度は有義波高等で無次元化されている。

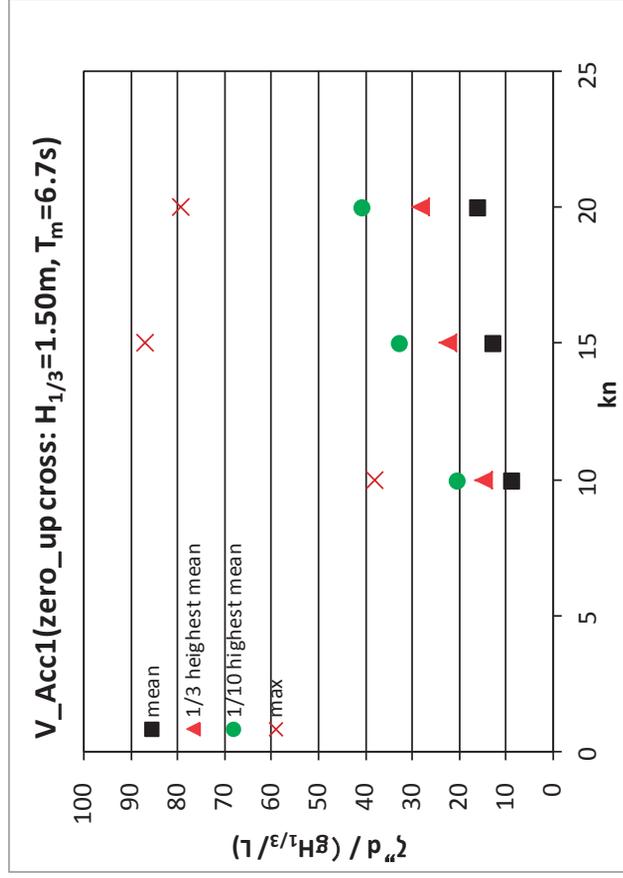
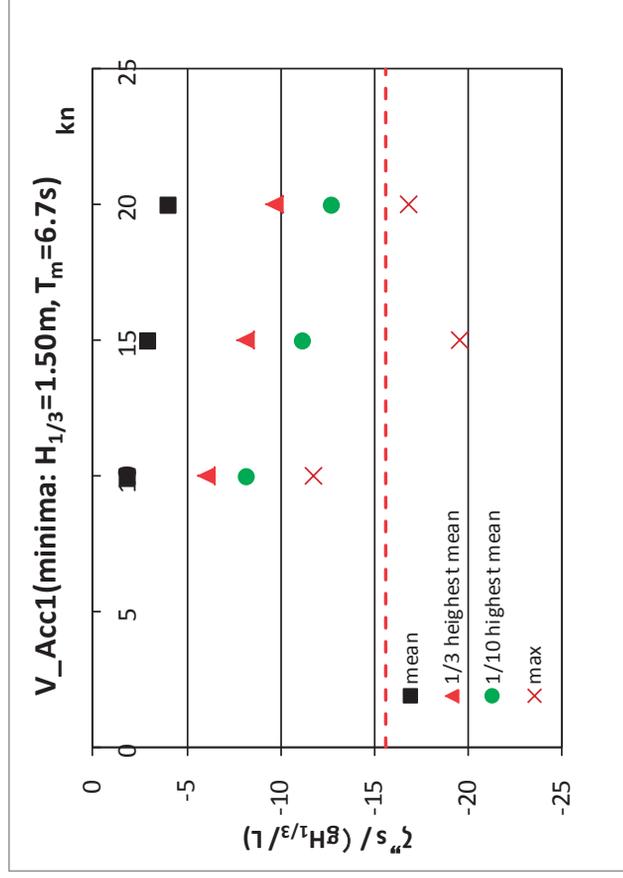
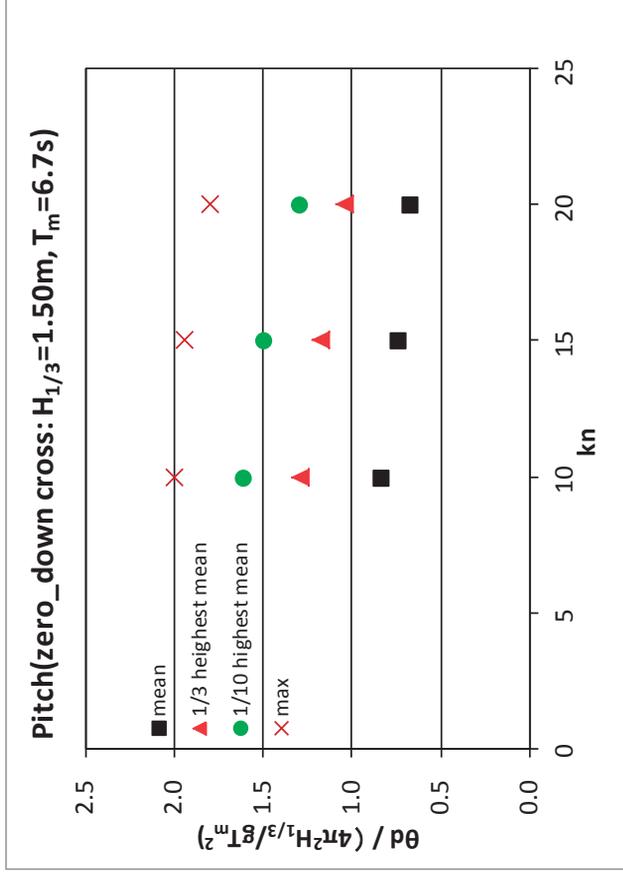
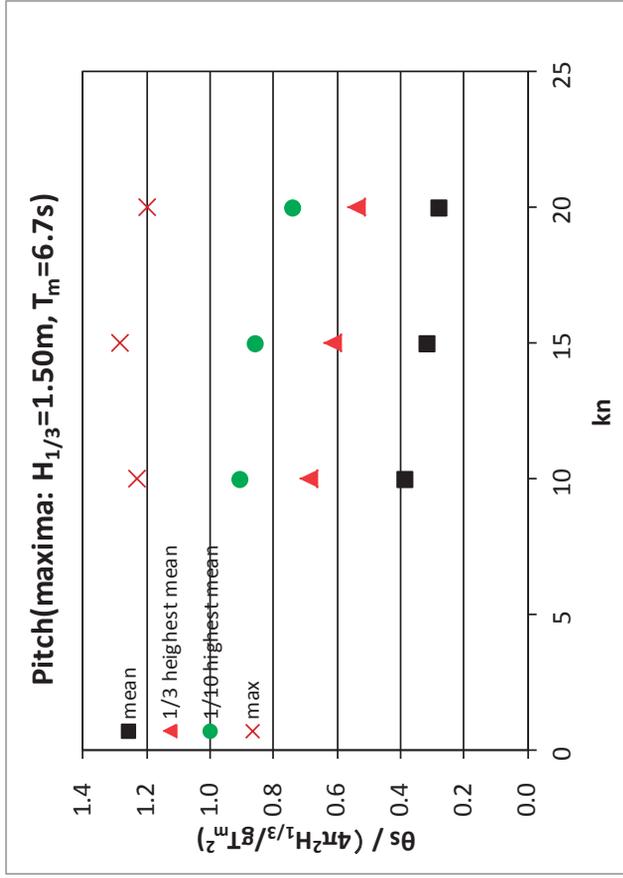


図 4.1-3-(1) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす船速の影響 ($H_{1/3}=1.50\text{m}$, $T_m=6.7\text{s}$)

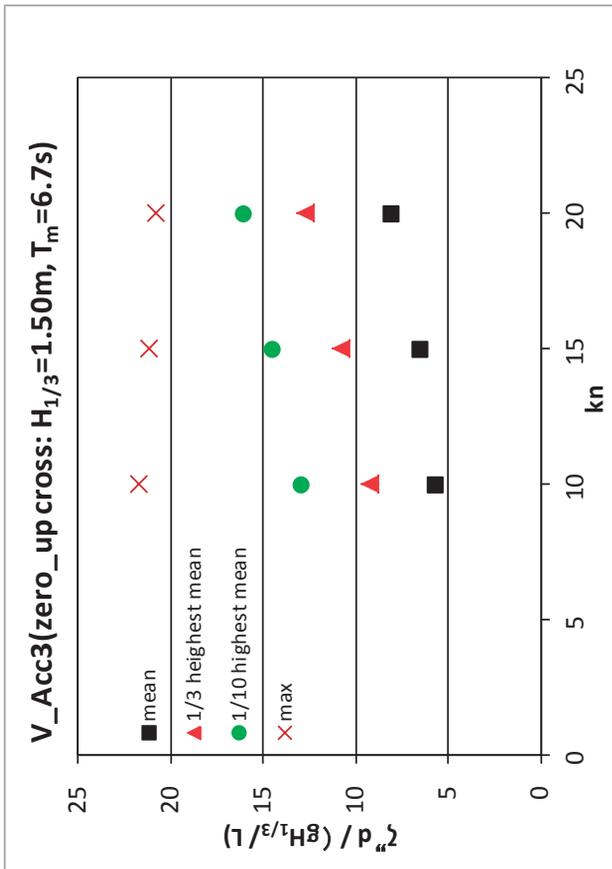
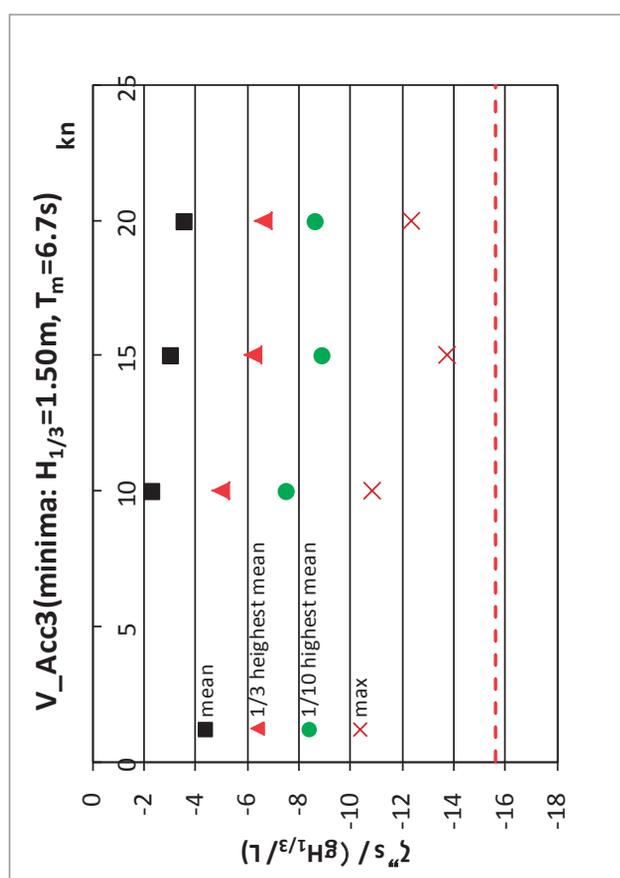
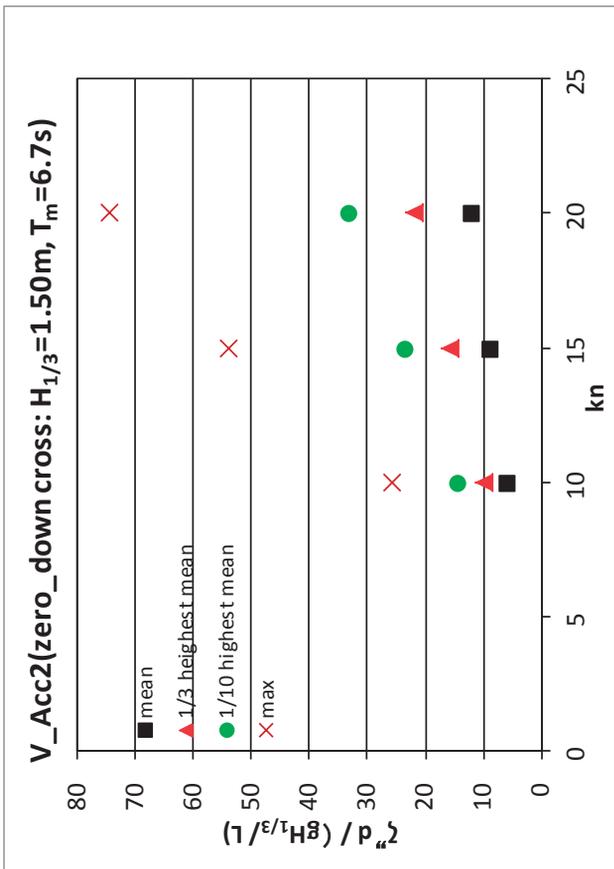
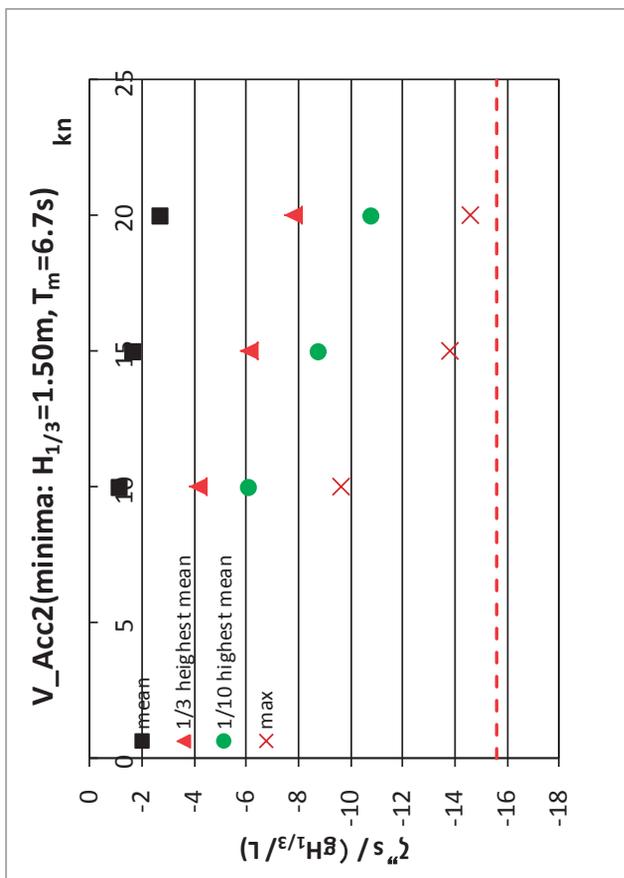


図 4.1-3-(2) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす船速の影響 ($H_{1/3}=1.50\text{m}, T_m=6.7\text{s}$) (つづき)

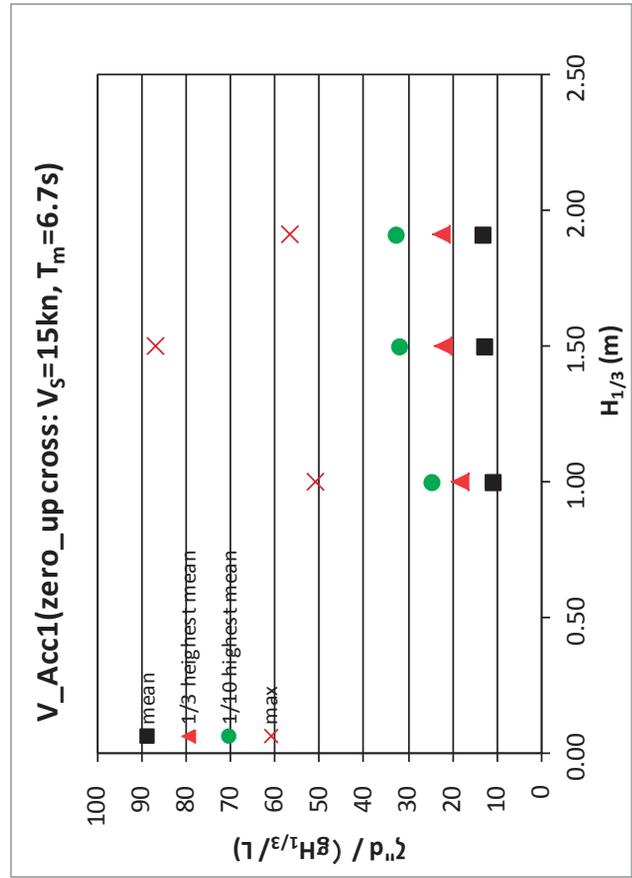
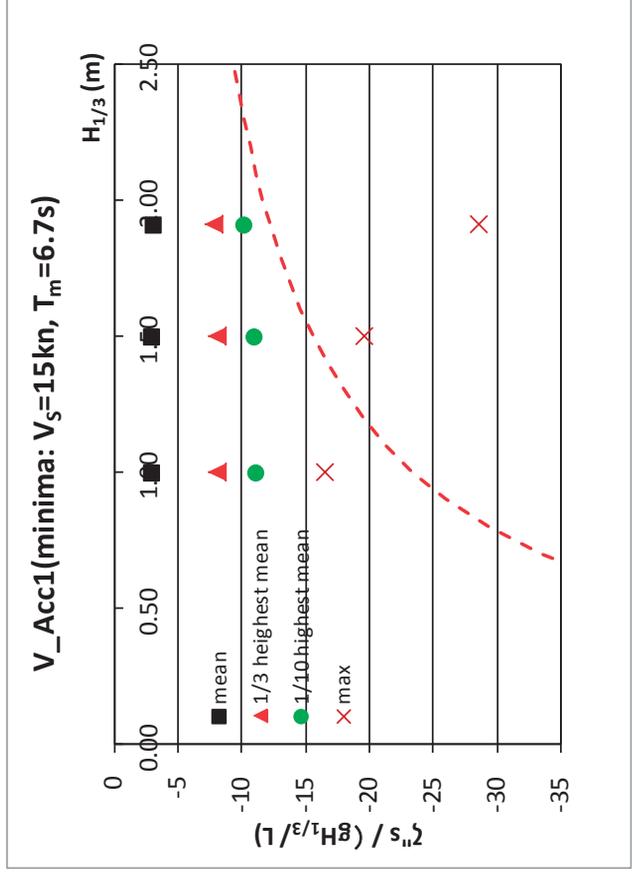
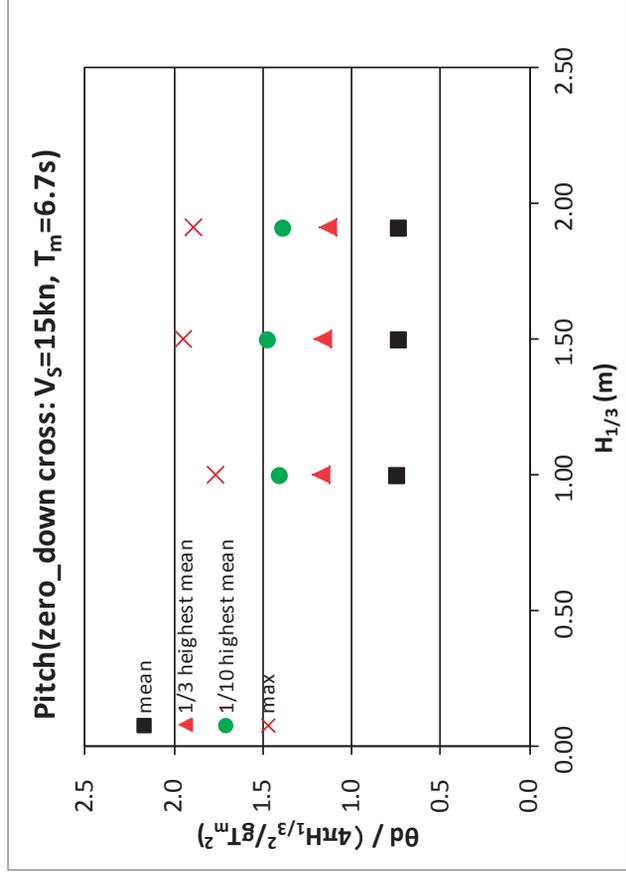
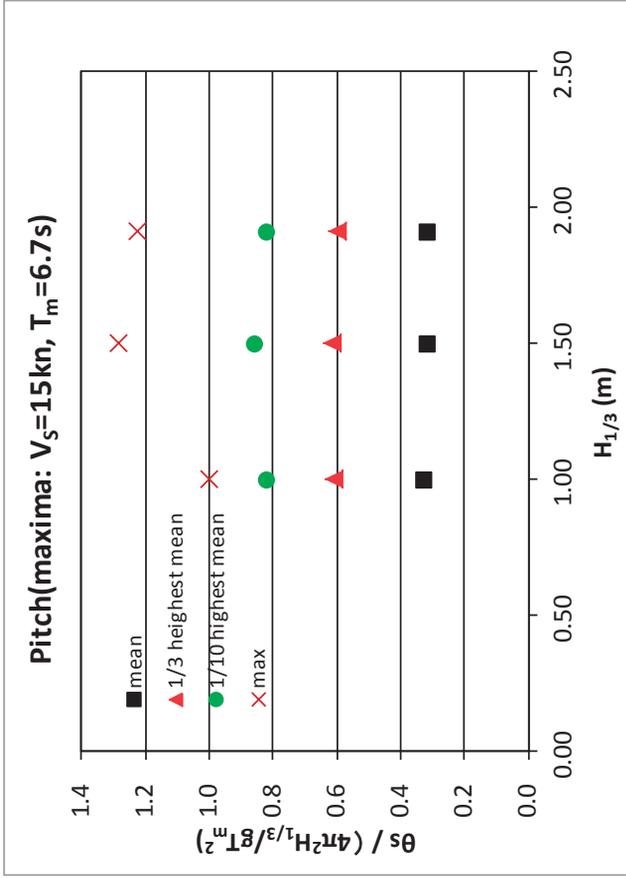


図 4.1-4-(1) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす有義波高の影響 ($T_m=6.7\text{s}$, $V_s=15\text{kn}$)

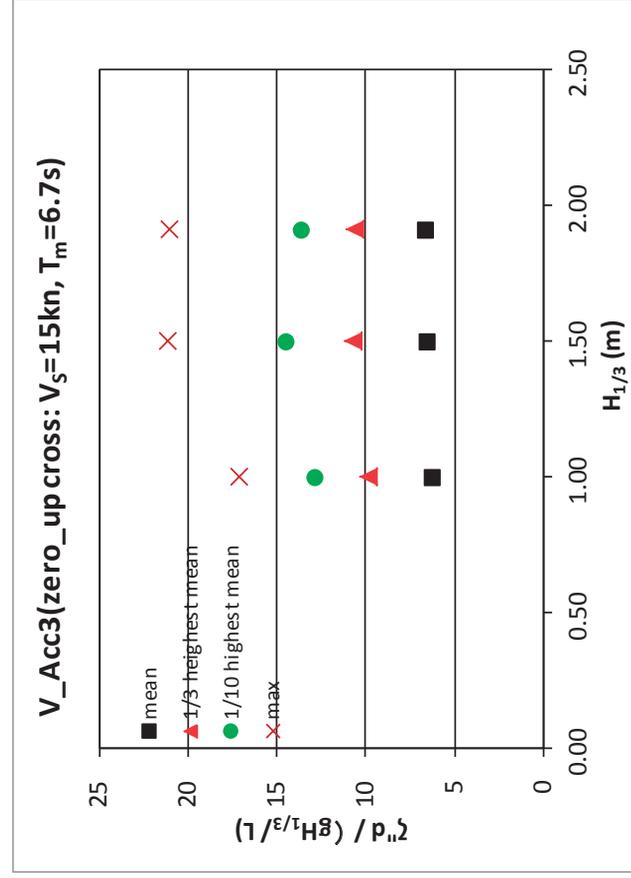
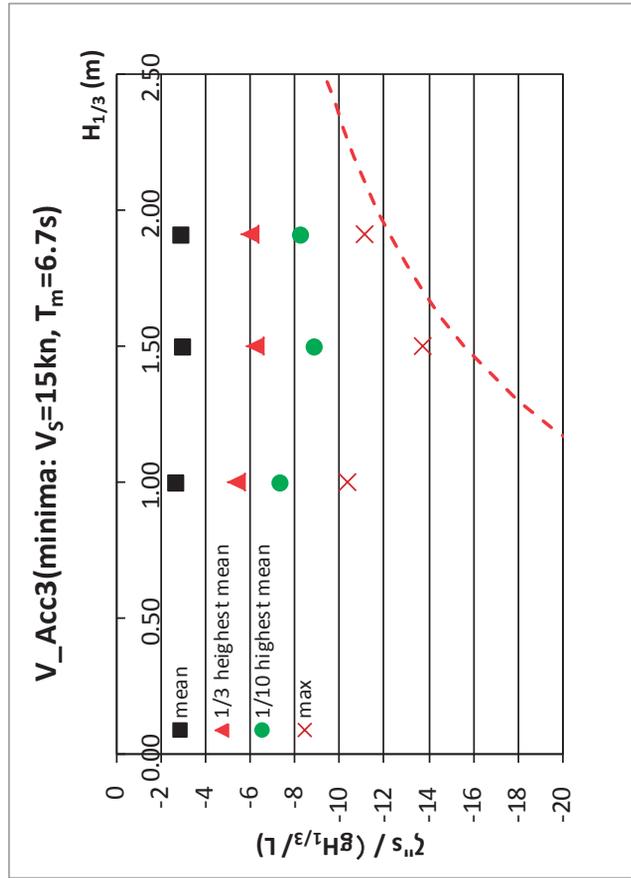
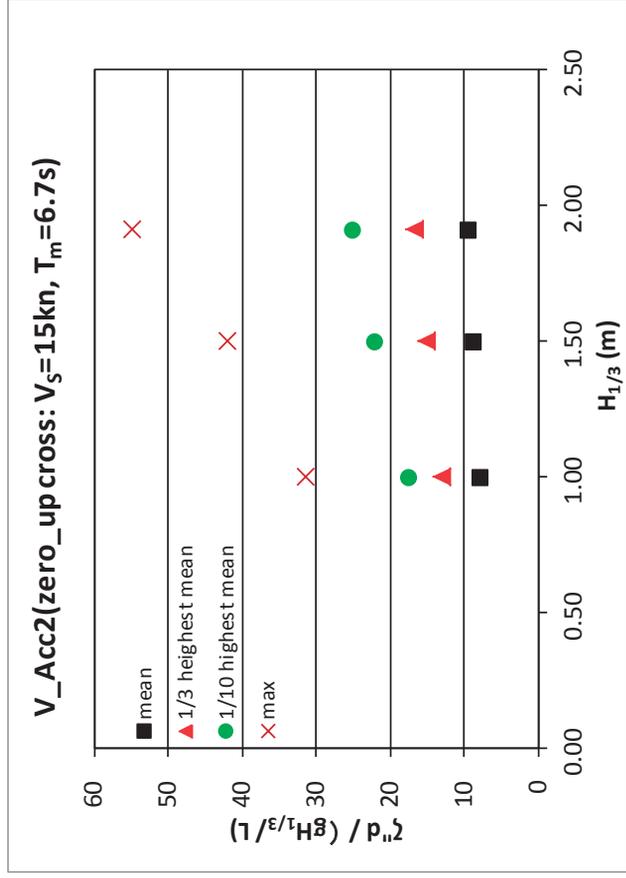
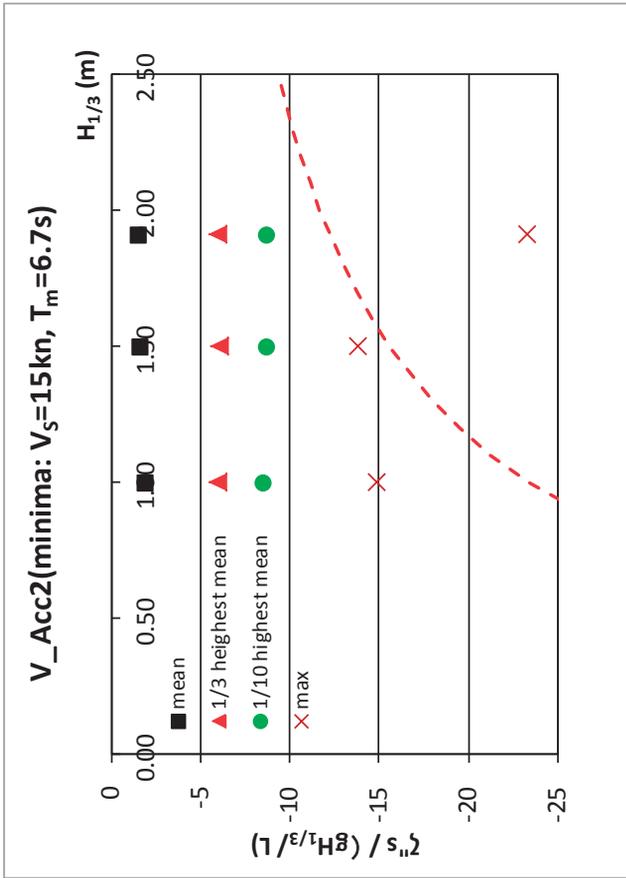


図 4.1-4-(2) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす有義波高の影響 ($T_m=6.7\text{s}$, $V_S=15\text{kn}$) (つづき)

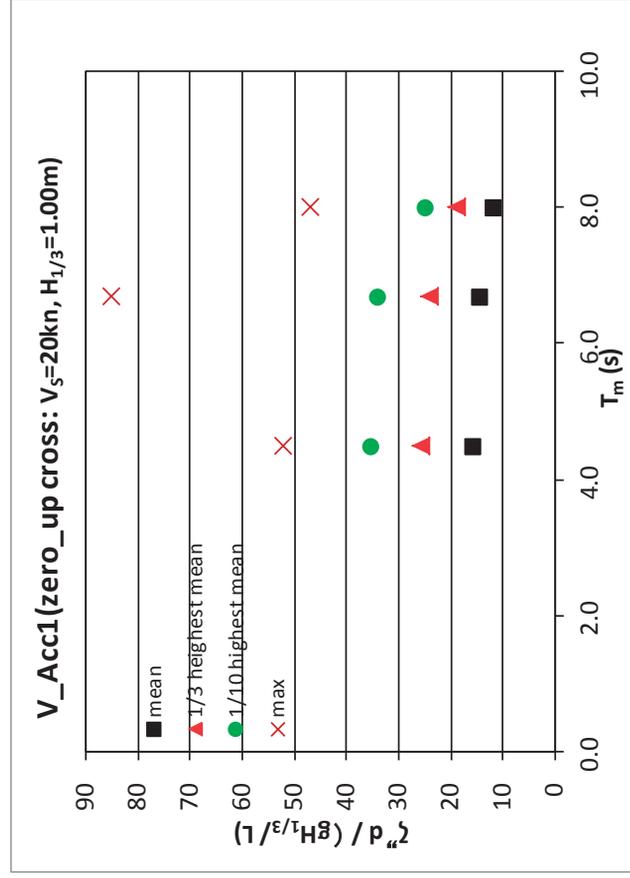
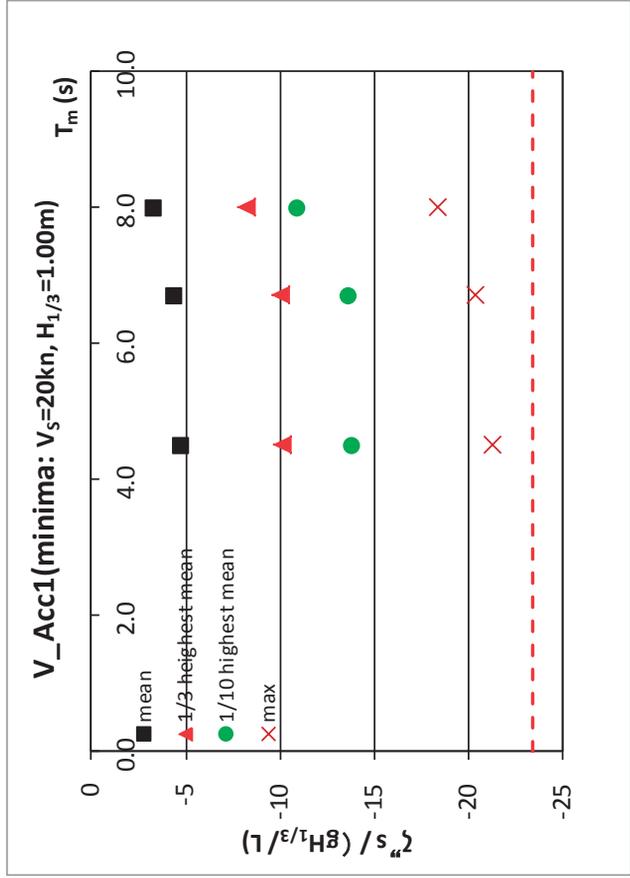
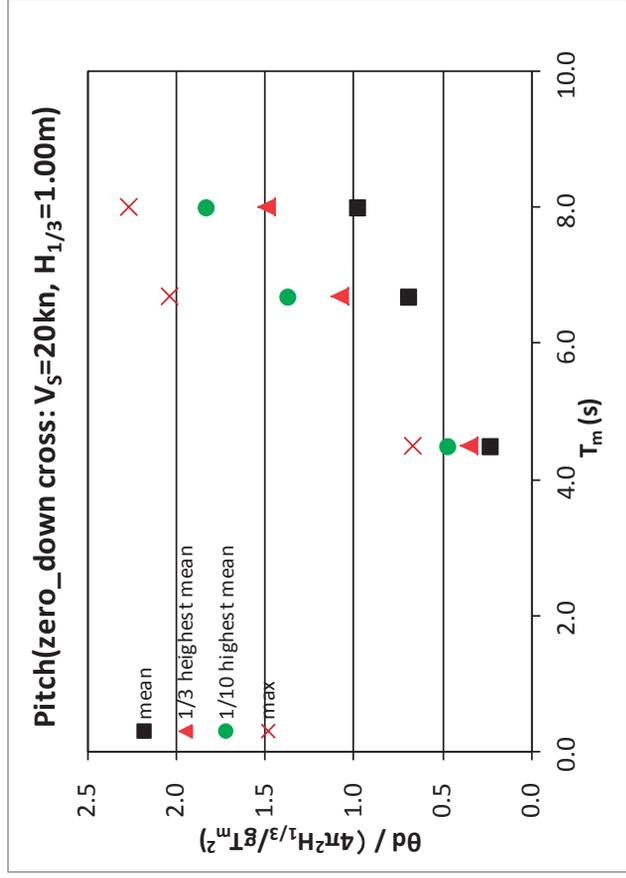
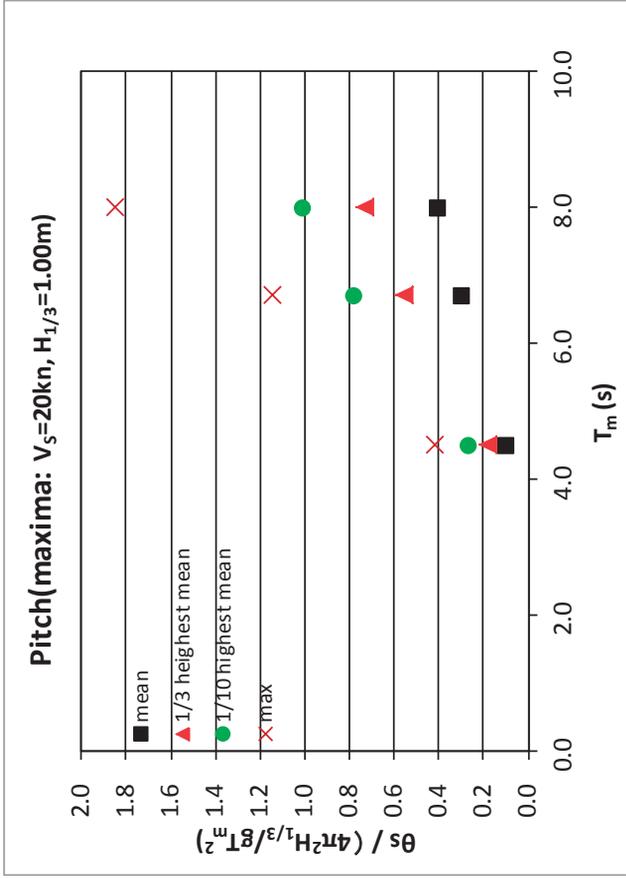


図 4.1-5-(1) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす平均波周期の影響 ($H_{1/3}=1.00m, V_S=20kn$)

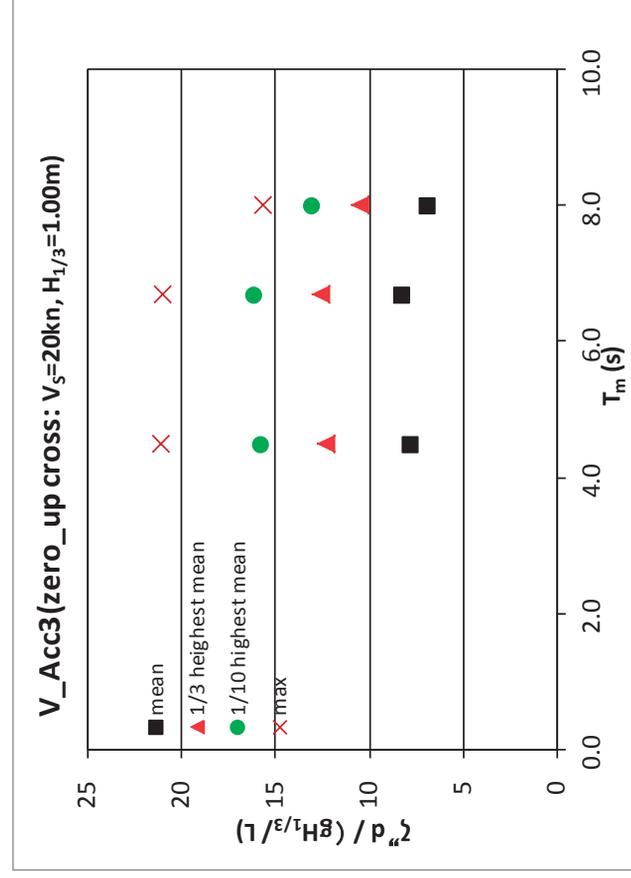
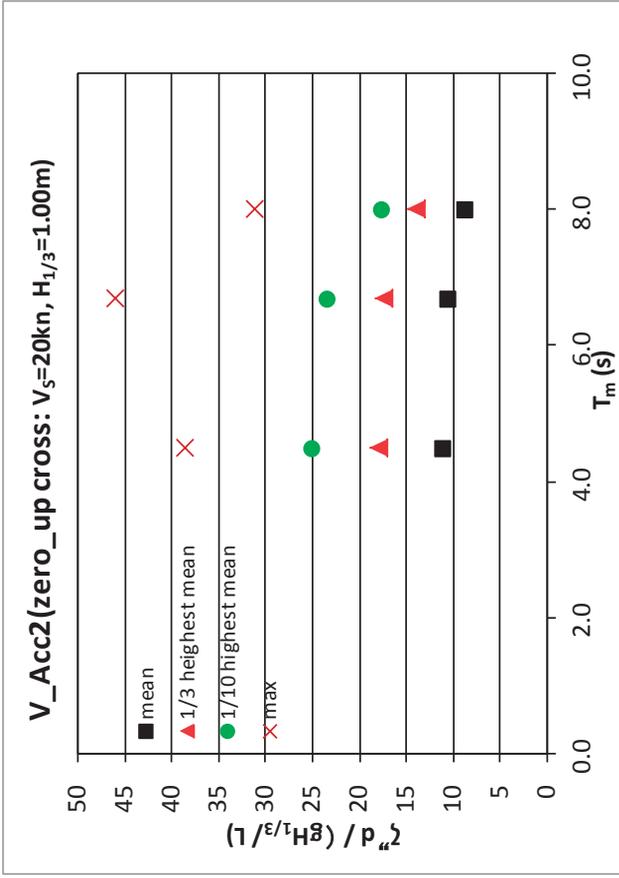
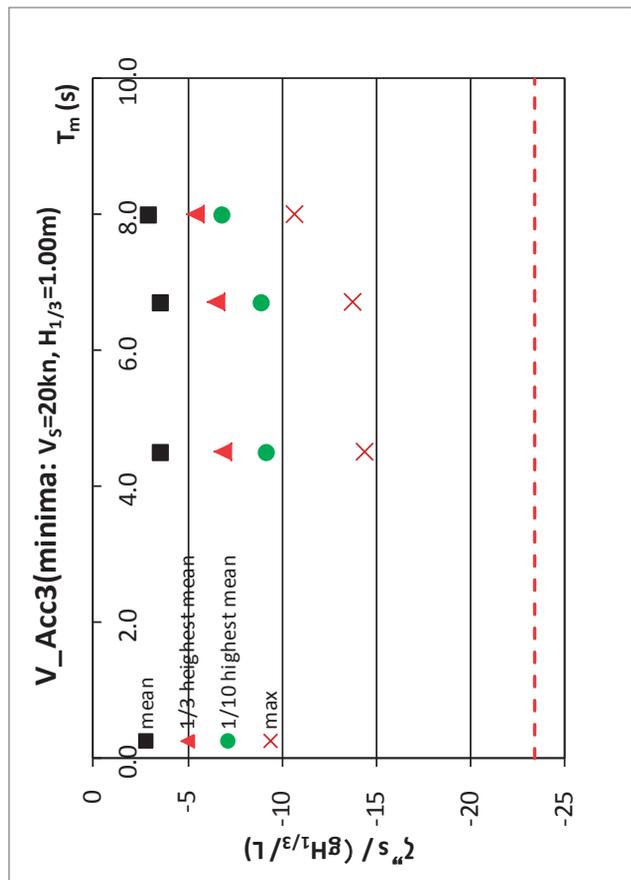
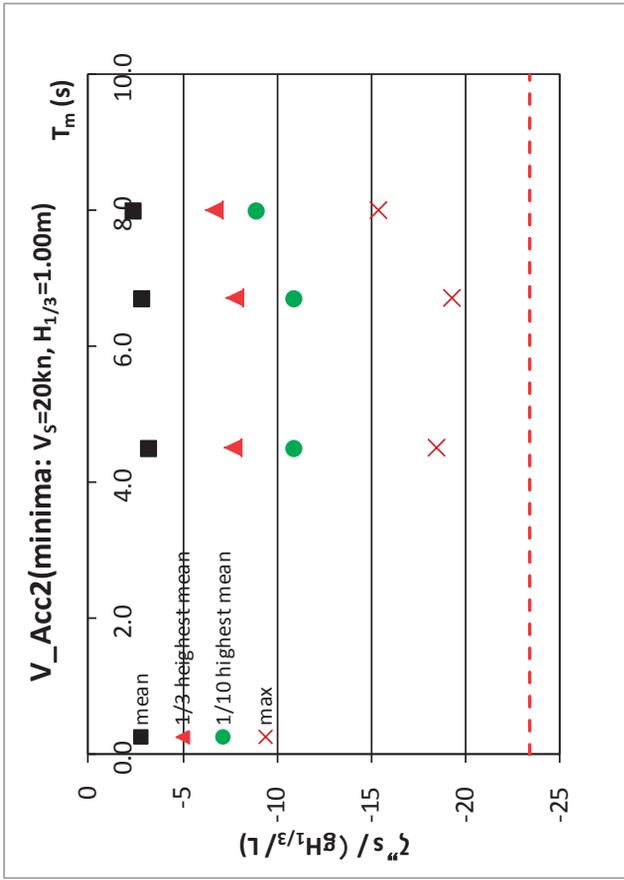


図 4.1-5-(2) 船体運動及び客室内上下加速度に及ぼす平均波周期の影響 ($H_{1/3}=1.00\text{m}, V_s=20\text{kn}$) (つづき)

③波周期の影響

船速 $V_s=20\text{kn}$ 、有義波高 $H_{1/3}=1.00\text{m}$ で平均波周期 T_m を 4.5 秒、6.7 秒、8.0 秒の 3 ケース変化させて計測した結果をまとめて図 4.1-5 に示す。計測した範囲では、平均波周期が一番長い 8.0 秒では他の波周期での計測値に比べて上下加速度は小さくなるが、波周期が事故時の 6.7 秒であっても、より短い 4.5 秒であっても上下加速度の大きさに顕著な差異は見られない。

(iii) 船長方向の位置と上下加速度の関係

事故発生時の有義波高 $H_{1/3}=1.91\text{m}$ 、波周期 $T_m=6.7\text{s}$ 、船速 $V_s=15\text{kn}$ に対応する条件で計測した上下加速度（極小値片振幅、zero up cross 両振幅）と船長方向の位置の関係を図 4.1-6 に示す。上下加速度極小値の片振幅を示す上図には、 $-1G$ に対応する値を点線で示している。

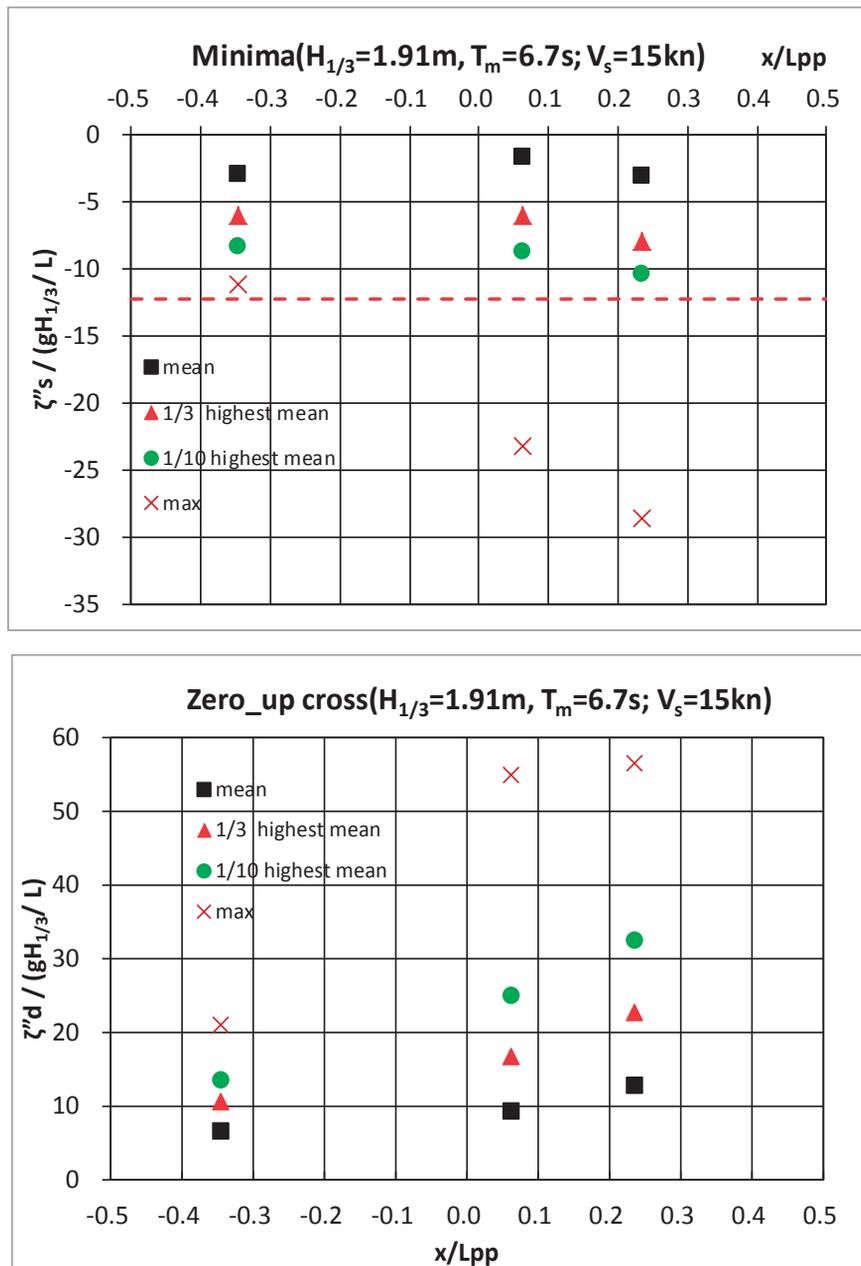


図 4.1-6 客室内上下加速度と計測位置の関係 ($H_{1/3}=1.91\text{m}$, $T_m=6.7\text{s}$; $V_s=15\text{kn}$)

図 4.1-6 から下向きの上下加速度の大きさに対応する極小値片振幅の最大値を除く有義値等（上図）は、船の長手方向の位置によって大幅に変化しないことが分かる。特に船体中央付近（前部客室 6 列目）と船尾付近（後部客室 4 列目）では、顕著な差異は見られない。但し、前部客室 1 列目では、船体中央に比べて下向きの上下加速度が大きくなっている。

一方、下向きの加速度と引き続く上向きの加速度の極値間の大きさに対応する zero up cross 両振幅の値（下図）は、船の長手方向の位置によって比較的大きく変化しており、船首に近い位置ほど zero up cross の上下加速度は大きくなる。

なお、上下加速度極大値（上向き加速度）の片振幅も含めた全ての計測条件での計測結果をまとめて付録 1 4 に示す。

4.1.3 船首上下加速度の推定

本船の事故に関する運輸安全委員会の報告書¹⁾では、事故防止策として①比較的船体動揺の少ない後方座席への旅客の誘導、②シートベルトの適切な着用等に係る旅客への情報提供及びシートベルトの適切な着用の確保、③波浪に対する速力調整等が指摘されている。これらの対策を取る目安となるは、波浪中航行時に発生する上下加速度の大きさであり、③の速力調整は与えられた波浪条件下で発生する上下加速度が安全性を確保できる範囲内となる速力（安全運航限界）を基に検討される。

一般に、上下加速度を含め波浪中の船体応答は、船型・载荷状態、運航条件（船速、波との出会う角）、環境条件（波高、波周期）で大きく変化する。大隈²⁾及び木原³⁾は、耐航性能を考慮した設計のための参考資料として、実船の波浪中航走試験結果（大隅）や線形理論に基づく計算結果（木原）を基に、船首上下加速度の有義値と波長船長（喫水線長）比あるいは船長（喫水線長）とを関連付けた図を公表している。

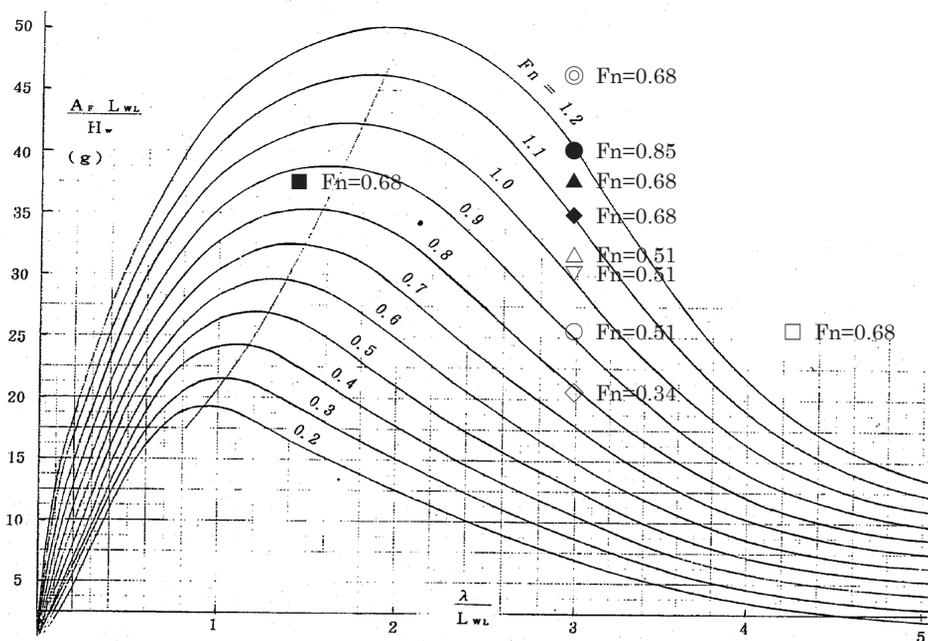


図 4.1-7 船首上下加速度の推定値（大隅の図²⁾との比較）

ここでは、図 4.1-6 及び付録 1 4 に示した船長方向の位置と上下加速度の関係から喫水線長の前端位置の上下加速度（船首上下加速度）を推定して大隈の図（図 4.1-7）及び木原の図（図 4.1-8、

図 4.1-9) と比較し、これらの図が、今回の調査研究の対象となっている第三あんえい号を含めた小型高速旅客船での安全運航限界設定のために援用できるか検討を加えた。なお、木原の図と今回の計測では平均波周期が異なるが、図 4.1-5 に示したように波周期が 6.7 秒の計測値と 4.5 秒の計測値では大きな差異がみられなかったため、図 4.1-8、図 4.1-9 では波周期 6.7 秒の計測結果をそのまま比較している。

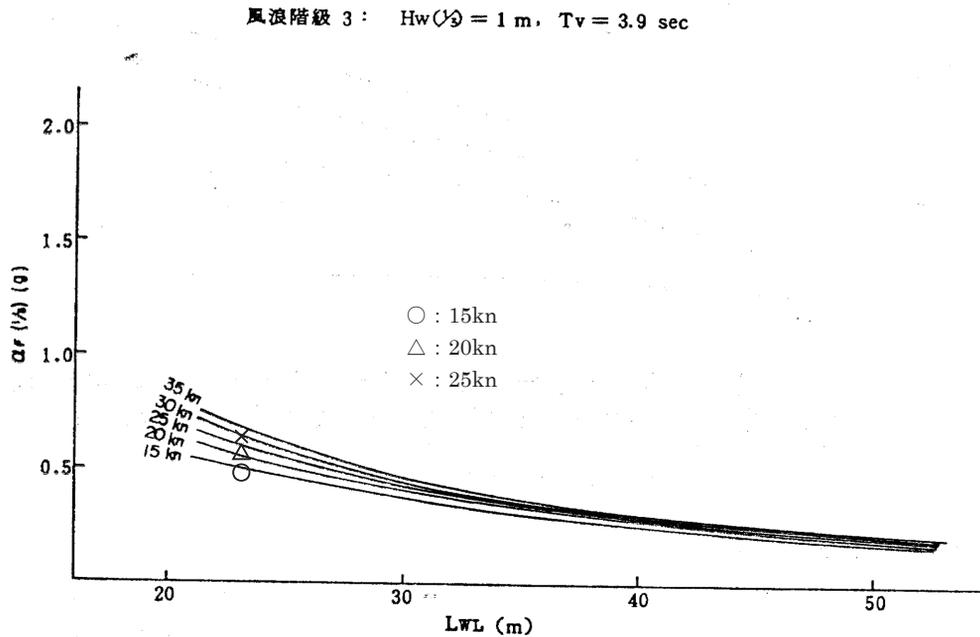


図 4.1-8 船首上下加速度の推定値 (木原の図³⁾との比較 : 風浪階級 3)

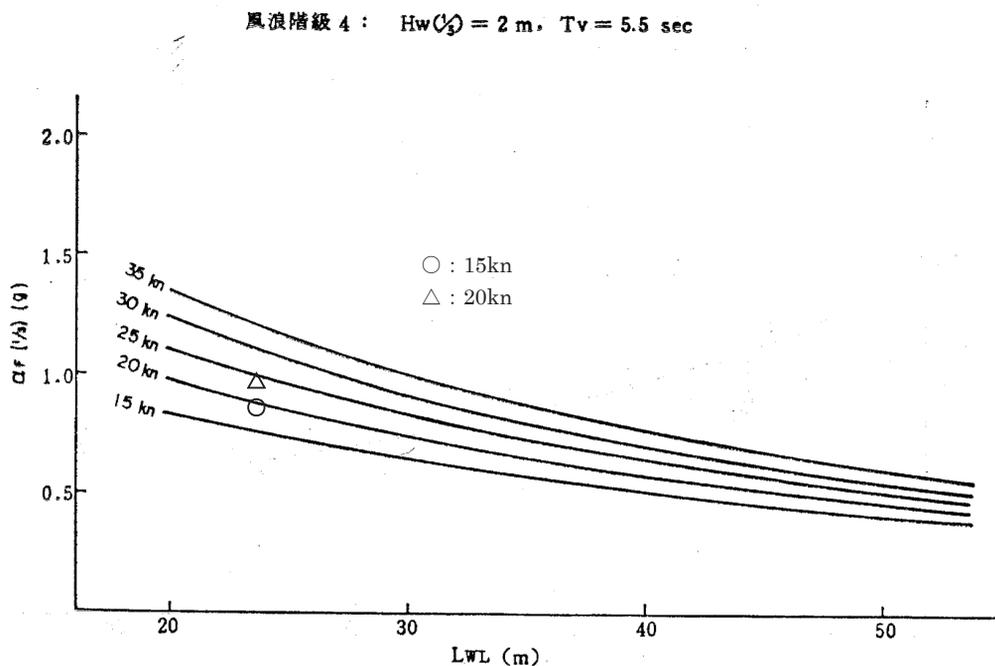


図 4.1-9 船首上下加速度の推定値 (木原の図³⁾との比較 : 風浪階級 4)

図 4.1-7 から、今回の計測結果から推定した船首上下加速度は、大隅が示した上下加速度の値より大幅に大きくなり、第三あんえい号の船首上下加速度を大隅の図から推定することは困難であ

ると考えられる。

一方、図 4.1-8 及び図 4.1-9 から今回の計測結果から推定した船首上下加速度は、木原の図に示された上下加速度に近い値を示しており、第三あんえい号の波浪に対する速力調整等に木原が示した図が活用できる可能性があると考えられる。

4. 1. 4 まとめ

旅客負傷事故の発生時の上下加速度を把握すること等を目的に、事故発生時の海象に対応する不規則波中等で事故船（第三あんえい号）の模型を曳航して縦運動及び上下加速度を計測した。

その結果得られた主な知見は、以下のとおりである。

- 1) 事故発生時の推定値である、実船スケールで有義波高 $H_{1/3}=1.91\text{m}$ 、波周期 $T_m=6.7\text{s}$ 、船速 $V_S=15\text{kn}$ に対応する値で計測を行ったところ、船首上げ 15 度を超える縦揺が発生した後、船首下げに移行する状況で、前部客室 1 列目に対応する位置に設置した加速度計で 1G を超す下向き加速度が計測され、本船の事故に関する運輸安全委員会の報告書に記載された、事故の際に乗船していた乗客の説明に近い状態が発生することが確認された。
- 2) 実船スケールで有義波高 $H_{1/3}=1.50\text{m}$ 、平均波周期 $T_m=6.7\text{s}$ で、船速 V_S を 10kn, 15kn, 20kn の 3 ケース変化させて計測した結果から、計測した範囲では、上下加速度は船速の増加と共に、客室内のいずれの位置でも大きくなり、特に、前部客室 1 列目では、船速が 15kn, 20kn で下向きの最大加速度が 1G を超える場合もあることが明らかになった。そのため、同様の事故を防止するためには、減速することが重要であることが確認された。
- 3) 実船スケールで船速 $V_S=15\text{kn}$ 、平均波周期 $T_m=6.7\text{s}$ で有義波高 $H_{1/3}$ を 1.00m, 1.50m, 1.91m の 3 ケース変化させて計測した結果から、計測した範囲では、波高が高くなるに従い、縦揺は大きくなり、それに伴い、上下加速度も大きくなること、特に、前部客室 1 列目では、事故に結びつく下向きの加速度が波高の増加とともに急激に 1G に近くなることが明らかになった。そのため、同様の事故を防止するためには、大きな波を受けないような操船が重要であることが確認された。
- 4) 実船スケールで船速 $V_S=20\text{kn}$ 、有義波高 $H_{1/3}=1.00\text{m}$ で平均波周期 T_m を 4.5 秒、6.7 秒、8.0 秒の 3 ケース変化させて計測した結果から、計測した範囲では、平均波周期が一番長い 8.0 秒では他の波周期での計測値に比べて上下加速度は小さくなるが、波周期が事故時の 6.7 秒であっても、より短い 4.5 秒であっても上下加速度の大きさに顕著な差異は見られないことが明らかになった。
- 5) 今回の計測結果から推定した船首上下加速度（喫水線長前端位置）は、大隅が示した上下加速度の値より大幅に大きくなり、第三あんえい号の船首上下加速度を大隅の図から推定することは困難であると考えられる。一方、今回の計測結果から推定した船首上下加速度は、木原の示した上下加速度に近い値を示しており、第三あんえい号の波浪に対する速力調整等に木原が示した図が活用できる可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 運輸安全委員会：2 旅客船第三あんえい号旅客負傷事故、船舶事故調査報告書 MA2013-3、平成 25 年 3 月

- 2) 大隅三彦：続・中速艇の一設計法（1）、船の科学第 45 巻第 12 号、pp.35-43、平成 4 年 12 月
- 3) 木原和之：耐航性を考慮した高速艇の設計法に関する研究（その 1）、西部造船会会報第 71 号、pp.107-116、昭和 61 年 3 月

4. 2 大阪府立大学における水槽実験

4. 2. 1 目的

設計段階において、船舶の船上上下加速度と船速および海象との関係を知ることは、耐航性能向上を目指した船型開発および船体設計にとって重要である。また、運航管理において事故を未然に防ぐためには、例えば統計的手法に基づく過度な加速度の発生を予測することが必要となる。

本研究では、模型船を用いた水槽試験により、高速艇の向波中航走時の船上上下加速度を計測し、その特性を明らかにするとともに、実験データに基づいた船上加速度の簡易推定法を構築することを目的とする。

まず、定常速度曳航試験により、向波航走時の船上上下加速度を精度よく計測するための計測および解析方法を検討した。次に、一つの船型を対象に規則波向波中航走時の船上上下加速度計測を行い、船上上下加速度と船速、波高および波周期との関係について調査した。さらに、前述の同船型を含む異なる 3 船型を対象に、不規則波向波中航走時の船上上下加速度計測を行い、船上上下加速度と船速、有義波高および有義波周期との関係、船型がこれらの関係に与える影響を調査するとともに、船上上下加速度の統計的性質についても調査した。最後に、前述の調査結果を踏まえ、主要な船型パラメータを入力とした実験データに基づく船上上下加速度簡易推定法について検討した。

4. 2. 2 船上上下加速度の計測方法

4. 2. 2. 1 供試模型

供試船は 0.043 (1/23.4) スケールモデルである。供試模型の写真、正面線図および主要目を Fig.1, Fig.2, Table 1 に示す。実験時の載貨状態は、満載出港状態とした。供試船は平均的な船型に比べて喫水が浅く、デッドライズ角が小さい特徴がある。



Fig 4-2-1 Picture of the model (Ship A).

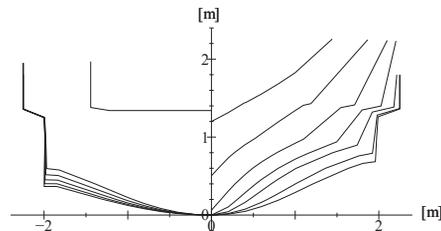


Fig.4-2-2 Body plan of the model (ShipA).

Table 4-2-1 Principal particulars and loading condition in the experiments of the model (Ship A).

	Real scale	Model scale
Length overall: L_{oa} [m]	25.55	1.08
Length between perpendiculars: L_{pp} [m]	23.4	1.0
Breadth: B [m]	4.5	0.19
Depth: D [m]	1.45	0.09
Deadrise angle at S.S. 5.0 [deg]	18	
Displacement: W [tonf]	36.762	0.002869
Draft: d [m]	0.76	0.0325
Initial trim angle: τ_0 [deg]	0.247	
Longitudinal position of the center of gravity: L_{CG} [S.S. Number]	4.17	
Pitch natural period: T_p [sec]	—	0.617
Longitudinal metacentric height: GM_L [m]	72.46	3.09677
Pitch radius of gyration: κ_p/L_{pp}	—	0.290

4. 2. 2. 2 実験および解析方法

模型船の上下揺れと縦揺れを自由として一定速度で水平に曳航し、この時の上下揺れ（上向き+）、縦揺れ（船首上げ+）、上下加速度（上向き+）及び抵抗の計測を行った。また、船体 S.S. 5.0 より前方 0.52 m の曳引台車上にサーボ式波高計を設置し、波高（上向き+）の計測を行った。Fig.4-2-3 に実験状態の写真を示す。なお、各計測項目ともに平水中静止状態を零点とした。

Fig.4-2-5 に実験の概要図を示すとともに、Fig.4-2-4 に模型船に取り付けた運動計測装置と加速度センサーの写真を示す。Fig.4-2-4 左図の運動計測装置は、Fig.4-2-5 に示すように縦揺れの回転位置が模型船の S.S. 5.0 (BL から 0.054 m の高さ) と一致するように取り付けた。一方、Fig.4-2-4 右図の加速度センサーは、Fig.4-2-5 に示すように上向き加速度を正として BL に垂直方向の成分（船上上下加速度）を計測する。また、加速度センサーは船首部(S.S.10.39)、船体中央部(S.S. 5.0)、船尾部(S.S. -0.06)の 3 ヶ所に取り付けた。

模型試験でのサンプリング周波数 f_s は、次式で求めた。

$$f_s \geq \frac{n_s}{\Delta t_s} \sqrt{s} \quad (4-2-1)$$

ここで、 s は模型の縮尺分母、 Δt_s [sec] は計測対象とする波形の実スケールでの最小時間幅、 n は一波形内の計測点数である。本研究で対象とする上下加速度の最小時間幅は参考文献⁵⁾⁷⁾より実艇で 120 msec 程度であり、 $n=4\sim 5$ と考えた結果 200Hz とした。

また、不規則波中での実験では、計測値が統計的に有意な値となるよう、出会い波の数を 200 波以上⁸⁾とし、1 回の計測ごとに不規則波造波時の周波数成分の位相差をランダムに変化させた（後に詳述する）。

Fig.6 に、不規則波中船首部での加速度計測結果の一例を示す。今回の計測では、すべてのデータで、同図 0.7 sec 付近で見られる突出した波形（実艇換算で $\Delta t_s = 218 \text{ msec} > 120 \text{ msec}$ ）がみられた。これは船首部が水面に突入する際に発生するものであり、このような加速度の波形から最大値（極大値）を得ることを考える。

加速度の解析は、下向きの加速度（負）の極値から上向きの加速度（正）の極値までを半周期と考えてゼロダウクロスで行い、両振幅（加速度両振幅）、極大値（上向き加速度振幅）、極小値（下向き加速度振幅）を求める。上向き加速度振幅および下向き加速度振幅の $1/n$ 最大平均値を求めるときには、加速度両振幅を基準に $1/n$ 最大振幅を決定し、これらに対応する極大値と極小値を用いた。なお、図中黒線で示す計測データは計測点ごとに振動する雑音およびゼロ点付近での揺らぎがみられるため、極値の算出には 2 点移動平均で平滑化したデータ（上図の赤線）、一周期を決めるゼロクロス点の算出には 10 点移動平均で平滑化したデータ（下図の赤線）を用いた。



Fig.4-2-3 Pictures of experiment.



Fig.4-2-4 Pictures of motion measuring device and acceleration center (KYOWA ASW-20A).

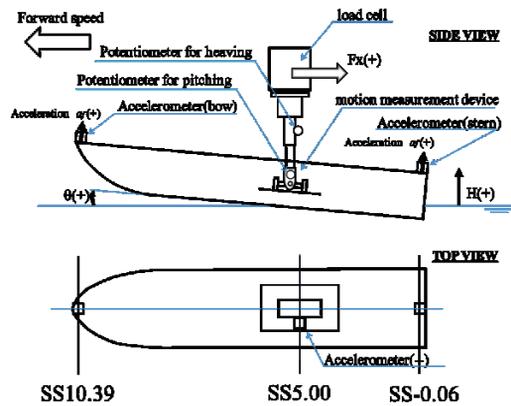


Fig.4-2-5 Schematic view of the experiment to measure vertical acceleration on hull.

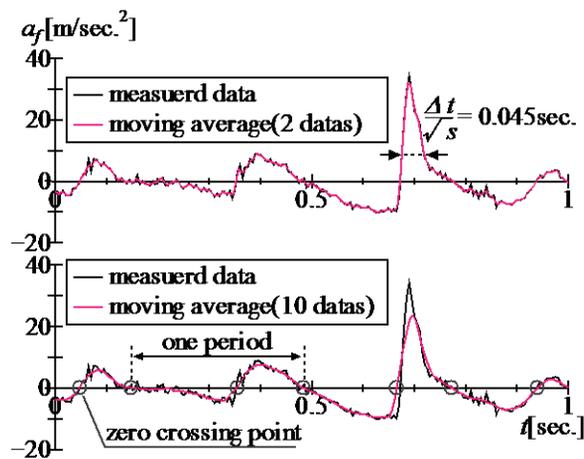


Fig.4-2-6 Time histories of measured acceleration at S.S. 10.39 (a_f) in irregular wave. ((Sea state 3: $Hw_{(1/3)}=0.043$ m, $T_1=0.80$ sec, $F_n=0.85$, ShipA).

4. 2. 2. 3 船上上下加速度の船長方向分布の算出

ある船長方向位置 X 点での船上上下加速度の瞬時値 a_X は、任意位置での上下揺れおよび縦揺れを用いて Eq.4-2-2 で表される。

$$a_X = \ddot{z} \cos \theta + l_X \ddot{\theta} + (1 - \cos \theta)g \quad (4-2-2)$$

ここで、 z と θ は上下揺れ（上向き+）と縦揺れ（船首上げ+）の時系列データ、 l_X は運動計測位置から加速度算出位置までの距離（前方+）、 g は重力加速度（下向き+）である。なお、上下揺れと縦揺れの加速度は運動の時系列データを差分して求める。

Eq.4-2-2 を用いて、船長方向任意の a, f 点での加速度計測データ a_A, a_F は、船長方向任意位置 O 点での上下揺れと縦揺れを用いて次式で表せる。

$$a_A = \ddot{z} \cos \theta + l_A \ddot{\theta} + (1 - \cos \theta)g \quad (4-2-3)$$

$$a_F = \ddot{z} \cos \theta + l_F \ddot{\theta} + (1 - \cos \theta)g \quad (4-2-4)$$

ここで、 l_F と l_A は O 点から F, A 点までの距離（前方+）である。

Eq.4-2-3, Eq.4-2-4 を用いて Eq.4-2-2 中の上下揺れと縦揺れを消去すると、ある船長方向位置 X 点での船上上下加速度 a_X は、 A, F 点での加速度時系列データ a_A, a_F を用いて、Eq.4-2-5 で表される。

$$a_X = a_F + (l_X - l_F) \frac{a_F - a_A}{l_F - l_A} \quad (4-2-5)$$

ここで、 $l_X - l_F$ は F 点から X 点までの距離（前方+） $l_F - l_A$ は A 点から F 点までの距離（前方+）である。

Fig.4-2-7 に、本研究で船首部と船尾部で加速度センサーによって計測した結果を用いて、Eq.4-2-5 により中央部の加速度を計算した結果と、中央部での加速度センサーによる計測結果の比較を示す。両者は一致することが確認できる。したがって、本研究では、船首部と船尾部の加速度センサーでの計測結果を用いて Eq.4-2-5 により、船上上下加速度船長方向分布を算出することとした。

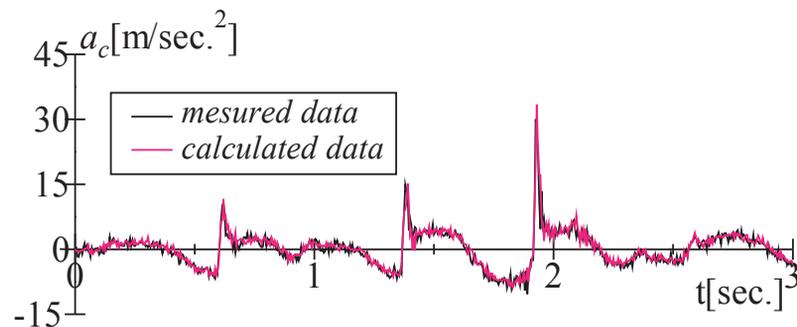


Fig.4-2-7 Comparison of vertical accelerations on hull at S.S. 5.0 (a_c) in irregular waves. Measured result by acceleration censer at S.S. 5.0 and calculated result obtained by using measured results by acceleration censers at S.S. 10.39 and S.S. -0.06. (Sea state 4, $Fn=0.51$, Ship A).

4. 2. 3 規則波中における船上上下加速度の計測

4. 2. 3. 1 実験状態

船上上下加速度の基本的な特性を調べるために、まず規則波中での実験を行った。模型船の曳航速度および規則入射波の周期および波高を Table 4-2-2 に示す。曳航速度は、実艇の 15~30 knot に相当するフルード数 F_n である。また、入射波の波周期を $T_w=0.8\sim 1.4$ sec (3.87 ~6.77 sec in real scale) とし、それぞれの波周期に対して波高を $H_w=10\sim 60$ mm (0.234~1.4m in real scale) の範囲で系統的に変化させた。

Table 4-2-2 Conditions of motion measurement in regular waves (Ship A).

F_n	0.51, 0.68, 0.85, 1.02
Ship speed [knot]	15, 20, 25, 30
Model speed [m/sec]	1.594, 2.125, 2.660, 3.188
Wave period : T_w [sec]	0.8, 1.0, 1.2, 1.4 (model scale)
Wave height : H_w [mm]	10, 20, 30, 40, 50, 60 (model scale)

4. 2. 3. 2 加速度振幅の波高に対する非線形性

Fig.4-2-8 に、波周期 $T_w=1.2$ sec 前進速度 $Fn=0.68$ での船首部船上上下加速度（上向き+）を示す。また同図には異なる波高での結果を示している。同図より、波高が最も低い $H_w=20$ mm では正弦的な波形を示しているが、波高が高くなると上向きの加速度に図中○で示すような突出した加速度（以降、衝撃加速度と呼ぶ）がみられる。これは、船体が波の山から谷へ向かって運動するときに、船首部船底が波斜面に衝突（突入）することで、船首下げを妨げる突然大きな船首上げの力が働き、このような加速度が生じたと考えられる。同図のように、上向き加速度振幅（極大値）と下向き加速度振幅（極小値）が必ずしも等しくならないので、それぞれを分けて解析することとした。

Fig.4-2-9 に、入射波周期が一定のもと、波高が変化した時の船首部での上向き加速度振幅の無次元値の変化の一例を示す。同図から、入射波周期が一定であれば船速にかかわらず、ある波高以上では波高の増加に従い上向き加速度振幅の無次元値が増加する傾向がみられる。また、上向き上下加速度振幅の無次元値が増加し始める波高は、前進速度が速く（波との出会い周期短く）なると低くなることがわかる。

Fig.4-2-10 に、入射波周期が一定のもと、波高が変化した時の船首部での下向き加速度振幅の無次元値の変化の一例を示す。同図から、波高が高くなると下向き加速度振幅の無次元値は減少する傾向があり、波長が長くなるまたは船速が速くなるとその傾向は顕著になる。

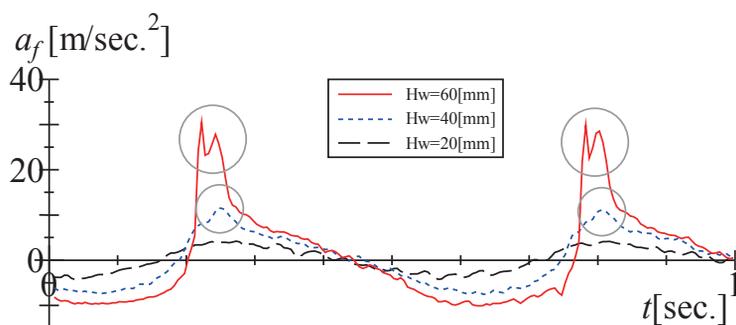


Fig.4-2-8 Time histories of measured acceleration at S.S. 10.39 (; a_f) in regular wave ($T_w=1.2$ sec, $Fn=0.68$)(ShipA).

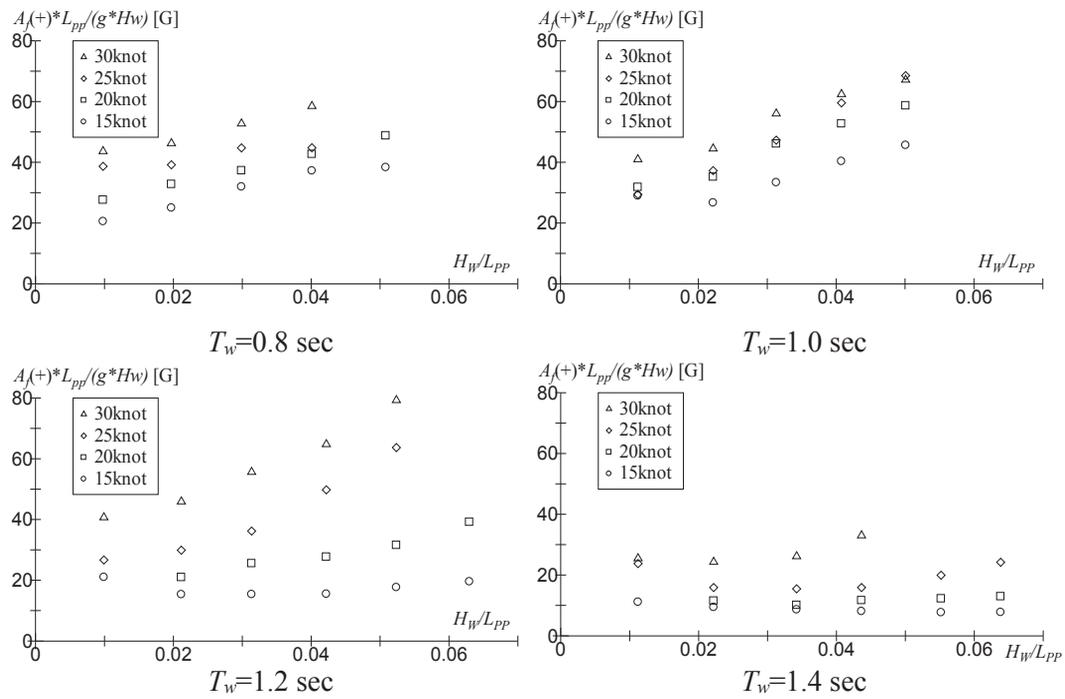


Fig.4-2-9 Measured upward peak value of vertical acceleration on hull for wave heights at S.S. 10.39 ($T_w=0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ sec) (Ship A).

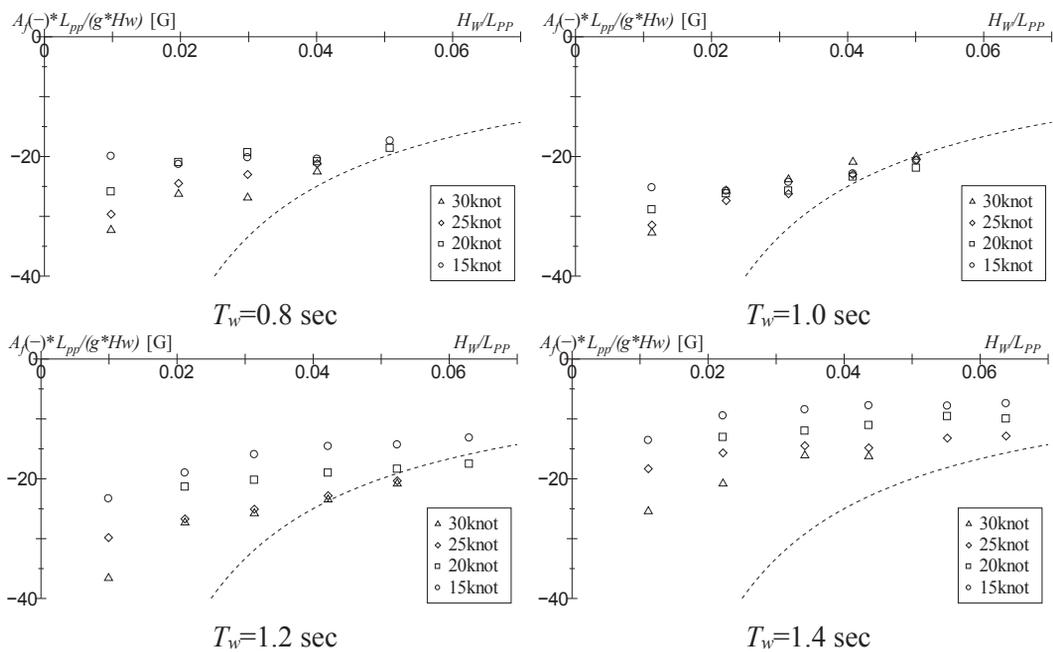


Fig.4-2-10 Measured downward peak value of vertical acceleration on hull for wave heights at S.S.10.39 ($T_w=0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ sec) (Ship A).

4. 2. 3. 3 上向き加速度振幅の特性

Fig.4-2-9 に見られる上向き加速度振幅の無次元値の増加は、波高がある値以上に高くなると Fig.4-2-8 に示すような上向きの衝撃加速度が生じるためだと考えた。そこで、計測した加速度の時系列データを、衝撃加速度が発生したもの（●）および発生しなかったもの（□）にわけて、これらを実験状態（横軸に出会い波周期 T_e 、縦軸に波高の無次元値 $H_w/L_{pp} = \hat{H}_w$ ）で Fig.4-2-11 のように整理した。同図から出会い波周期が短いと低い波高で衝撃加速度が生じることがわかる。これは、出会い周期が短いと、船体運動が波面に追従できず、船首部が波斜面に衝突するためだと考えられる。さらに、同図から両者の境界が明らかとなるとともに、概ねこの境界線が原点を通り出会い周期の二乗に比例する関数で表現できることがわかった。なお、同図では各係数を最小二乗法により決定し、Eq.4-2-6 で表すこととした。

$$\hat{H}_{w_{Linear}} = \frac{H_w}{L_{pp}} = 0.1007 T_e^2 \quad (4-2-6)$$

ただし、模型スケールである。

Eq.4-2-6 を用いて、Fig.4-2-9 を整理しなおした結果を Fig.4-2-12 に示す。横軸は Fig.4-2-9 の波高の無次元値 H_w/L_{pp} を、出会い波周期 T_e ごとに Eq.4-2-6 で得られる $\hat{H}_{w_{Linear}}$ で割った値、縦軸は Fig.4-2-9 の上向き加速度振幅 $A_f(+)$ の無次元値 $\hat{A}_f(+)$ を、同図の前進速度ごとに Eq.4-2-6 で得られる出会い波周期より短い領域での $A_{f(+)}_{Linear}$ の無次元値の平均値 (Fig.4-2-14 上図参照) $\hat{A}_{f(+)}_{Linear}$ で割った値である。Fig.4-2-12 のように整理すると、上向き加速度振幅の無次元値は、横軸の値が 1.0 から直線的に増加することがわかる。また、入射波周期が一定のもと船速が速く（波との出会い周期が短く）なると、その傾きは小さくなる傾向がある。

Fig.4-2-13 に、Fig.4-2-12 から得られる出会い波周期 T_e ごとの直線の傾きを示す。同図から、上向き加速度振幅の無次元値の波高の無次元値の増加に対する傾きは次式のように出会い波周期に比例する。

$$\frac{\hat{A}_f(+)}{\hat{A}_{f(+)}_{Linear}} \div \frac{\hat{H}_w}{\hat{H}_{w_{Linear}}} = 3.0345 T_e - 0.7109 \Leftrightarrow \frac{\hat{A}_f(+)}{\hat{A}_{f(+)}_{Linear}} = \frac{\hat{H}_w}{\hat{H}_{w_{Linear}}} (3.0345 T_e - 0.7109) \quad (4-2-7)$$

ただし、模型スケールである。

4. 2. 3. 4 下向き加速度振幅の特性

Fig.4-2-10 に見られる下向き加速度振幅の無次元値の減少は、船体が自由落下を始めることに起因すると考えた。そこで、同図に下向き加速度が 1.0 G（自由落下）となる線を破線で表した。同図から、計測結果は波高が高くなるまたは前進速度が速くなることで破線付近に収束し、自由落下に近い状態 1.0 G をはるかに超える加速度は発生しないことがわかる。加速度振幅が大きくなり 1.0 G を超える状態では、船体の後半のみが水につかっており、その結果波浪強制力は小さくなく、1.0 G を大きく上回る下向き加速度振幅は発生しないと考えられる。

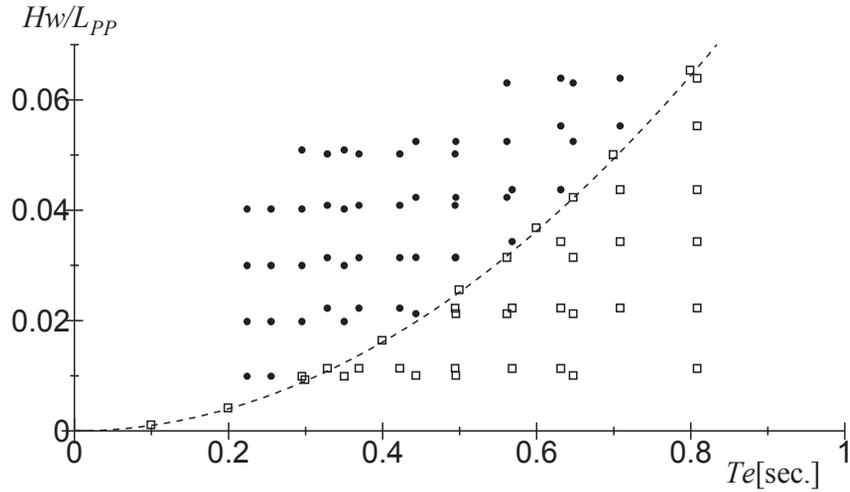


Fig.4-2-11 The encounter period Te and the wave height H_w where impact acceleration is observed on time-history of the measured results in model scale. (●: impact acceleration is observed) (ShipA)

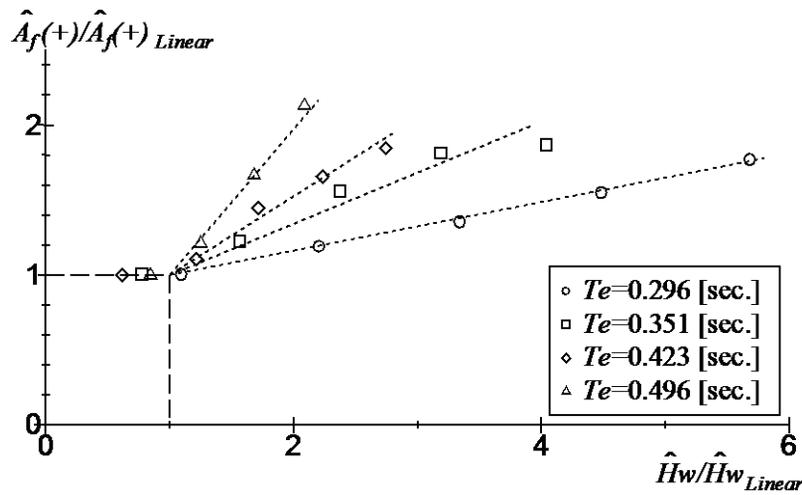


Fig.4-2-12 Relation between non-dimensional vertical acceleration on hull of upward peak value and non-dimensional wave heights at S.S.10.39. $H_{wLinear}$ is obtained by Eq.4-2-6. (Ship A)

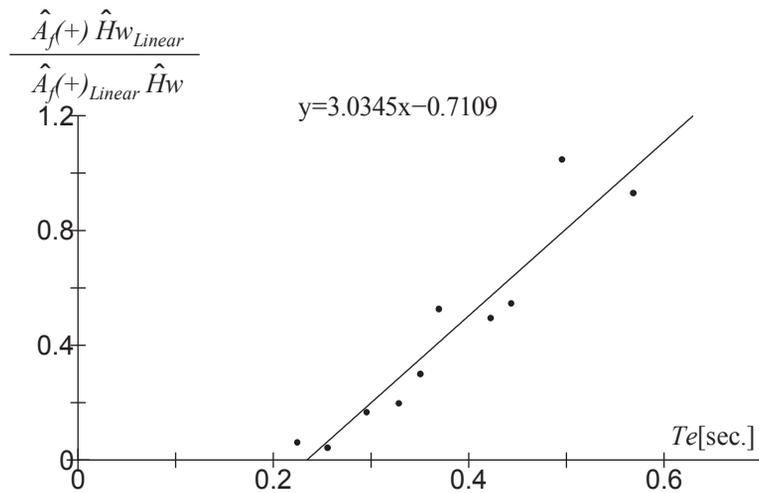


Fig.4-2-13 Relation between the slope of the lines on Fig.4-2-12 vs encounter periods in model scale. (Ship A)

4. 2. 3. 4 下向き加速度振幅と上向き加速度振幅の関係

Fig.4-2-14 に、下向き加速度振幅の無次元値 $\hat{A}_f(-)$ および衝撃加速度が見られない波高での上向き加速度振幅の無次元値 $\hat{A}_f(+)$ を示す。同図から、船上上下加速度はその向きに関係なく、波長船長比に対して一定値でなく周波数特性をもつが、前進速度が速いほど大きくなる。また、下向きの加速度振幅に比べて上向きの加速度振幅の方が大きい。

Fig.4-2-15 に、下向き速度振幅の無次元値 $\hat{A}_f(+)$ と上向き船上上下加速度振幅の無次元値 $\hat{A}_f(-)$ の比を、前進速度ごとに分けて示す。横軸は下向き加速度振幅、縦軸は上向き加速度振幅であり、各図には波周期および波高が異なる結果を示している。同図から、前進速度が同じ場合、直線状に分布し下向きと上向きの加速度振幅の比はほぼ同じである結果となった。

Fig.4-2-15 から最小二乗法により原点を通る直線の傾き ($\hat{A}_f(+)/\hat{A}_f(-)$) を Fig.4-2-16 のように整理した。同図から、上向きと下向きの加速度振幅の比は前進速度の増加に伴い次式のように 2 次関数的に大きくなる結果となった。

$$\frac{\hat{A}_f(+)}{\hat{A}_f(-)} = 0.557Fn^2 - 0.079Fn + 1.000 \quad (4-2-8)$$

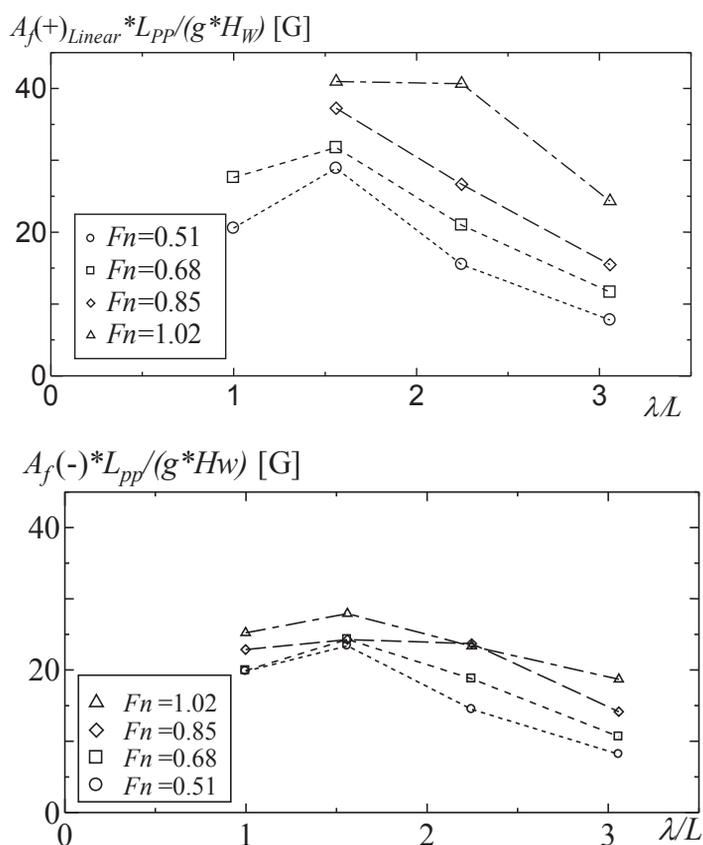


Fig.4-2-14 Measured peak value of downward vertical acceleration and upward vertical acceleration without impact acceleration on hull at S.S.10.39 in regular waves (Ship A).

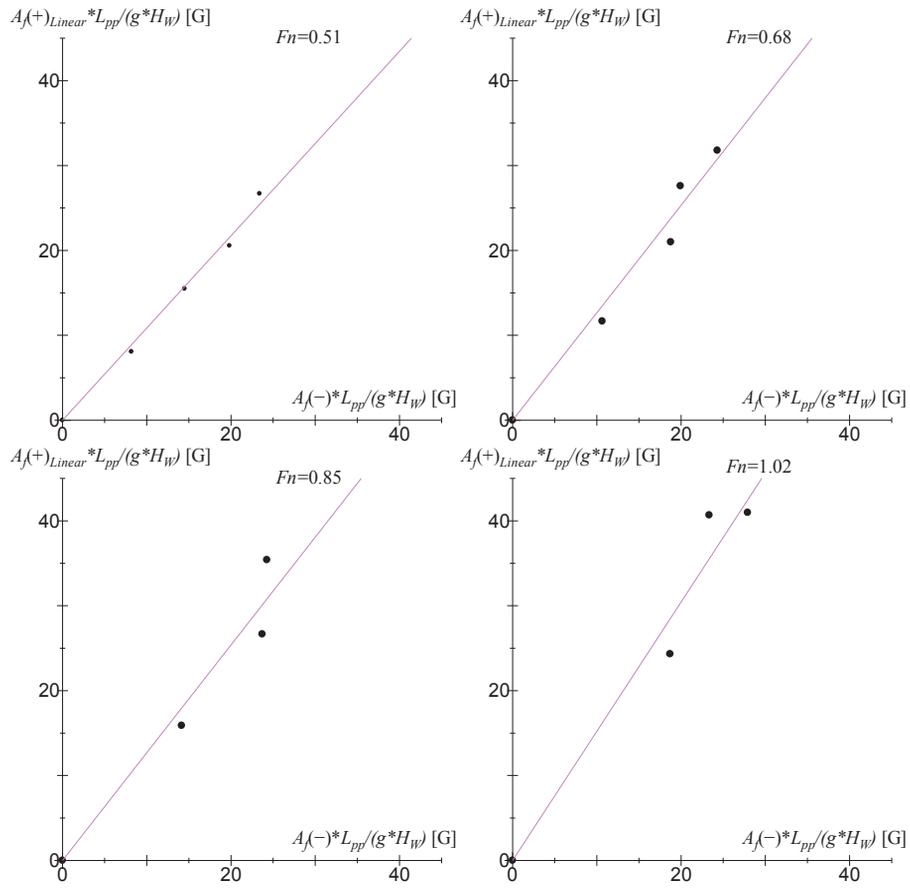


Fig.4-2-15 The ratio of $\hat{A}_f(+)_Linear$ to $\hat{A}_f(-)$ for a certain Fn , which is obtained from Fig.4-2-14.

(ShipA)

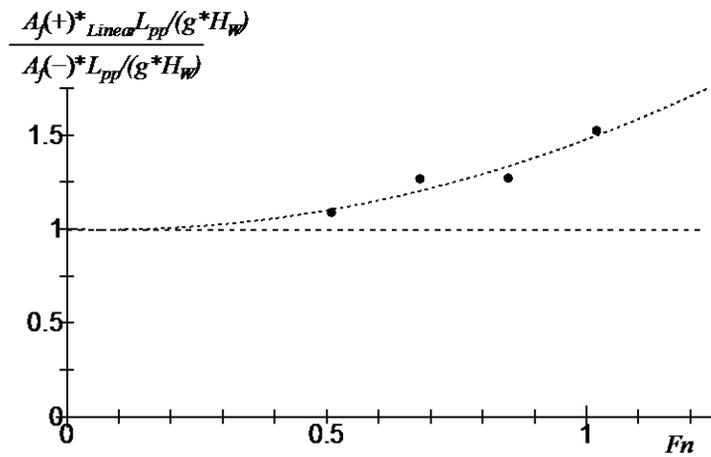


Fig.4-2-16 The relations between $\hat{A}_f(+)_Linear / \hat{A}_f(-)$ and Fn , which is obtained from Fig.4-2-15.

(ShipA)

4. 2. 3. 5 船上上下加速度の船長方向分布

Fig.4-2-17 に、船首部および船尾部での船上上下加速度計測データと Eq.4-2-5 を用いて、船上上下加速度振幅（加速度両振幅）の船長方向分布を求めた結果を示す。加速度両振幅の船長方向分布形状は、曲線となる結果が得られた。

上下揺れと縦揺れの加速度を Eq.4-2-9, Eq.4-2-10 で仮定して Eq.4-2-2 に代入することで、船上上下加速度船長方向分布の形状を Eq.4-2-11 で得ることができる。縦揺れ振幅 θ_a は小さいと仮定して高次の項を無視すると、上下揺れと縦揺れの間に位相差がある場合 Eq.4-2-11 の第 2 項が残るため、加速度振幅の船長分布形状は曲線となることがわかる。

$$\ddot{z} = -\omega_e^2 z_a \cos(\omega_e t) \quad (4-2-9)$$

$$\ddot{\theta} = -\omega_e^2 \theta_a \cos(\omega_e t - \varepsilon_{HP}) \quad (4-2-10)$$

$$\begin{aligned} a_x &= -\left[l_x \omega_e^2 \theta_a \cos \varepsilon_{HP} + \omega_e^2 z_a \left\{ 1 - \frac{1}{4} \theta_a^2 (1 + \cos 2\omega t) \right\} \right] \cos \omega_e t \\ &\quad - l_x \omega_e^2 \theta_a \sin \varepsilon_{HP} \sin \omega_e t + \frac{1}{4} \theta_a^2 (1 + \cos 2\omega t) g \\ &\cong -\left(l_x \omega_e^2 \theta_a \cos \varepsilon_{HP} + \omega_e^2 z_a \right) \cos \omega_e t - l_x \omega_e^2 \theta_a \sin \varepsilon_{HP} \sin \omega_e t \end{aligned} \quad (4-2-11)$$

Fig.4-2-19 に縦揺れの上下揺れに対する位相遅れを示す。同図より縦揺れと上下加速度の位相は、入射波長および船速で若干異なるもののおおよそ 90 度であり、加速度振幅の船長方向分布が曲線となることが確認できる。

高速艇の波浪中船上上下加速度は、水面突入時の波浪衝撃力の発生等による運動の非線形性から、必ずしも上向きと下向きの最大加速度が等しくならない。そこで、Fig.4-2-18 に、Fig.4-2-17 の加速度両振幅を、上向きの最大加速度（+：上向き加速度振幅）と下向きの最大加速度（-：下向き加速度振幅）に分けて示す。船首部での上向きと下向きの加速度振幅の大きさの割合は概ね 0.50~0.61 となった。

Fig.4-2-20 に、船長方向で加速度両振幅が最小となる位置を求めた結果を示す。加速度両振幅が最小となる前後位置は、前進速度および入射波周期（波長）によって異なり、前進速度が速くなるまたは波長が短くなると後方へ移動する傾向が観られる。この原因は、短い波長の中を高速で航走すると船体は波面に追従した運動ができなくなり、浸水部分が船体後方へと移動するとともに、縦揺れの回転中心が船体後方へ移動するためである。

Fig.4-2-21 に、加速度振幅の船長方向分布形状を見るために、Fig.4-2-18 の全てのケースについて、それぞれのケースの FP での加速度で割って無次元化したグラフを示す。この結果から加速度振幅の分布形状は、波長によって若干異なるが、次式で表すことができる。

$$\frac{A_{ss}}{A_{FP}} \text{ or } \frac{A_{ss}(+)}{A_{FP}(+)} \text{ or } \frac{A_{ss}(-)}{A_{FP}(-)} = \begin{cases} ss/10 & (5.0 < ss) \\ 0.5 & (ss < 5.0) \end{cases} \quad (4-2-12)$$

ここで、 ss は Square Station Number である。なお、Eq.4-2-12 の結果は実験結果に比べて、波長が短く速度の速い時に若干大きく、波長が長く船速が遅い時に若干小さくなる。

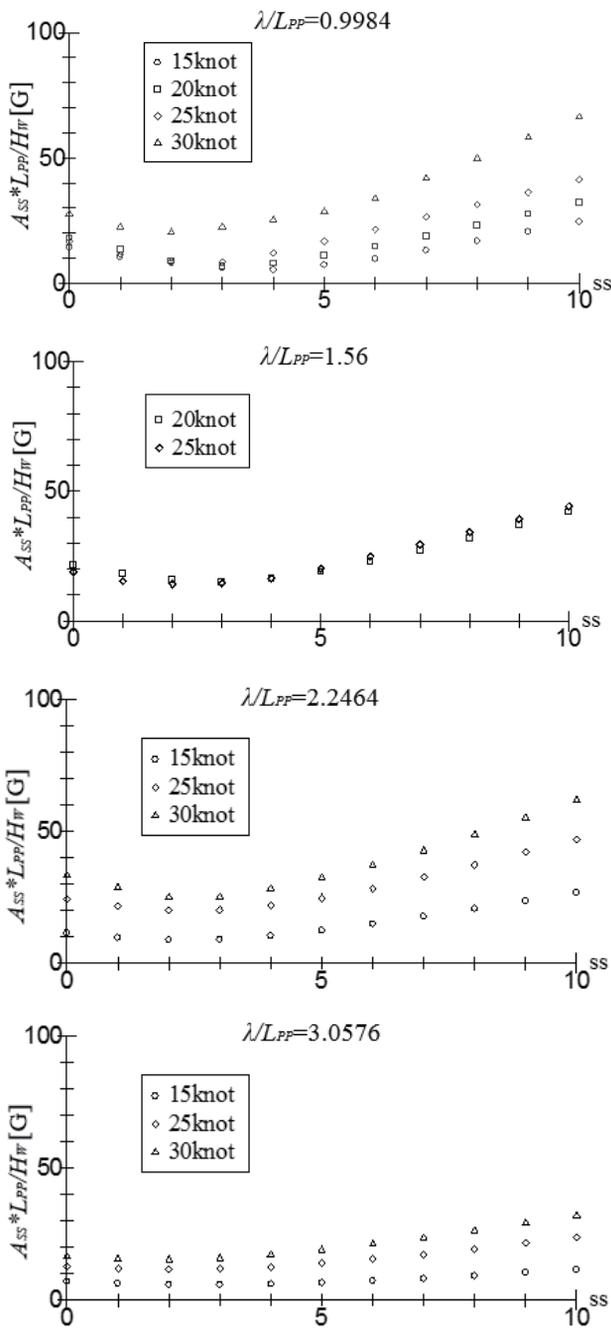


Fig.4-2-17 Longitudinal distribution of peak-to-peak amplitude of vertical acceleration on hull. (ShipA)

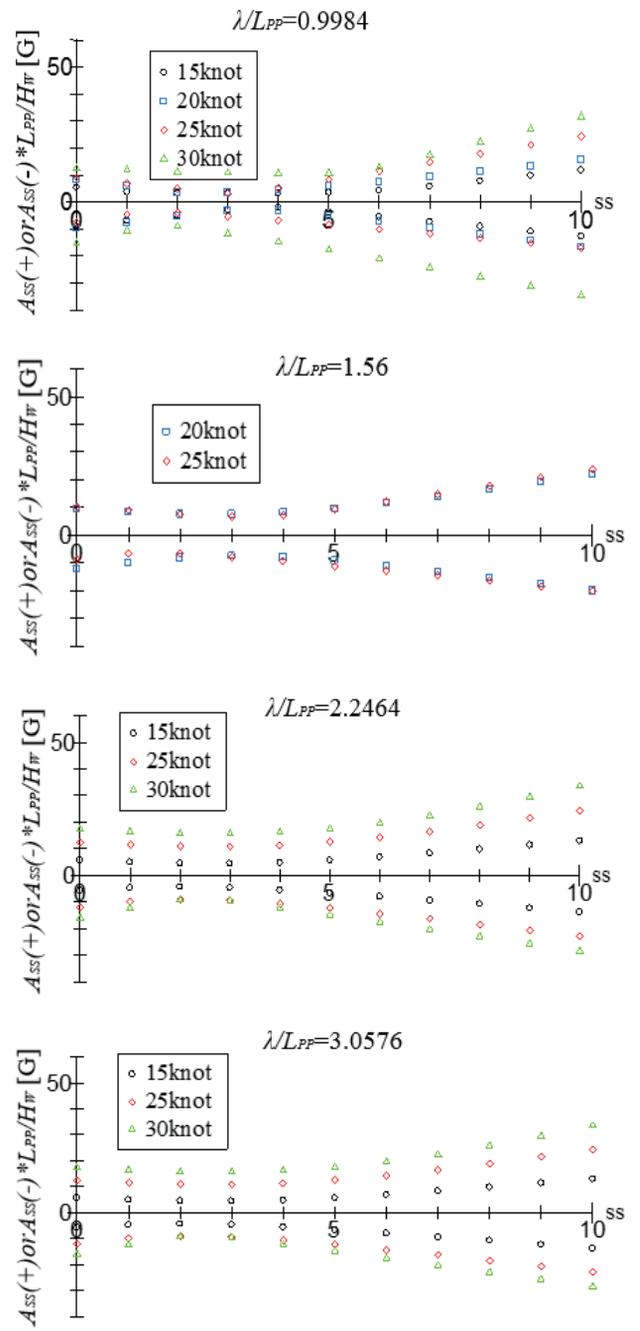


Fig.14-2-18 Longitudinal distribution of upward and downward peak value of vertical accelerations on hull. (ShipA)

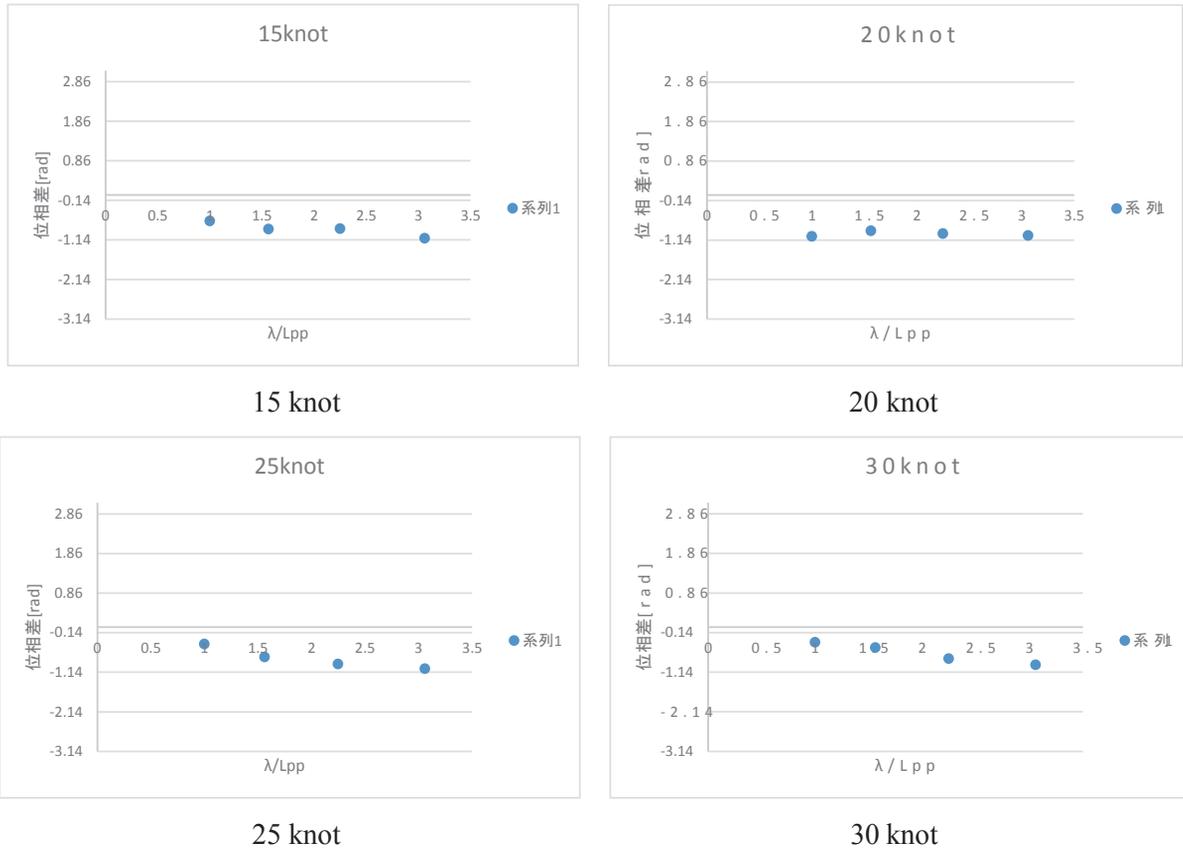


Fig.4-2-19 Phase delay of pitching to heaving.

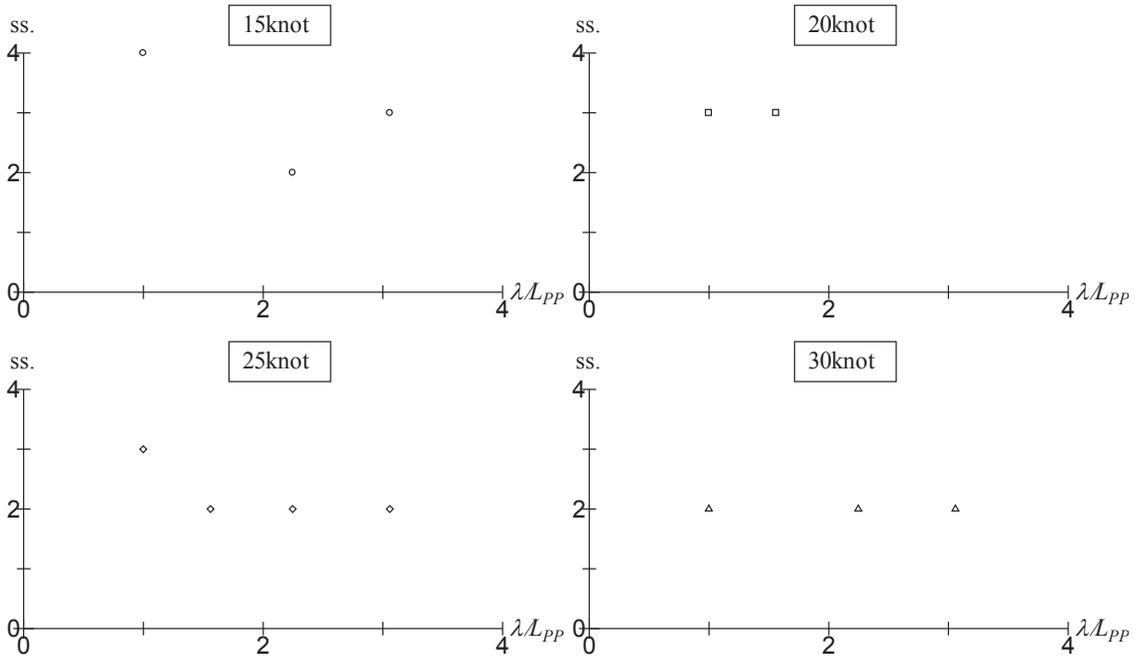


Fig.4-2-20 Longitudinal position (S.S. Number) where peak-to-peak amplitude of vertical acceleration on hull is minimum. (ShipA)

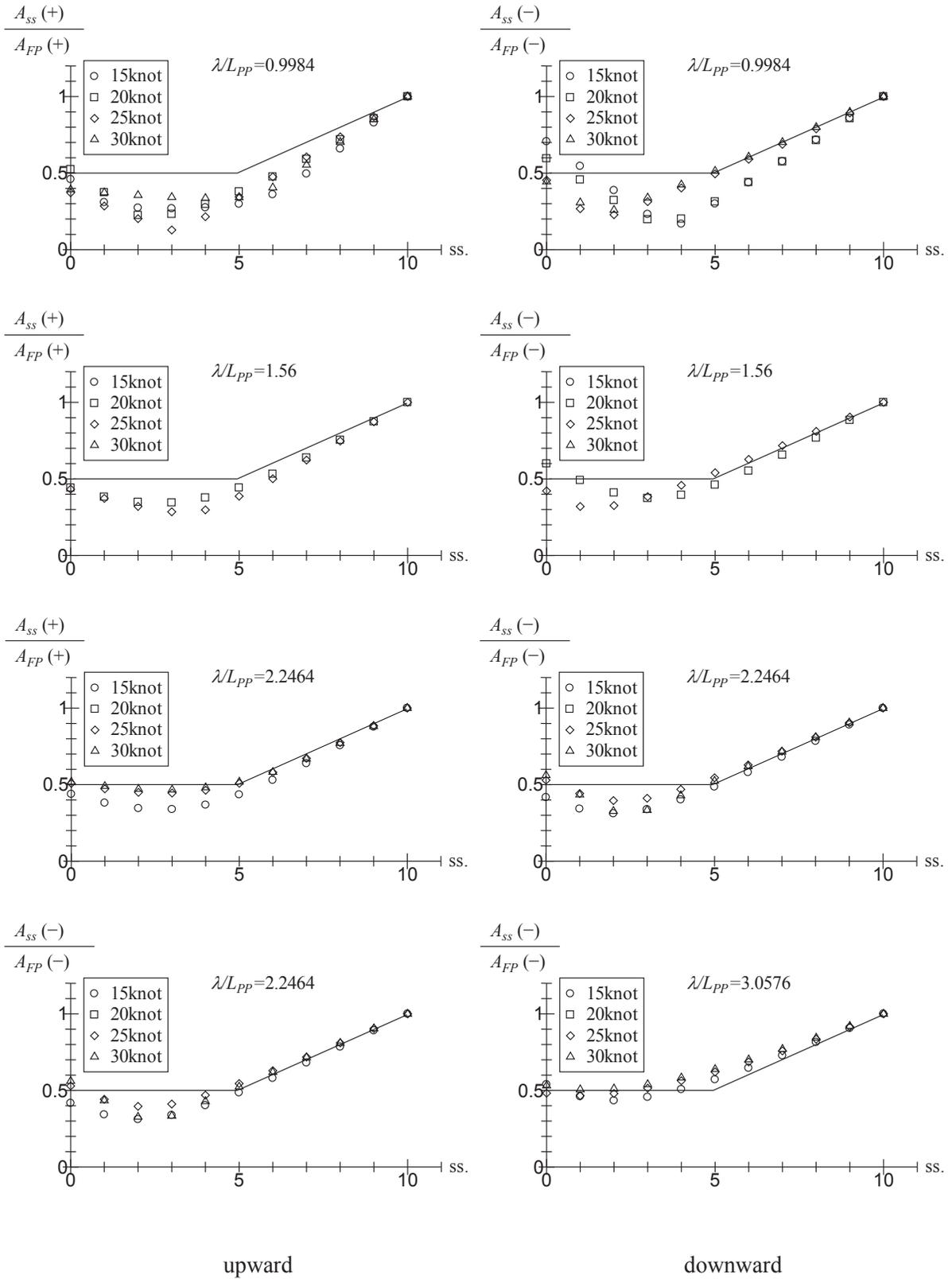


Fig.4-2-21 Form of longitudinal distribution of upward and downward peak value of vertical acceleration on hull in regular waves (ShipA).

4. 2. 3. 6 規則波中における船上加速度の整理方法

本章で行った向波規則波中船上上下加速度の解析方法に従えば、船速、入射波周期、波高が与えられれば、以下の手順で船上上下加速度振幅の船長方向分布を求めることができる。ただし、実験データに基づく結果であり、入力・出力ともに模型スケールである。

1. Fig.4-2-14 を用いて波周期と船速から下向き加速度振幅を求める。
2. Fig.4-2-15 から得られた Eq.4-2-8 から、上向き下向きの加速度振幅比を求め線形領域での上向き加速度振幅を求める。
3. Fig.4-2-11 から得られた Eq.4-2-6 から、上向き加速度振幅の線形領域限界波高を求める。
4. Fig.4-2-13 から得られた Eq.4-2-7 から、線形領域での上向き加速度振幅にかける係数を求め、上向き加速度振幅を求める。
5. Fig.4-2-21 から得られた Eq.4-2-12 により、加速度振幅の船長方向分布を求める。

4. 2. 4 不規則波中における船上上下加速度の計測

4. 2. 4. 1 実験状態

不規則波は Eq.4-2-13 の ISSC スペクトラムとし、有義波高 $H_{W(1/3)}$ と平均波周期 T_1 の関係は Eq.4-2-14 ($1/23 > \text{波粗度一定} \approx 0.43 > 1/24$) とした。

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{W(1/3)}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega \right)^{-5} \left\{ \exp - 0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi} \omega \right)^{-4} \right\} \quad (4-2-13)$$

$$T_1 = 3.86 \sqrt{H_{W(1/3)}} \quad (4-2-14)$$

不規則波は、模型スケールで 0.2~2.5 Hz (0.4~5.0 sec) の周波数域で波スペクトラムの有意な周波数域を 100 分割し、正弦波を重ね合わせて作成した。また、同じ不規則波 (同じ波高と波周期) での実験を繰り返し行う場合、各正弦波の位相差は造波ごとにランダムに与えた。同実験状態 (同じ船速、波高、波周期) での加速度の計測は、解析結果が統計的に有意となるように、出会い波数が 200 以上となるように繰り返し計測を行った (後に詳述する)。

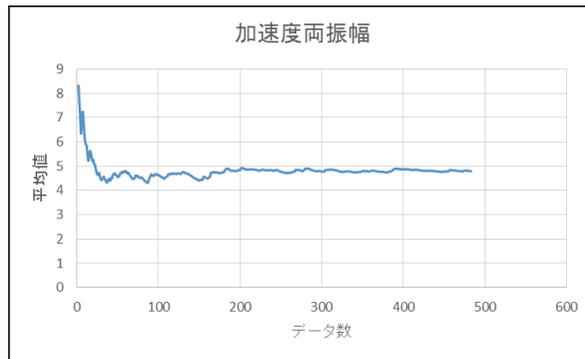
Table 4-2-3 に実験状態を示す。風浪階級を対象とし、各階級の有義波高の代表値を Table 4-2-3 のように決めた。また、波高に対する船上上下加速度の特性を確認するため、平均波周期を一定として有義波高を系統的に変化させた実験も一部行った。前進速度は、実艇で 0, 10, 15, 20, 25, 40 knot ($F_n = 0.0, 0.34, 0.51, 0.68, 0.85, 1.36$ for Ship A) とした。

Table 4-2-3 Wave condition of the experiment in real scale.

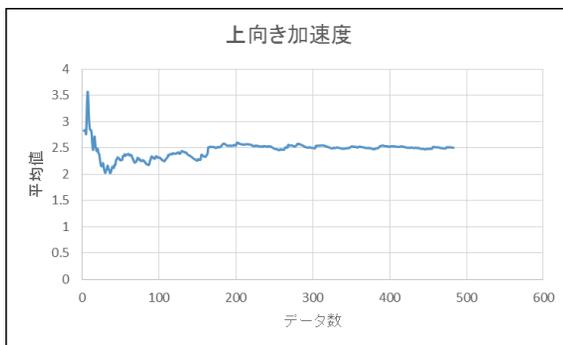
Sea state	significant wave height for sea state [m]	typical significant wave height for a sea state [m]	average wave period: T_1 [sec] obtained by Eq.(4-2-14) with typical wave height
3	0.50 ~1.25	0.70	3.2
		1.00	3.9
4	1.25 ~2.50	2.00	5.5
5	2.50 ~4.00	3.00	6.7

4. 2. 4. 2 計測データ数と統計量の収束性

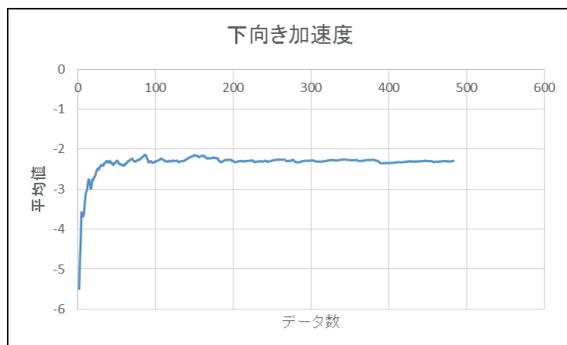
Fig.4-2-22 に、解析に用いたデータ数とその時の統計量の収束性を示す。図は上から順に加速度両振幅、上向き加速度振幅、下向き加速度振幅の平均値であり、横軸は計測した波形の数（一波形：極大値から極大値まで）である。この結果から、200 波形程度計測すれば平均値のばらつきは安定し、平均値のオーダーに対して±4%程度であることがわかる。以降、不規則波中実験解析は、出会い波数 200 以上で行うこととした。



peak to peak value of vertical acceleration



upward peak value of vertical acceleration



downward peak value of vertical acceleration

Fig.4-2-22 Variation of average of measured amplitude of vertical acceleration for numbers of amplitude data (sea state 4, $U=15$ knot in real scale, Ship A)

4. 2. 4. 3 加速度振幅の確率密度関数

排水量型船舶の不規則波中船体運動振幅の確率密度関数はレイリー分布に近いことが知られている。しかし、Fig.4-2-8 のような非線形な運動に伴う加速度振幅の確率密度関数は、レイリー分布に従わない可能性がある。

Eq.4-2-15 はレイリー分布の確率密度関数である。

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-2-15)$$

Eq.4-2-15 中パラメタ σ とレイリー分布の平均値、有義値、1/10 最大平均値との関係は Eq.4-2-16 となる。

$$\bar{X} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} = \frac{1}{1.6} X_{1/3} = \frac{1}{2.04} X_{1/10} \quad (4-2-16)$$

なお、離散データ（計測データ）によるパラメタ σ の最尤推定値($\hat{\sigma}$)は Eq.4-2-17 で求めることができるが、以下の解析では計測データから得られる振幅の平均値を確率分布の推定値として用いる。

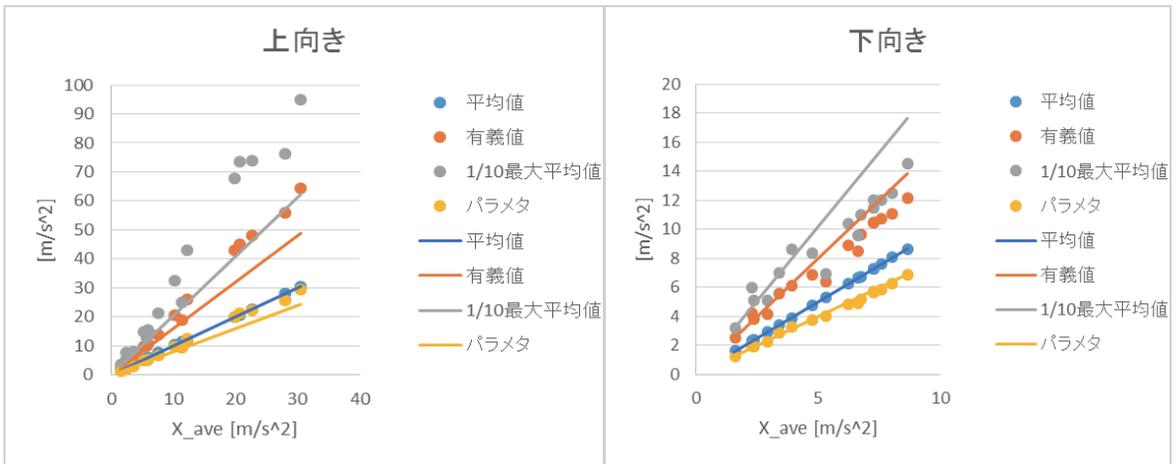
$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (4-2-17)$$

ここで、 X_i は計測値、 n はデータ数である。

Fig.4-2-23 に、計測データから求めたパラメタ σ 、平均値、有義値、1/10 最大平均値と、計測データの平均値を確率分布の代表値とし、レイリー分布に従ってパラメタ σ 、有義値、1/10 最大平均値を推定した結果の比較を示す。同図中の点は実験値、線は推定値であり、左図は上向き加速度振幅、右図は下向き加速度振幅である。また、Fig.4-2-24 に、船首部で計測した上向きおよび下向き加速度振幅の確率密度関数と、計測データの上向きおよび下向き加速度振幅の平均値を用いて推定したレイリー分布の比較を示す。

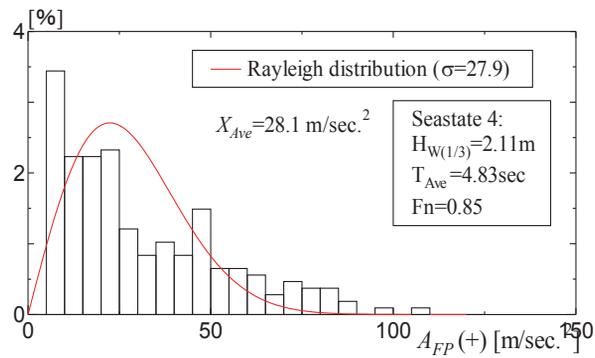
Fig.4-2-23 左図の上向き加速度振幅は、上向き加速度振幅の平均値がおおよそ 1.0 G より小さい領域を除いて実験値は推定値に比べて大きくなる傾向がみられる。Fig.4-2-24 上図に、上向き加速度振幅の確率分布の一例を示す。同図より、推定したレイリー分布とは大きく異なり、最頻値はレイリー分布に比べて小さく、発生確率は振幅の大きい範囲まで分布している。

Fig.4-2-23 右図の下向き加速度振幅は、下向き加速度振幅の平均値の大きさがおおよそ 0.5 G より小さい範囲では計測した有義値と 1/10 最大平均値はこれらの推定値と合うが、下向き加速度振幅の平均値の大きさが 0.5 G より大きくなると実験値は推定値に比べて小さくなる傾向がある。Fig.4-2-24 下図に、下向き加速度振幅の平均値の大きさが 0.5 G を超えない場合と超える場合の下向き加速度振幅の確率分布の一例を示す。下向き加速度振幅の平均値が大きくなると、確率分布の最頻値が 1.0 G 付近となるがそれより大きい範囲の発生確率は急激に減少することが分かる。これは、下向き加速度振幅の平均値が 1.0 G を超えるような状態では、船体運動が波頂付近で船首上げから船首下げへ変わるとき、船体後方に作用する波による船首下げモーメントが大きくなり、船首部が自由落下に近い運動をするためだと考えられる。

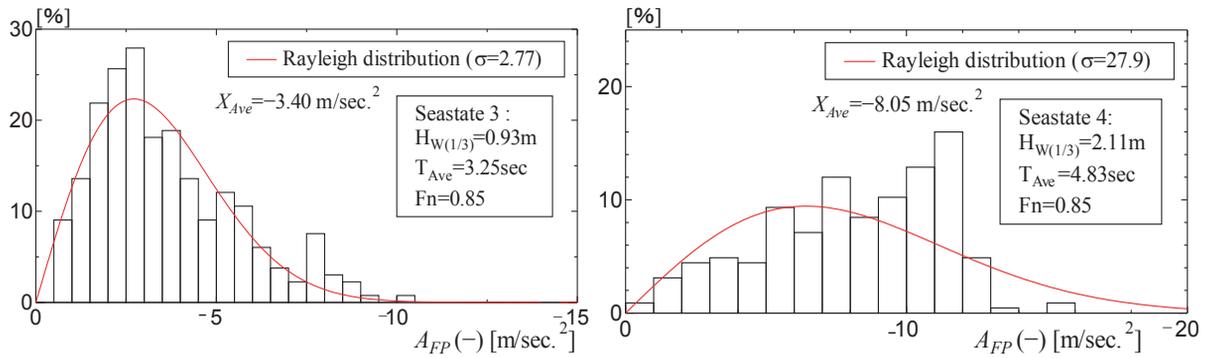


upward peak value of vertical acceleration downward peak value of vertical acceleration

Fig.4-2-23 Comparison between measured results and estimated results based on Rayleigh distribution with average value of measured data. (Ship A)



upward peak value of vertical acceleration



downward peak value of vertical acceleration

Fig.4-2-24 Probability distribution of peak of vertical acceleration at FP in irregular wave. (Ship A)

サビツキー⁴⁾は、加速度振幅 X の確率密度関数 $p(X)$ をワイブル分布を用いて Eq.4-2-18 で表している。

$$p(X) = \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{X}{\bar{X}}\right) \quad (4-2-18)$$

ここで \bar{X} は加速度振幅の平均値である。このとき、ある加速度振幅 $X_{\text{specified}}$ より大きな加速度振幅の発生確率は Eq.4-2-19 で表され、

$$P(X > X_{\text{specified}}) = \exp\left(-\frac{X}{\bar{X}}\right) \quad (4-2-19)$$

1/N 最大平均値は Eq.4-2-20 で表される。

$$X_{1/N} = \bar{X}(1 + \log_e N) \quad (4-2-20)$$

Fig.4-2-25 に、計測したデータの上向き加速度振幅の平均値を用いて Eq.4-2-18 の確率分布を Fig.4-2-24 上図に記入した結果を示す。サビツキーによる確率分布はレイリー分布に比べて振幅の大きい範囲での発生確率を表現できている。

Fig.4-2-26 に、計測したデータの上向き加速度振幅の平均値を用いて Eq.4-2-20 から有義値および 1/10 最大平均値を推定した結果（濃い黒線）示す。同図より、上向き加速度振幅の平均値がおおよそ 0.5 G を超える範囲では、サビツキーの示す確率分布により計測結果を表現できることが確認できる。

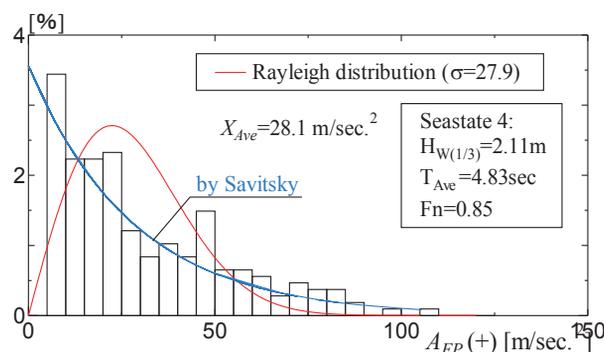


Fig.4-2-25 Measured probability distribution of upward peak value of vertical acceleration at FP in irregular wave in real scale. (Ship A)

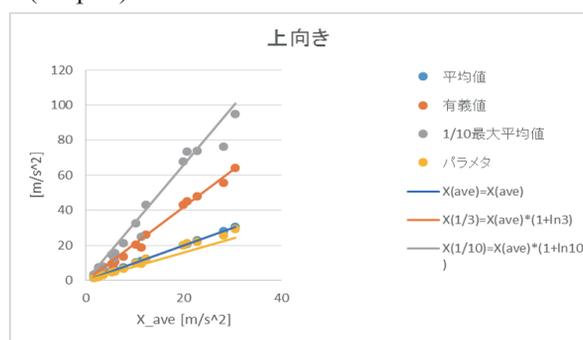


Fig.4-2-26 Comparison between measured result and Weibull distribution proposed by Savitsky. (Ship A)

4.2.4.4 既存のデータとの比較

図表や経験式を用いて船上上下加速度を求める方法として、大隅の加速度チャート¹⁾、木原による方法²⁾、サビツキーの実験式⁴⁾がある。ここでは、大隅の加速度チャート¹⁾と計測結果との比較を示す。なお、大隅チャートは、「実艇の波浪中航走試験結果をもとにして deepV に近い船型の中速艇が波浪中を向波で航走する場合にほぼ合うように画いたものである」¹⁾。そのため、過度な衝撃加速度は考慮されておらず、船上上下加速度を波高で割った係数は一定であると仮定されている。

Fig4-2-27 に、Ship A を対象に計測した加速度振幅の有義値（両振幅）と大隅の加速度チャートの比較を示している。なお、縦軸は大隅の加速度チャートにならぬ、加速度振幅の有義値（両振幅）を重力加速度と有義波高で割り船長をかけた無次元値、横軸は平均波周期から計算される波長を船長で割った波長船長比である。実線が大隅の結果、●が実験結果である。大隅による結果は、衝撃的な加速度を考慮していない加速度であり、実験結果は大隅の結果に比べて大きい。なお、実験結果は大隅の結果同様、周波数特性があり、波長船長比 $\lambda/L_{pp}=1.0 \sim 2.0$ 付近にピークを持つ様子が見られる。

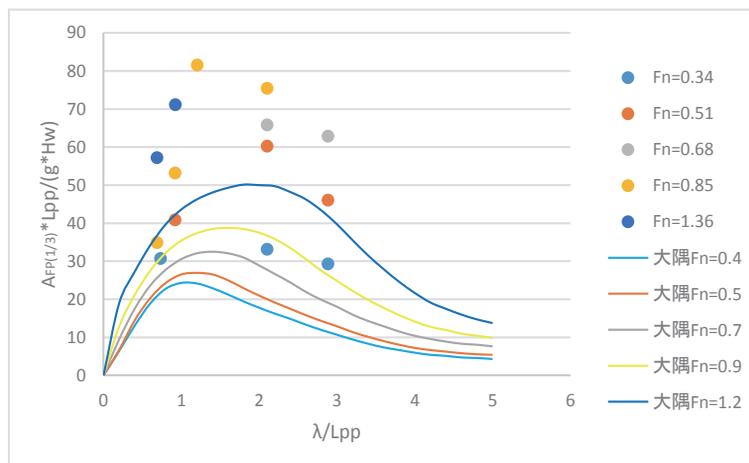


Fig.4-2-27 Measured significant peak to peak value of vertical acceleration on hull (at FP) in irregular waves. Comparison of the measured data (Ship A) and Osumi's result.

4. 2. 4. 5 波高の影響

波高の変化が船上上下加速度に与える影響を調査するために、Ship A を対象に、船速、平均波周期を一定とし、有義波高を変化させた実験を行った。

Fig.4-2-28 に、実艇で平均波周期 $T_1=5.5$ sec (模型 : $T_1=1.14$ sec) のときの、船首部の上向きおよび下向きの平均加速度振幅を示す。なお、縦軸は上向きまたは下向きの平均加速度振幅を有義波高と重力加速度で割り船長をかけた無次元値、横軸は有義波高を船長で割った値であり、上向き加速度を正、下向き加速度を負であらわす。同図から、上向きおよび下向きの加速度振幅の無次元値の大きさは、波高が大きくなると直線的に増加する傾向が見られる。

規則波中の上向き加速度振幅にも同様の傾向が見られ、その原因は波高および船速の増加に伴う船首部水面突入時衝撃加速度の発生であった。規則波中の衝撃加速度発生波高の Eq.4-2-6 に、不規則波中実験での船速と平均波周期を入力すると $Hw/L_{pp} \doteq 0.036$ となる。この値に比べ、Fig.4-2-28 ではさらに低い有義波高で衝撃加速度が発生し始めると考えられる。一方、下向き加速度振幅の傾向も、不規則波中では瞬間的に船尾船底に激しい波浪外力が作用することがあるためだと考えられる。

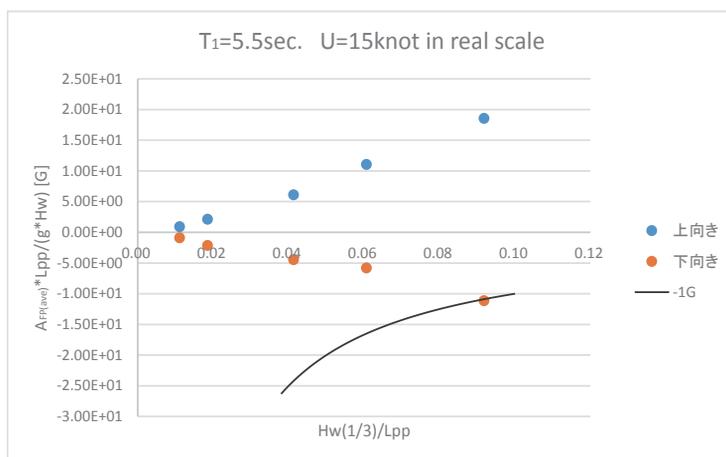


Fig.4-2-28 Measured average upward and downward peak value of vertical acceleration on hull (at FP) for several wave height. (Ship A) In this figure, the black solid line shows the free fall whose acceleration is 1.0 G.

4. 2. 4. 6 船上における上下加速度の船長方向分布

Fig.4-2-29 に、船体長手方向の平均加速度分布を示す。各船体前後位置での加速度は Eq.4-2-5 によって求めた。

高速艇の不規則波中船上上下加速度は、規則波中と同様に水面突入時の波浪衝撃力の発生にため、必ずしも上向きと下向きの最大加速度が等しくならない。そこで、Fig.4-2-29 に加速度の両振幅と、この両振幅を上向きの最大加速度（+）と下向きの最大加速度（-）に分けたものを示す。同図から、不規則波中の船首部での上下方向加速度の大きさの割合は、規則波の結果に近い概ね 0.50~0.61 となった。

Fig.4-2-30 に、船長方向で船上上下加速度振幅が最小となる位置を求めた結果を示す。加速度が最小となる前後位置は、前進速度および有義波周期によって異なり、前進速度が速くなるまたは平均波周期が短くなると、後方へ移動する傾向が見られ、この傾向は規則波中航走時の結果と定性的にも定量的にも符合する。これは高速で航走し、出会い波周期が短くなると、船体は波面に追従した運動ができず、浸水部分が後方へと移動するためである。

Fig.4-2-31 に、船上上下加速度船長方向分布形状を見るために、Fig.4-2-29 すべてのケースについて、それぞれのケースの FP での加速度で割って無次元化したグラフを示す。この結果から、静止状態 ($Fn = 0$) を除いては、船上上下加速度は S.S. 2.0~3.0 付近が最も小さく、前後に直線的に増加する形状であることがわかる。同図には、規則波の場合と同様 Eq.4-2-12 を示している。Eq.4-2-12 の結果は、S.S. 5.0 よりも前方では実験結果に比較的良好合うが、S.S.5.0 より後方では実験結果に比べて小さい。

加速度両振幅は上向き加速度振幅と下向き加速度振幅の和であること、加速度両振幅の長手方向分布が S.S. 5.0 で FP の値の半分かつ S.S. 3.0 で最少となると考え、さらに FP での上向きと下向きの加速度振幅の比を 7 : 3 とする。さらに、S.S. 3.0 の前方で上向き加速度振幅発生時は、S.S. 3.0 より後方では下向き加速度が発生していることを考慮し、上向き加速度振幅および下向き加速度振幅の船長方向分布が S.S. 3.0 で不連続となるので S.S. 3.0 より後方の加速度分布を上下に平行移動させて調整し、以下のように仮定した。

$$\text{加速度両振幅 : } \frac{A_{ss(ave)}}{A_{FP(ave)}} = \begin{cases} \frac{ss}{10} & (3.0 \leq ss) \\ \frac{(6-ss)}{10} & (ss < 3.0) \end{cases} \quad (4-2-21)$$

$$\text{上向き加速度振幅 : } \frac{A_{ss(+)(ave)}}{A_{FP(+)(ave)}} = \begin{cases} \frac{(3 \times ss - 2)}{28} & (3.0 \leq ss) \\ \frac{(10 - ss)}{28} & (ss < 3.0) \end{cases} \quad (4-2-22)$$

$$\text{下向き加速度振幅 : } \frac{A_{ss(-)(ave)}}{A_{FP(-)(ave)}} = \begin{cases} \frac{(2 + ss)}{12} & (3.0 \leq ss) \\ \frac{(14 - 3 \times ss)}{12} & (ss < 3.0) \end{cases} \quad (4-2-23)$$

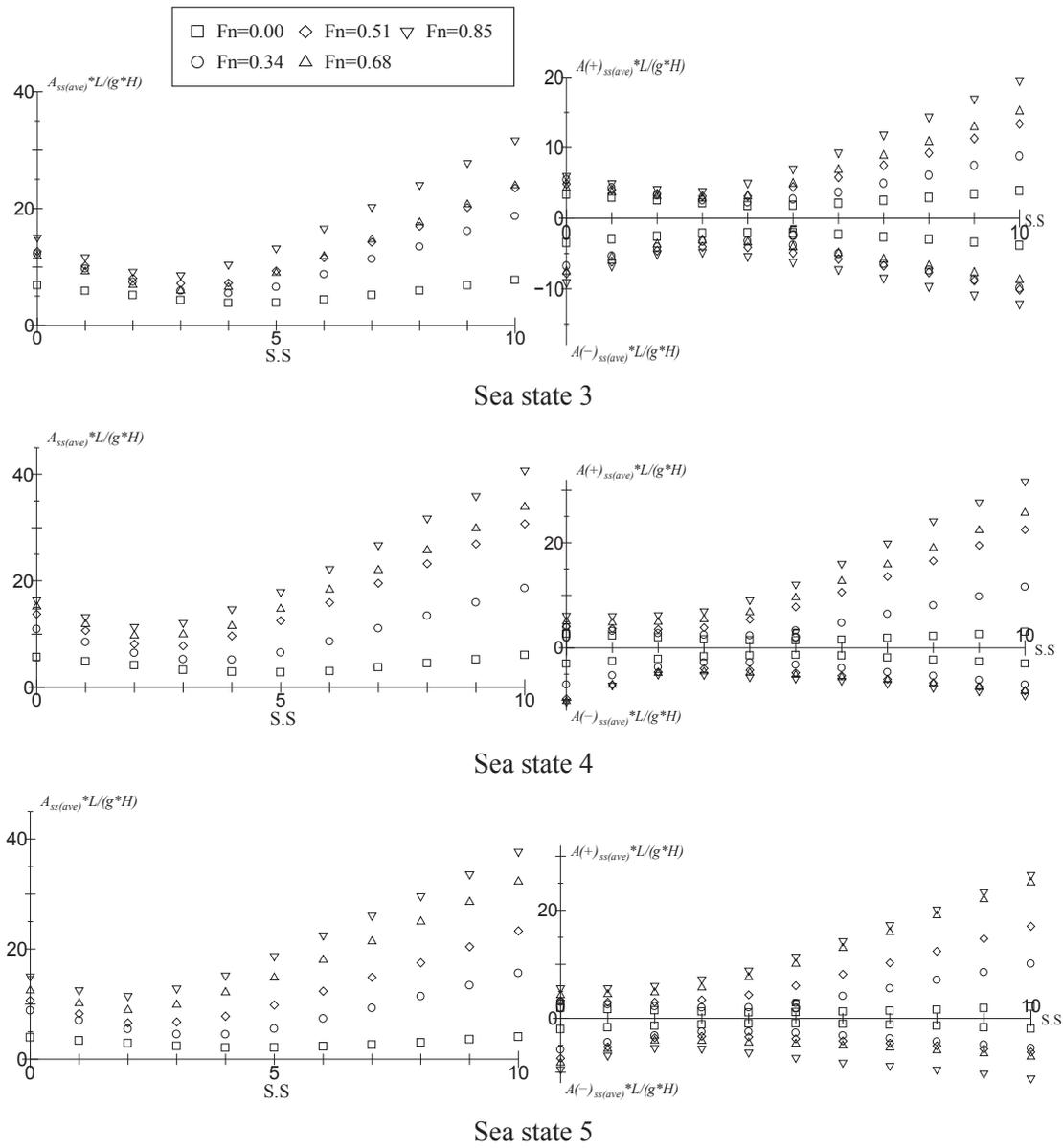


Fig.4-2-29 Longitudinal distribution of average peak to peak value, upward peak value and downward peak value of vertical acceleration on hull. (Ship A)

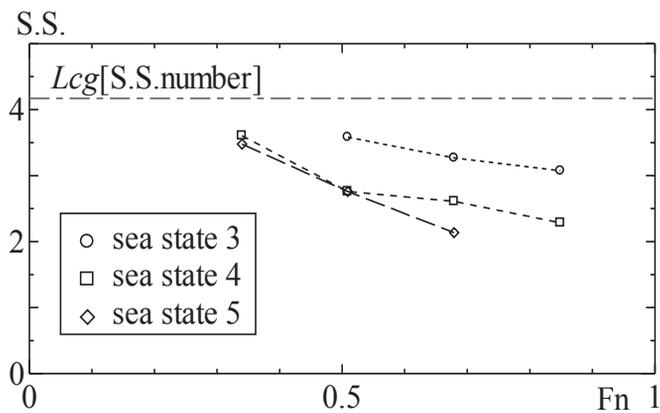


Fig.4-2-30 Longitudinal position where amplitude of vertical acceleration is minimum. (Ship A)

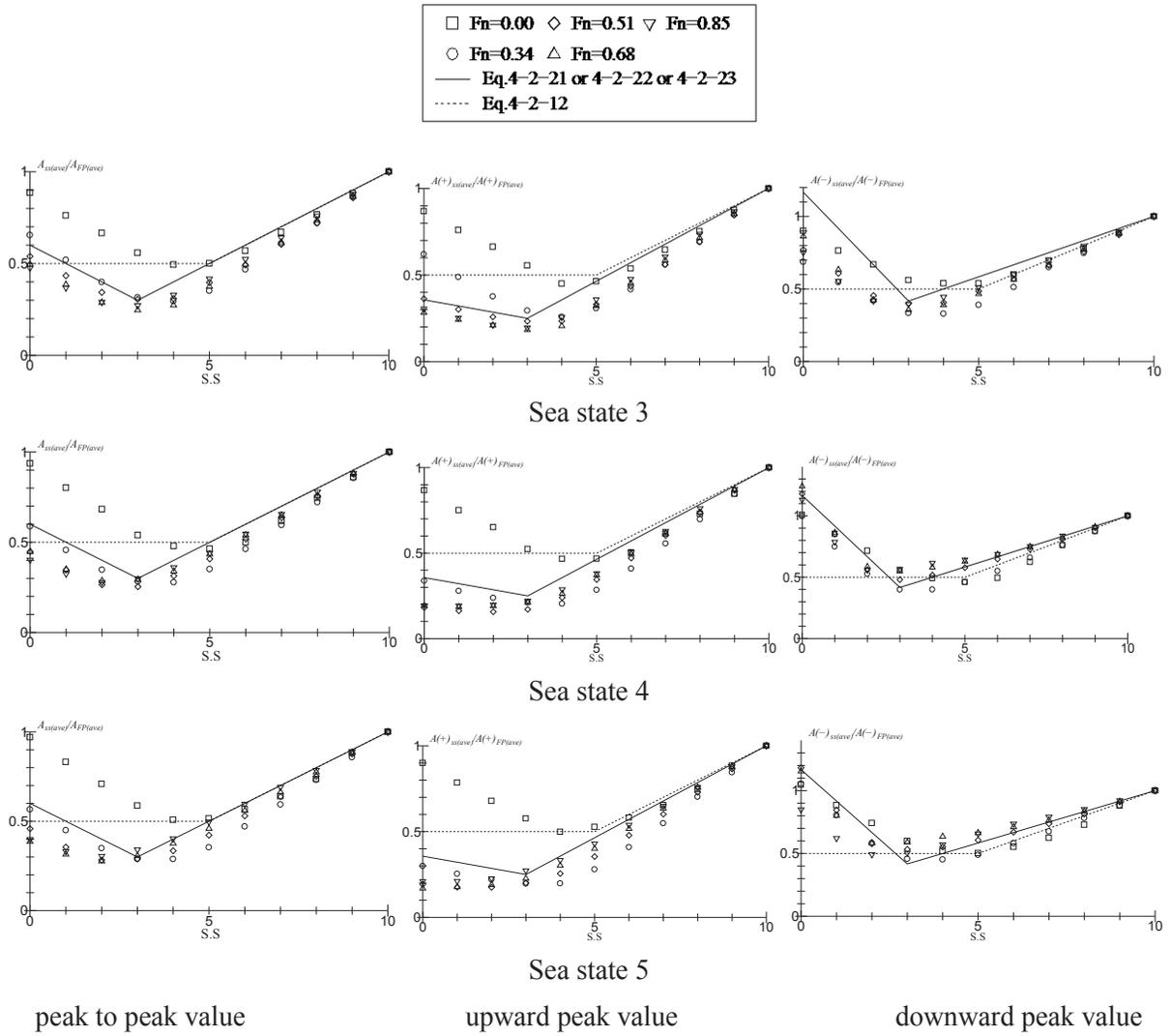


Fig.4-2-31 Form of longitudinal distribution of peak to peak value, upward peak value and downward peak value of vertical acceleration on hull in irregular waves (Ship A).

4. 2. 4. 7 船型の違いによる影響

波浪中航走時の船上上下下加速度は、同じ波の中を同じ速度で航走する場合でも、船の大きさおよび船型によってその大きさは異なる。ここでは、船型の主要な要目が船上上下下加速度に与える影響を調査するために、Ship A を基準として船長が短く船長船幅比が小さい船型 Ship B とデッドライズ角の異なる船型 Ship C を用いて、Ship A と同様の実験を行い、船型が波浪中船上上下下加速度に与える影響を調査した。Table 4-2-4 に、供試船の主要目、Fig.4-2-32 に模型船の写真を示す。

まず、船型が上下加速度振幅の確率密度に与える影響を見るために、Fig.4-2-33 に、船首部で計測した上向きおよび下向き加速度振幅の確率密度関数と、計測データの上向きおよび下向き加速度振幅の平均値を用いて推定した Eq.4-2-20 およびレイリー分布との比較を示す。同図には、Ship A, Ship B, Ship C の結果を重ねて示しているが、確率密度分布に関しては顕著な船型影響は見られない。

次に、船型が加速度振幅の大きさに与える影響を見るために、Fig.4-2-34 に、Ship A, Ship B, Ship C の船首部での上向きおよび下向きの有義加速度振幅を、横軸を船長として、波浪条件ごとに分けて示す。同図から、船型にかかわらず加速度振幅は、前進速度が速くなると増加する傾向がみられるが、その大きさは船型によって異なり、デッドライズ角が大きくなるまたは船長が短くなると加速度振幅は減る傾向が見られる。また、この結果を同図中に示す木原による結果と比較すると、実験結果は船長が長くなっても上下加速度振幅が減少せず、木原の結果に一致しない結果となった。

Fig.4-2-35 にサビツキーの実験式との比較を示す。縦軸は平均加速度振幅、横軸は船長船幅比である。サビツキーの実験式もまた本実験と同様、平均波周期と有義波高の間には Eq.4-2-14 が成り立つ状態の結果である。なお、サビツキーの実験式の適用範囲以下のとおりである。

$$\begin{array}{ll} \Delta_{LT} / (0.01L)^3 : 100 - 250 & L/b : 3 - 5 \\ \text{running trim [deg]} : 3 - 7 & \text{deadrise [deg]} : 10 - 30 \\ Hw_{(1/3)} [\text{ft}] : 0.2 - 0.7 & V_K [\text{knot}] / \sqrt{L [\text{ft}]} : 2 - 6 \end{array}$$

ここで、 L は全長[ft]、 Δ_{LT} は排水量[long tons]である。

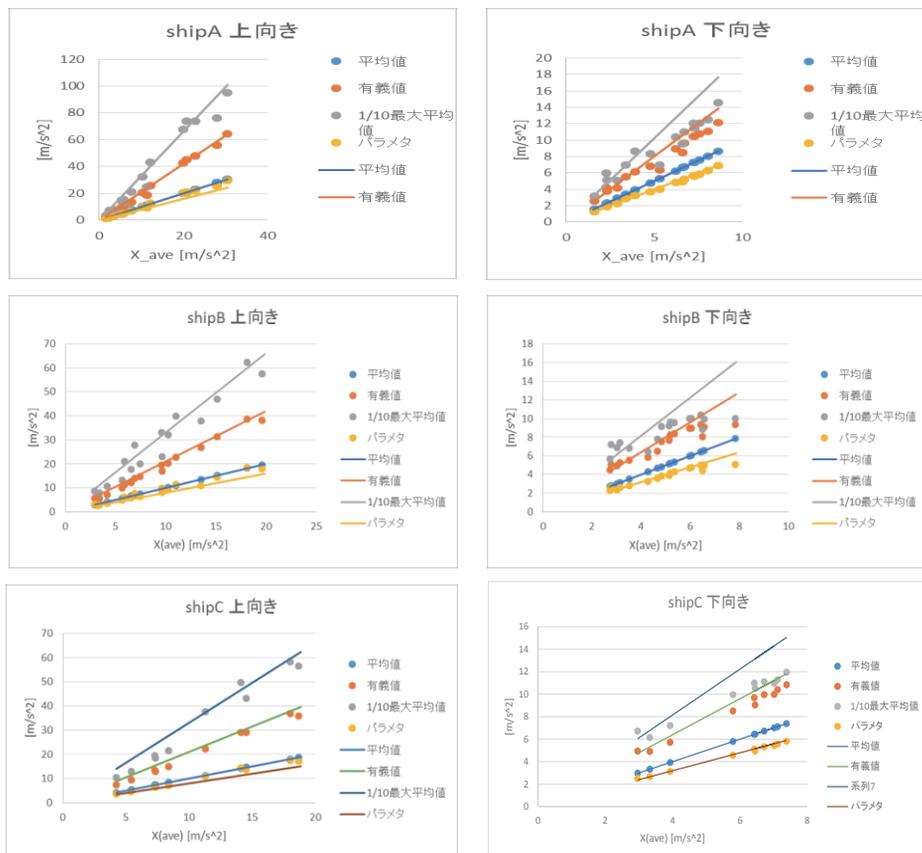
同図は、上から加速度片振幅、上向き加速度振幅、下向き加速度振幅である。どの結果も実験値はサビツキーの実験式に比べて小さくなった。これは、サビツキーが対象とする船型がモノヘドロン（船体後半のデッドライズ角一定）かつ船首部がストレートまたはコンベックスであるのに対し、ここで対象とする船型が船体中央から船尾に向かって船尾から船首に向かってデッドライズ角が大きくなるワープトかつ船首部がコンケーブまたはストレートであるために、モノヘドロンに比べて同じ速度でも揚力が発生しにくく船首部での波浪衝撃振幅が小さくなったと考えられる。

Table 4-2-4 Principal particulars of the models in real scale. (Ship A, Ship B, Ship C)

	Ship A	Ship B	Ship C
L_{oa} [m]	25.22		
L_{pp} [m]	23.4	14.95	18.1
B [m]	4.5	4.5	4.4
β [deg] at S.S. 5.0	18	18	24
W [tonf]	36.762	25.908	31.51
d [m]	0.76	0.751	0.935
model scale: 1/s	1/23.4	1/21.0	1/21.0

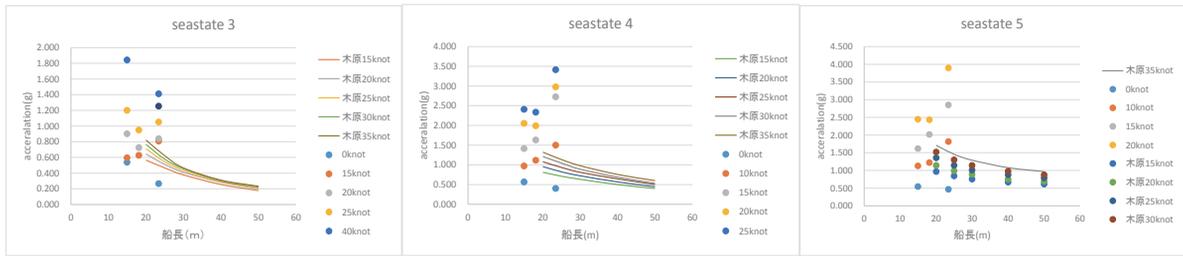


Fig.4-2-32 Pictures of the models (left: Ship B, right: Ship C).

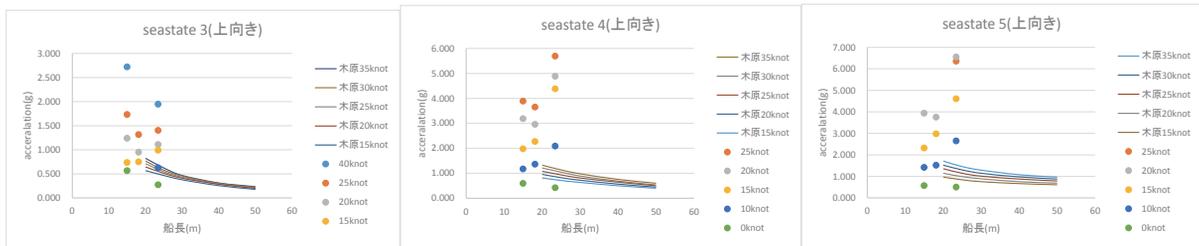


upward peak value of vertical acceleration downward peak value of vertical acceleration

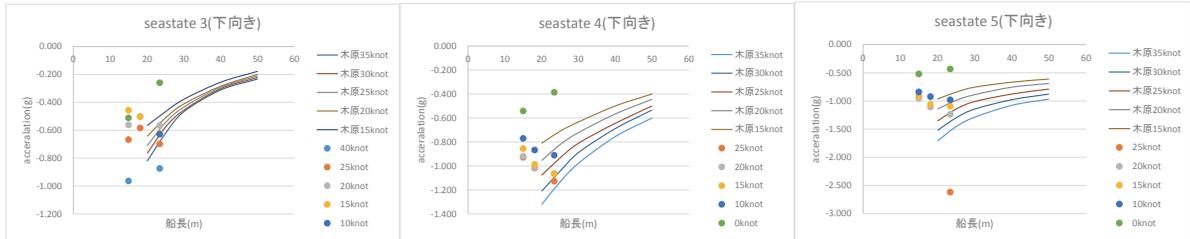
Fig.4-2-33 Comparison between measured result and Weibull distribution proposed by Savitsky (:left figures) or Rayleigh distribution (right figures). (Ship A, Ship B, Ship C)



Significant half of peak to peak value



Significant upward peak value



Significant downward peak value

Fig.4-2-34 Measured significant amplitude of vertical acceleration on hull at FP vs ship length speed in real scale. (Ship A, Ship B, Ship C) Measured results are compared with Kihara's results.

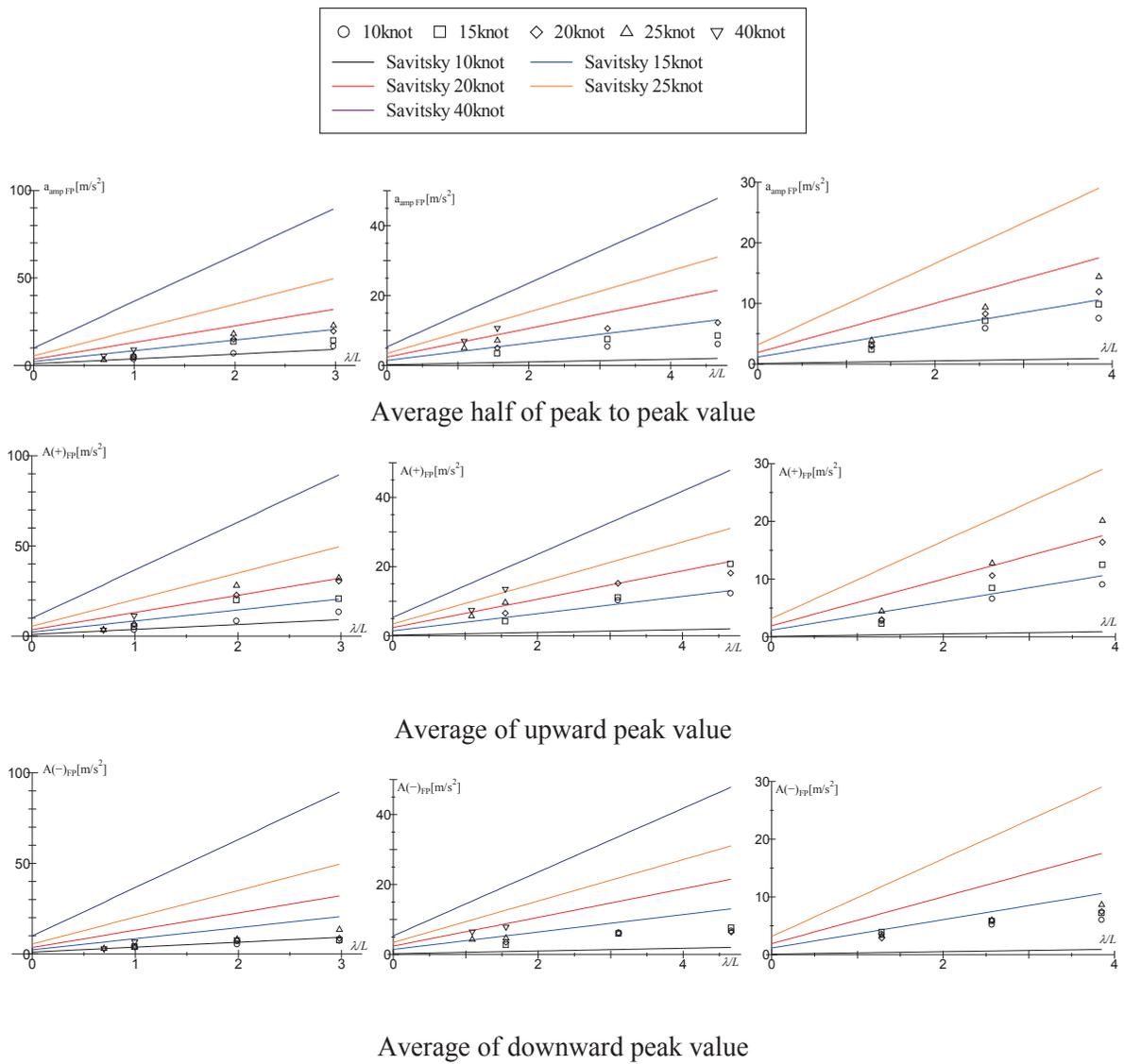


Fig.4-2-35 Measured average amplitude of vertical acceleration on hull at FP vs ship length speed in real scale. (Ship A, Ship B, Ship C) Measured results are compared with Savitsky's results.

4. 2. 4. 8 船型の影響を考慮した船上上下加速度簡易推定法

前述のように、同じ海象を同じ速度で航走する場合でも船型により、船上上下加速度振幅の大きさが異なる。この影響を考慮して任意船型の波浪中船上上下加速度振幅を簡易に推定するための水槽試験データを取得するとともに、その方法を検討した。

波浪中船上上下加速度振幅に影響を与える要目として、船長（船体の大きさ）、船長船幅比、船体中央部のデッドライズ角（喫水の影響を含む）を考えた。船型の影響を考慮した4船型を Table 4-2-5 に示す。表中の Ship A, Ship B, Ship C の3船型について4-2-4-2章に示す実験を行い、 L_{pp} を代表長さとして実験データを無次元化して整理した。なお、Ship LI は、Ship A と Ship B の実験データを船長船幅比 L_{pp}/B について線形補間し、船長船幅比 L_{pp}/B が Ship C の値 $L_{pp}/B=4.11$ と等しくなる時のデータを作成したものである。

4. 2. 4. 8. 1 データの整理

Fig.4-2-37 に3隻のFPでの上向きおよび下向き無次元平均加速度振幅の計測結果を示す。横軸は実験で造波した不規則波の平均波周期 T_1 から $\lambda = g/(2\pi) \times T_1^2$ で求めた波長を船長 L_{pp} で割って求めた波長船長比 λ/L_{pp} 、縦軸は実験で計測した平均加速度振幅 $A(+)^{FP(ave)}$ or $A(-)^{FP(ave)}$ [G]を有義波高の計測値 $H_{W(1/3)}$ で割って船長 L_{pp} をかけた Eq.4-2-24 の無次元平均加速度振幅 $A'(+)^{FP(ave)}$ or $A'(-)^{FP(ave)}$ である。

$$\left. \begin{matrix} A'(+)^{FP(ave)} \\ A'(-)^{FP(ave)} \end{matrix} \right\} = \begin{cases} A(+)^{FP(ave)} \frac{L_{pp}}{g \times H_{W(1/3)}} \\ A(-)^{FP(ave)} \frac{L_{pp}}{g \times H_{W(1/3)}} \end{cases} \quad \text{in [G]} \quad (4-2-24)$$

この Fig.4-2-37 の計測結果を Eq.4-2-25 の曲線で近似する。

$$y = B \times x \times e^{-Cx} \quad (4-2-25)$$

ここで、 B, C は任意の定数である。なお、 B, C は同じ船型に対して、フルード数 $Fn (=U/\sqrt{gL_{pp}})$: ここで U [m/sec] = $(1.852 \times 1000 \div 3600) \times U_{kt}$ [knot/h] ごとに異なる係数が得られる。近似した曲線を Fig.4-2-37 に示すとともに、船型および Fn ごとの各係数を Table 4-2-6 に示す。

Fig.4-2-38 に係数 B, C の前進速度に対する変化の傾向を示す。それぞれの係数の曲線は、おおむね Eq.4-2-26 の Fn の2次~4次関数で近似できる。

$$y = Dx^4 + Ex^3 + Fx^2 + Gx + H \quad (4-2-26)$$

各係数を船型ごとに整理して Table 4-2-7 に示すとともに近似曲線を Fig.4-2-38 に示す。

Table 4-2-5 Particulars of the models for measurement of vertical acceleration in irregular waves. Ship LI is a virtual model for making a vertical acceleration data to take the effects of deadrise angle on vertical acceleration. The data obtained from linear interpolation between measured acceleration of Ship A and that of Ship B.

	Ship A	Ship LI	Ship B	Ship C
L_{pp} [m]	23.4		14.95	18.1
L_{pp}/B	5.65	4.11	3.3	4.11
β [deg] at S.S. 5.0	18	18	18	24
W [tonf]	36.762		25.908	31.51
$1/s$	1/23.4		1/21	1/21

Table 4-2-6 Coefficient B and C in Eq.4-2-25 of Ship A, Ship B, Ship C for average upward or downward peak value of vertical acceleration on hull vs Fn .

Ship A	upward						downward					
Fn	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36
B	9.8	16.0	22.0	23.0	24.0	30.0	14.0	17.0	18.0	19.0	20.0	24.0
C	0.90	0.50	0.40	0.35	0.30	0.20	1.05	0.75	0.70	0.65	0.60	0.43

Ship B	upward						downward					
Fn	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36
B	7.5	7.5	9.8	12.6	15.3	20.0	11.0	11.6	11.9	12.3	13.0	16.3
C	0.57	0.47	0.44	0.42	0.38	0.23	0.80	0.70	0.66	0.64	0.62	0.53

Ship C	upward						downward					
Fn	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36	0.0	0.34	0.51	0.68	0.85	1.36
B	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0	24.0	7.5	10.3	11.0	11.5	13.0	20.0
C	0.75	0.50	0.40	0.35	0.30	0.20	0.8	0.65	0.6	0.59	0.57	0.47

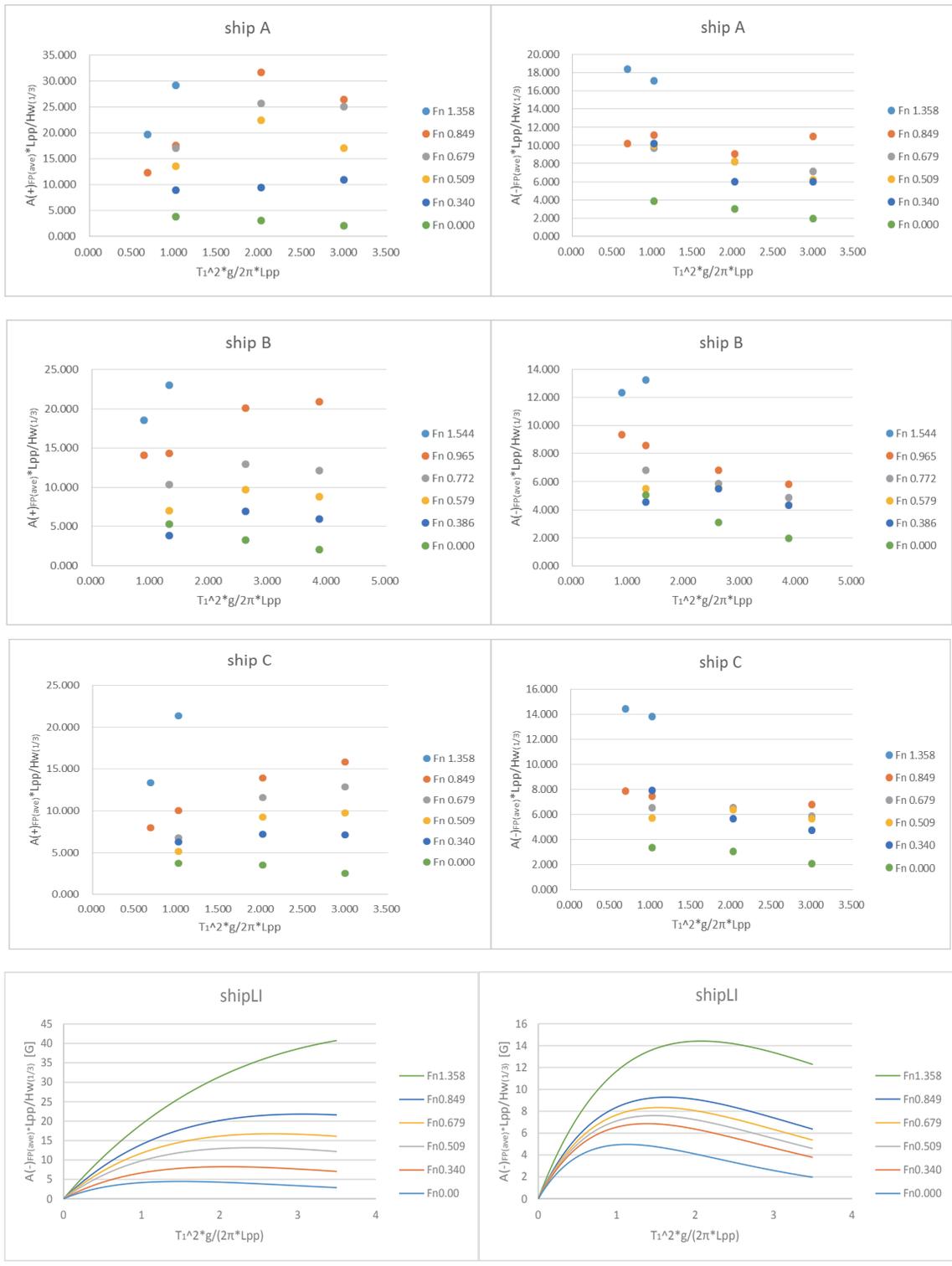
Table 4-2-7 The coefficients D , E , F , G and H in Eq.4-2-26 for the coefficients B and C in Eq.4-2-25 of Ship A, Ship B, Ship C and Ship LI vs F_n .

Ship A	upward					downward				
	D	E	F	G	H	D	E	F	G	H
B	/	12.31	-31.557	35.062	9.7237	-2.3872	9.9769	-12.579	12.025	14.001
C	0.4067	-1.5941	2.3784	-1.8242	0.9002	0.8216	-2.6196	2.8737	-1.5855	1.0499

Ship B	upward					downward				
	D	E	F	G	H	D	E	F	G	H
B	7.2836	-36.15	52.748	-13.973	7.4966	-1.2829	5.2966	-3.8032	2.499	11.002
C	0.2889	-0.9441	0.9593	-0.5335	0.5701	-0.0083	-0.1019	0.2935	-0.387	0.8001

Ship C	upward					downward				
	D	E	F	G	H	D	E	F	G	H
B	15.295	-27.743	15.904	3.0397	8.0012	-12.438	40.856	-38.476	17.262	7.4959
C	-0.2382	0.4226	0.1933	-0.8506	0.7502	0.005	-0.2951	0.6864	-0.6434	0.8001

Ship LI	upward					downward				
	D	E	F	G	H	D	E	F	G	H
B	/	-11.333	21.878	1.9699	8.6422	2.1495	-6.7224	7.2837	2.6454	11.5
C	-0.637	1.4547	-0.6886	-0.5245	0.7053	0.2053	-0.7677	0.9203	-0.6132	0.84



upward

downward

Fig.4-2-37 Measured non-dimensional average upward or downward peak value of vertical acceleration on hull obtained by Eq.4-2-24 for Ship A, Ship B and Ship C. The data of Ship LI obtained from linear interpolation between measured acceleration of Ship A and that of Ship B for L_{pp}/B . Ship LI is $L_{pp}/B=4.11$.

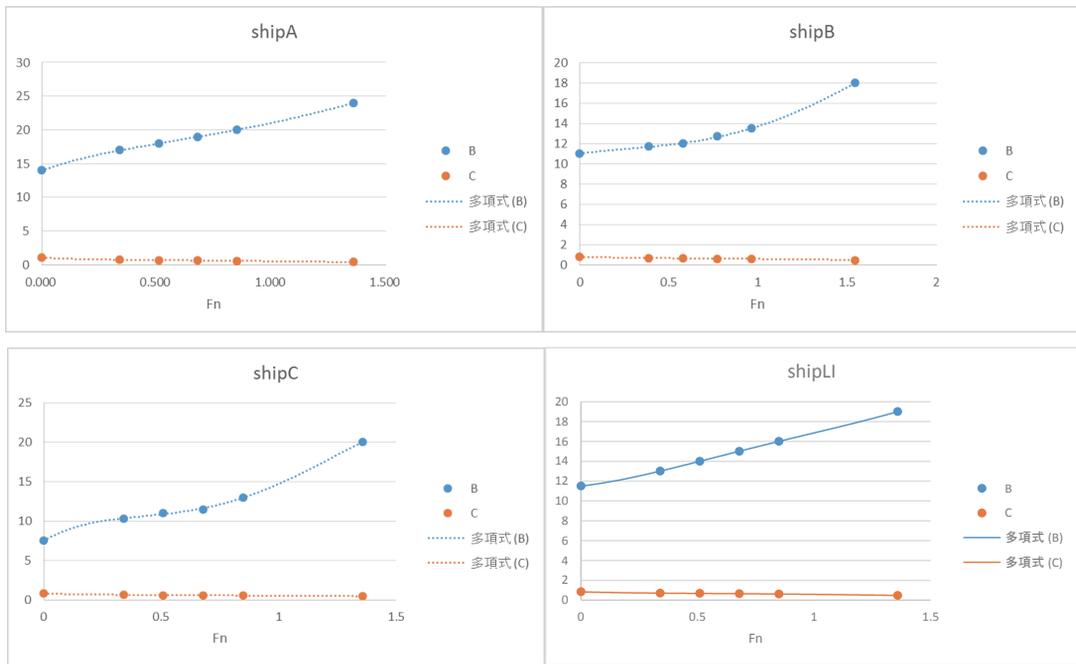


Fig.4-2-38 The coefficients B and C in Eq.4-2-5 for Ship A, Ship B, Ship C and Ship LI vs F_n .

4.2.4.8.2 加速度算出法(その1)

以下に、任意のディープ V ワープト型滑走艇のある航走状態での加速度算出手順を示す。
なお、適用範囲は以下のとおりである。

対象船型：ディープ V ワープト型滑走艇、船首部はコンケーブおよびストレート

船長 L_{pp} [m]：13～25

船長船幅比 L_{pp}/B ：3～6

船体中央部デッドライズ角 β at S.S. 5.0 [deg]：10～30

船速 U_{kt} [knot]：0～45

有義波高 $H_{W(1/3)}$ [m]：～3.0, 平均波周期 T_1 [sec]：～7.22, 波長 λ [m]：～81

本算出法は、中速艇に対しては過大、モノヘドロン型滑走艇（船首部は主としてコンベックスおよびストレート）に対しては過小評価となる可能性がある。なお、中速艇には大隅の加速度チャート¹⁾、モノヘドロン型滑走艇にはサビツキーの実験式⁴⁾がある。

STEP 0 入力データの準備

以下の数値を用意する。

船型データ： 船長 L_{pp} [m]、船長船幅比 L_{pp}/B

中央断面でのデッドライズ角 β [deg]、船長方向位置 ss [S.S. Number]

航走状態： 船速 U_{kt} [knot]、波長船長比 $\lambda/L_{pp}=1.56 \times T_1^2/L_{pp}$ (T_1 [sec]：平均波周期)

有義波高 $H_{W(1/3)}$ [m] (但し、 $T_1=3.86 \times (H_{W(1/3)})^{0.5}$ に従う場合は不要)

STEP 1 Eq.4-2-7 中係数 B, C の算出

Table 4-2-7 と Eq.4-2-26 を用いて Ship A, Ship B, Ship C, Ship LI の船速 U_{kt} [knot]での Eq.4-2-25 中の係数 B, C を求める。なお、フルード数 Fn は次式で計算する。

$$Fn = \frac{(1.852 \times 1000 \div 3600 \times U_{kt})}{\sqrt{g L_{pp}}}$$

STEP 2 λ/L_{pp} での無次元平均加速度振幅 $A'_A, A'_B, A'_C, A'_{LI}$

Eq.4-2-25 により、Ship A, Ship B, Ship C, Ship LI の波長船長比 λ/L_{pp} での無次元平均加速度振幅 $A'_A, A'_B, A'_C, A'_{LI}$ を求める。

STEP 3 船長船幅比の影響

A'_B, A'_A の各船型の船長線幅比 $L_B/B_B, L_A/B_A$ に対する変化の割合を用いて、次式で船長線幅比 L_{pp}/B での無次元平均加速度振幅 $A'(L_{pp}/B)$ を求める。

$$A'(L_{pp}/B) = A'_B \left\{ 1 + \frac{(A'_A - A'_B)(L_{pp}/B - L_B/B_B)}{A'_B(L_A/B_A - L_B/B_B)} \right\}$$

STEP 4 デッドライズ角の影響

A'_{LI}, A'_C の各船型のデッドライズ角 β_{LI}, β_C に対する変化の割合を用いて、次式でデッドライズ角 β での無次元平均加速度振幅 $A'(L_{pp}/B, \beta)$ を求める。

$$A'(L_{pp}/B, \beta) = A'_{LI} \left\{ 1 + \frac{(A'_C - A'_{LI})(\beta - \beta_{LI})}{A'_{LI}(\beta_C - \beta_{LI})} \right\}$$

STEP 5 船長方向位置

Eq.4-2-22 または Eq.4-2-23 を用いて船長方向位置 ss [S.S. Number]での無次元平均加速度振幅 $A'(L_{pp}/B, \beta, ss)$ を求める。

STEP 6 衝撃加速度の緩和

本計算結果は Fig.4-2-7 に見られるような急峻な衝撃加速度を考慮した結果であり、この衝撃加速度を和らげる場合 0.9 を掛ける。

STEP 7 平均加速度振幅の算出

有義波高と平均波周期が $T_1=3.86 \times (Hw_{(1/3)})^{0.5}$ の関係にある時、STEP 6 で求めた無次元平均加速度振幅に有義波高 $Hw_{(1/3)}=(T_1/3.86)^2$ を掛けて、船長 L_{pp} で割ることで平均加速度振幅[G]を得る。

$$A(L_{pp}/B, \beta, ss, Hw_{(1/3)}) = A'(L_{pp}/B, \beta, ss) \left(\frac{T_1}{3.86} \right)^2 \frac{1}{L_{pp}} = A'(L_{pp}/B, \beta, ss) \frac{1}{3.86^2 \times 1.56} \frac{\lambda}{L_{pp}}$$

ここで、 g は重力加速度。

しかし、平均波周期 T_1 と有義波高 $Hw_{(1/3)}$ [m] が $T_1=3.86 \times (Hw_{(1/3)})^{0.5}$ の関係に従わない場合、STEP 0 で用意しておいた有義波高を無次元平均加速度振幅に掛けて、船長 L_{pp} で割ることで平均加速度振幅[G]を得る。

STEP 6 で 0.9 を掛けた場合：

$$A(L_{pp}/B, \beta, ss, Hw_{(1/3)}) = A'(L_{pp}/B, \beta, ss) \frac{Hw_{(1/3)}}{L_{pp}}$$

STEP 6 で 0.9 を掛けていない場合：

$$A(L_{pp}/B, \beta, ss, Hw_{(1/3)}) = \frac{A'(L_{pp}/B, \beta, ss) (Hw_{(1/3)})^2}{L_{pp} \left(\frac{T_1}{3.86} \right)^2} = \frac{A'(L_{pp}/B, \beta, ss) (Hw_{(1/3)})^2}{L_{pp} \left(\frac{\lambda}{3.86^2 \times 1.56} \right)}$$

但し、 $Hw_{(1/3)} < 0.9 \times \left(\frac{T_1}{3.86} \right)^2 = 0.9 \times \left(\frac{\lambda}{3.86^2 \times 1.56} \right)$ の時

$$A(L_{pp}/B, \beta, ss, Hw_{(1/3)}) = A'(L_{pp}/B, \beta, ss) \frac{Hw_{(1/3)}}{L_{pp}}$$

STEP 8 有義値および 1/1000 最大期待値

以下の関係式から有義値および 1/1000 最大期待値が求まる。

下向き加速度振幅はレイリー分布より、

$$\text{平均振幅} = 1.25 \times \text{加速度の標準偏差}$$

$$1/3 \text{ 最大平均値 (有義振幅)} = 2.00 \times \text{加速度の標準偏差} = 1.60 \times \text{平均振幅}$$

$$1/1000 \text{ 最大期待値 (振幅)} = 3.87 \times \text{加速度の標準偏差} = 3.096 \times \text{平均振幅}$$

上向き加速度振幅はサビツキーが提案する Eq.4-2-18 により、

$$1/3 \text{ 最大平均値 (有義振幅)} = 2.0986 \times \text{平均振幅}$$

$$1/1000 \text{ 最大平均値 (振幅)} = 7.9078 \times \text{平均振幅}$$

4. 2. 4. 8. 3 ケーススタディ

以下の船型および海象について、下向き船上上下加速度の有義値及び 1/1000 最大期待値を計算する。

$$L_{pp}=18.1 \text{ m}, \quad L_{pp}/B=4.11, \quad \beta \text{ at S.S. } 5.0 =24 \text{ deg}, \quad ss = 8.0$$

CASE 1 平均波周期 $T_1=6.7 \text{ sec}$ と有義波高 $H_{W(1/3)}=3.0 \text{ m}$ に対して、船速 25 knot での下向き船上上下加速度を求める。なお、衝撃加速度を緩和しない。

以下に、計算例を計算機による表記のまま掲載する。

STEP 1

shipA	B	20.788926
	C	0.5542429
shipB	B	13.520798
	C	0.6011482
shipC	B	14.256421
	C	0.5575214
shipLI	B	16.66872
	C	0.5933426

STEP 2

$$A'_A = 12.77740193$$

$$A'_B = 7.353646459$$

$$A'_C = 8.687780283$$

$$A'_U = 9.24750187$$

STEP 3

$$A'(L_{pp} / B) = 9.223111111 \quad \text{at S.S. } 10.0$$

STEP 4

$$A'(L_{pp} / B, \beta) = 8.664865819 \quad \text{at S.S. } 10.0$$

STEP 5

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 7.2207215 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -5.776577 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 6

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 7.2207215 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -5.776577 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 7

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{W(1/3)}) = 0.8099399 \quad [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{W(1/3)}) = -0.647952 \quad [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 8

$$1/3 \text{最大平均値} = 1.295038 \quad [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -1.036723 \quad [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

$$1/1000 \text{最大平均値} = 2.5075739 \quad [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -2.006059 \quad [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

CASE 2 平均波周期 $T_1=6.7 \text{ sec}$ と有義波高 $H_{w(1/3)}=3.0\text{m}$ に対して、船速 20 knot での下向き船上上下下加速度を求める。なお、衝撃加速度を緩和する。
以下に、計算例を計算機による表記のまま掲載する。

STEP 1

shipA	B	19.531406
	C	0.6250441
shipB	B	12.646819
	C	0.6263914
shipC	B	12.273025
	C	0.5784531
shipLI	B	15.555229
	C	0.6347493

STEP 2

$$A'_A = 6.731070915$$

$$A'_B = 4.33578824$$

$$A'_C = 5.065098384$$

$$A'_{LI} = 5.163209517$$

STEP 3

$$A'(L_{pp} / B) = 5.161396311 \quad \text{at S.S. 10.0}$$

STEP 4

$$A'(L_{pp} / B, \beta) = 5.063319631 \quad \text{at S.S. 10.0}$$

STEP 5

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 4.219433 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -3.375546 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 6

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 3.7974897 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -3.037992 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 7

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{w(1/3)}) = 0.6321105 \quad [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{w(1/3)}) = -0.505688 \quad [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 8

$$1/3 \text{最大平均値} = 1.0113769 \quad [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -0.809101 [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

$$1/1000 \text{最大平均値} = 1.9570142 [\text{G}] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -1.565611 [\text{G}] \quad (ss \leq 3.0)$$

CASE 3 下記の平均波周期と有義波高に対して船速 25 knot での下向き船上上下加速度を求める。なお、衝撃加速度を緩和しない。

T_1 [sec]	6.7	
$H_{W(1/3)}$ [m]	1.00	2.80

なお、有義波高 2.80m の場合は、CASE2 と同様の算出方法なので割愛する。
以下に、計算例を計算機による表記のまま掲載する。

STEP 1

shipA	B	20.788926
	C	0.5542429
shipB	B	13.520798
	C	0.6011482
shipC	B	14.256421
	C	0.5575214
shipLI	B	16.660419
	C	0.5933426

STEP 2

$$A'_A = 9.422107404$$

$$A'_B = 5.110986304$$

$$A'_C = 6.379957087$$

$$A'_{LI} = 6.490882488$$

STEP 3

$$A'(L_{pp} / B) = 6.596947194 \quad \text{at S.S. 10.0}$$

STEP 4

$$A'(L_{pp} / B, \beta) = 6.484208208 \quad \text{at S.S. 10.0}$$

STEP 5

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 5.4035077 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -4.322806 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 6

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = 5.4035077 \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss) = -4.322806 \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 7

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{W(1/3)}) = 0.2985363 \quad [G] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$A'(L_{pp} / B, \beta, ss, H_{W(1/3)}) = -0.238829 \quad [G] \quad (ss \leq 3.0)$$

STEP 8

$$1/3\text{最大平均値} = 0.4776581 \quad [G] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -0.382127 [G] \quad (ss \leq 3.0)$$

$$1/1000\text{最大平均値} = 0.9242685 [G] \quad (3.0 \leq ss)$$

$$= -0.739415 [G] \quad (ss \leq 3.0)$$

4. 2. 4. 8. 4 加速度算出法(その2)

さらに簡便な方法として、4 船型 (Ship A, Ship B, Ship C, Ship LI) に対する Eq.2-2-25 を次式のように変換し、

$$y = \frac{B}{3.86^2 \times 1.56} \times x^2 \times e^{-Cx} \quad (4-2-25a)$$

原点を通る 4 次関数

$$y = Ix^4 + Jx^3 + Kx^2 + Lx \quad (4-2-27)$$

で近似した場合の加速度算出方法を示す。ここで、 y は平均加速度振幅 A [G]、 x は波長船長比 λ/L_{pp} である。なお、最小二乗近似により求めた Eq.4-2-27 の係数を Table 4-2-8、近似曲線を Fig.4-2-39 に示す。

さらに Eq.4-2-27 の各係数を縦軸、 F_n を横軸として、Eq.4-2-28 で近似した係数を Table4-2-9 に示す。

$$y = Mx^4 + Nx^3 + Ox^2 + Px + Q \quad (4-2-28)$$

平均加速度振幅ならびに有義値および 1/1000 最大期待値の算出手順 STEP 0～STEP 8のうち、STEP 1 と STEP2 のみ以下のように変更となる。

STEP 1

Table 4-2-9 と Eq.4-2-28 を用いて Ship A, Ship B, Ship C, Ship LI の船速 U_{kt} [knot]での Eq.4-2-27 中の係数 I, J, K, L を求める。なお、フルード数 F_n は次式で計算する。

$$F_n = \frac{(1.852 \times 1000 \div 3600 \times U_{kt})}{\sqrt{g L_{pp}}}$$

STEP 2

Eq.4-2-27 により、Ship A, Ship B, Ship C, Ship LI の波長船長比 λ/L_{pp} での平均加速度振幅 A_A, A_B, A_C, A_{LI} [G]を求め、この値に $(L_{pp} \times 3.86^2 \times 1.56) \div \lambda$ を掛けて無次元平均加速度振幅 $A'_A, A'_B, A'_C, A'_{LI}$ [G]を求める。

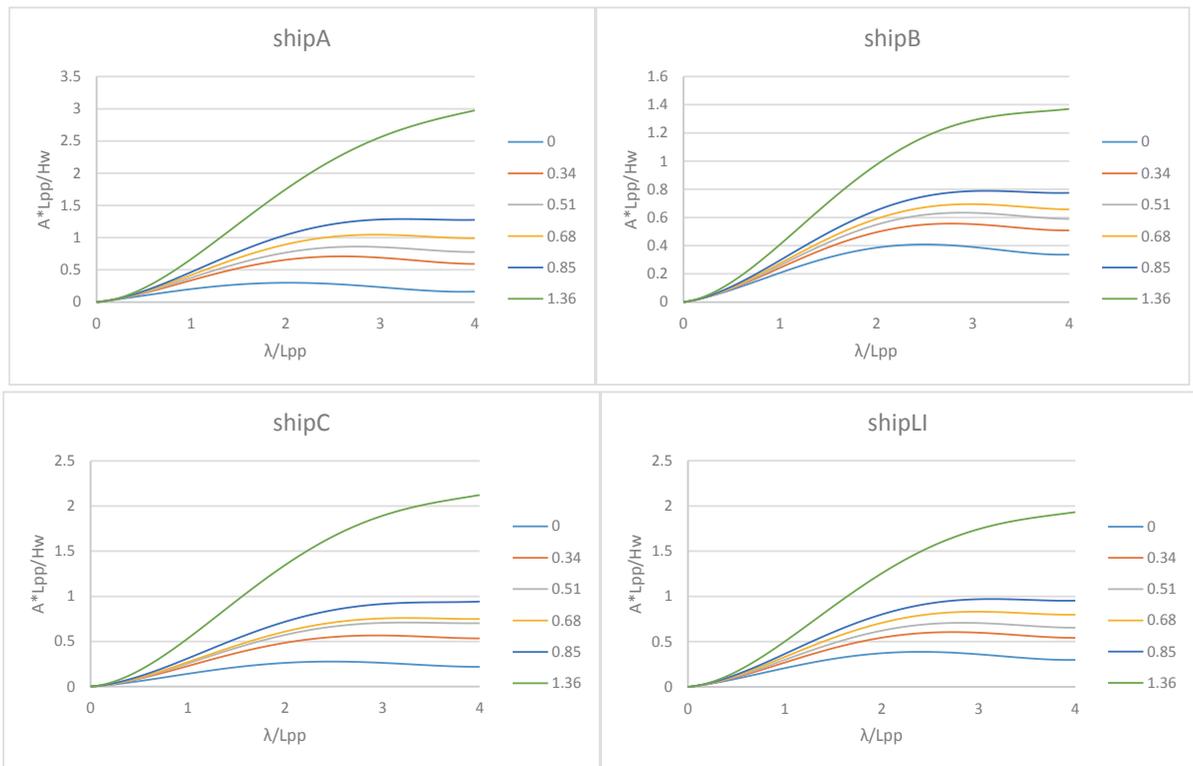


Fig.4-2-39 The curve fitting results of quartic equation for Eq.4-2-25a.

Table 4-2-8 The coefficients I , J , K and L in Eq.4-2-27 obtained by least square fitting for average upward and downward peak value of vertical acceleration on hull of Ship A, Ship B, Ship C and Ship LI.

	Upward				downward			
Ship A	I	J	K	L	I	J	K	L
$Fn=0$	0.0086	-0.0669	0.1158	0.1082	0.0095	-0.0674	0.0838	0.1758
$Fn=0.34$	0.0192	-0.194	0.5536	0.0863	0.0175	-0.1493	0.316	0.1529
$Fn=0.51$	0.0203	-0.2279	0.7568	0.0671	0.0192	-0.1684	0.378	0.1478
$Fn=0.68$	0.0196	-0.2344	0.8548	0.0543	0.0207	-0.1875	0.4456	0.1403
$Fn=0.85$	0.0177	-0.2288	0.9335	0.0403	0.022	-0.2058	0.5183	0.1306
$Fn=1.36$	0.0136	-0.2216	1.2446	0.0191	0.0238	-0.2577	0.8143	0.0865
Ship B	I	J	K	L	I	J	K	L
$Fn=0$	0.0082	-0.0787	0.2053	0.0451	0.0109	-0.0897	0.1787	0.1071
$Fn=0.34$	0.0078	-0.0812	0.243	0.0317	0.0125	-0.1107	0.2514	0.0942
$Fn=0.51$	0.0099	-0.1054	0.327	0.0372	0.0131	-0.1184	0.2814	0.0886
$Fn=0.68$	0.0122	-0.1343	0.4344	0.0424	0.0139	-0.1276	0.3104	0.0895
$Fn=0.85$	0.014	-0.1605	0.5517	0.0432	0.0148	-0.1389	0.3499	0.0882
$Fn=1.36$	0.011	-0.1644	0.8173	0.0185	0.0189	-0.1944	0.5703	0.0801
Ship C	I	J	K	L	I	J	K	L
$Fn=0$	0.0083	-0.0702	0.1487	0.072	0.0074	-0.0612	0.1218	0.073
$Fn=0.34$	0.0106	-0.1078	0.3075	0.0479	0.0112	-0.1016	0.2415	0.0761
$Fn=0.51$	0.0104	-0.1166	0.3872	0.0343	0.0121	-0.1124	0.2797	0.0738
$Fn=0.68$	0.0102	-0.1223	0.446	0.0283	0.0126	-0.1192	0.3037	0.0731
$Fn=0.85$	0.0096	-0.1239	0.5056	0.0218	0.0143	-0.1364	0.3561	0.0782
$Fn=1.36$	0.0109	-0.1773	0.9957	0.0153	0.0208	-0.2161	0.6429	0.0855
Ship LI	I	J	K	L	I	J	K	L
$Fn=0$	0.0093	-0.0809	0.1806	0.0721	0.0109	-0.0878	0.1659	0.1183
$Fn=0.34$	0.0117	-0.1185	0.3383	0.0527	0.0138	-0.1202	0.2667	0.1088
$Fn=0.51$	0.0135	-0.1516	0.5034	0.0446	0.0151	-0.134	0.3077	0.1104
$Fn=0.68$	0.0144	-0.1698	0.607	0.0414	0.0164	-0.148	0.3518	0.1108
$Fn=0.85$	0.0149	-0.1867	0.7265	0.0369	0.0176	-0.1621	0.3989	0.11
$Fn=1.36$	0.0105	-0.1721	0.9666	0.0148	0.0199	-0.2052	0.602	0.0845

Table 4-2-9 The coefficients L , M , N , O and P in Eq.4-2-28 for the coefficients I , J and K in Eq.4-2-27 of Ship A, Ship B, Ship C and Ship LI vs Fn .

Ship A	upward					downward				
	M	N	O	P	Q	M	N	O	P	Q
I	0.0028	0.0187	-0.0654	0.0511	0.0086	-0.0188	0.0567	-0.0633	0.0392	0.0095
J	-0.2249	0.3624	0.1869	-0.4725	-0.0669	0.1818	-0.5669	0.6203	-0.3925	-0.0674
K	1.4133	-3.1832	1.56162	1.1007	0.1154	-0.4435	1.5026	-1.6183	1.0741	0.0839
L	-0.0848	0.268	-0.2488	-0.0094	0.1082	0.0813	-0.2572	0.2412	-0.1224	0.1758

Ship B	upward					downward				
	M	N	O	P	Q	M	N	O	P	Q
I	0.0082	-0.0453	0.0604	-0.0168	0.0082	-0.0061	0.0185	-0.0161	0.008	0.0109
J	-0.0389	0.334	-0.5281	0.1352	-0.0787	0.0077	-0.0575	0.0731	-0.0745	-0.0897
K	0.0057	-0.5027	1.1729	-0.2298	0.2053	0.0794	-0.0624	-0.0605	0.2181	0.1786
L	0.1147	-0.3974	0.4168	-0.1398	0.0451	-0.0717	0.1651	-0.0868	-0.0222	0.1071

Ship C	upward					downward				
	M	N	O	P	Q	M	N	O	P	Q
I	-0.0003	0.0112	-0.0229	0.0131	0.0083	-0.0175	0.0546	-0.0518	0.0234	0.0074
J	-0.0959	0.125	0.0505	-0.1377	-0.0702	0.1082	-0.3908	0.4091	-0.2196	-0.0611
K	0.8164	-1.5891	0.8724	0.3251	0.1486	-0.0699	0.5602	-0.7613	0.5584	0.1216
L	-0.0652	0.1715	-0.103	-0.055	0.072	-0.1752	0.4569	-0.3508	0.0819	0.073

Ship LI	upward					downward				
	M	N	O	P	Q	M	N	O	P	Q
I	0.0091	-0.328	0.0274	0.0014	0.0093	-0.0024	0.0049	-0.0044	0.0095	0.0109
J	-0.179	0.5825	-0.5092	-0.0017	-0.0808	0.0225	-0.0701	0.0732	-0.1129	-0.0878
K	0.9772	-2.8998	2.6511	-0.1206	0.1802	-0.0367	0.2234	-0.2664	0.3618	0.1659
L	-0.039	0.0646	0.0006	-0.0643	0.0721	0.0395	-0.1633	0.1845	-0.0729	0.1183

4. 2. 5 まとめ

模型船を用いた規則波および不規則波中での船上上下加速度計測実験を行い、船上上下加速度の計測方法および解析方法を検討するとともに、船上上下加速度の特性を調べ、以下の知見を得た。

1. 実験及び解析方法について検討し、サンプリング周波数の決め方およびここで対象とする衝撃加速度のピーク値を計測するためのサンプリング周波数を示した。また、不規則波中の計測では統計的に有意となる計測データ数を示した。
2. 上下揺れと縦揺れの変位または船上 2 点での上下加速度計測値を用いて船体船長方向加速度分布を算出する方法を示した。
3. 規則波中の船上上下加速度は、波高および船速の増加に伴って衝撃加速度が発生し、その時系列データは正弦波形ではなくなり、船体前方では上向き加速度の最大値は下向き加速度の最大値より大きくなる。また、船上上下加速度が最も小さくなる前後位置は、S.S. 3.0 ~ 1.5 付近にあり、出会い波周期が短くなると後方へ移動する。
4. 規則波中船上上下加速度は、波高および船速の増加に伴う衝撃加速度の発生により、波高に対して非線形に増加する。また、衝撃加速度の発生する波高は、出会い周期の二乗に比例する。
5. 上向き加速度の最大値は、衝撃加速度の発生により波高に対して非線形に増加する。一方下向き加速度の最大値は、波高の増加に伴い線形に増加し、その大きさが 1.0 G に近づくと 1.0 G を若干上回る値に収束する。
6. 船上上下加速度の計測結果を簡易な数式で整理する方法を示した。また、この結果を用いて任意の船長方向位置での船上上下加速度を求める方法を示した。
7. 不規則波中の船上上下加速度も規則波中と同様に上向き加速度振幅と下向き加速度振幅の特徴が異なる。衝撃加速度が発生しない場合上向き加速度振幅はレイリー分布、衝撃加速度発生時の上向き加速度振幅はサビツキーの提案するワイブル分布となる。一方、下向き加速度振幅はその平均値がおおよそ 0.5G を超えない場合はレイリー分布、0.5G を超える場合はレイリー分布に比べて最頻値が大きくなる傾向が見られる。
8. 船上上下加速度振幅は、 L_{pp} 、 L_{pp}/B および β の影響を受け、デッドライズ角が大きくなる、船長が短くなるまたは船体が幾何学的に大きくなると加速度振幅は減る。
9. 本研究で計測したデータに基づき、船体の要目 (L_{pp} 、 L_{pp}/B および β) が与えられた時の不規則波中船上上下加速度分布を推定する方法を示し、その短期予測および長期予測値の算出方法を示した。

参考文献

- 1) 大隅三彦：続・中測定の一設計法，船の科学，船舶技術協会，Vol.45，pp.35-43，1992.
- 2) 木原和之：耐航性能を考慮した高速艇の設計法に関する研究（その1），西部造船協会第71回例会，pp.107-116，1985.
- 3) 木原和之，石井哲郎：耐航性能を考慮した高速艇の設計法に関する研究（その2），西部造船協会第72回例会，pp.293-300，1986.
- 4) Daniel Savitsky, P.Ward Brown：Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water, Marine Technology, pp.381-400, 1976.
- 5) 独立行政法人海上技術安全研究所，高速船の座席・シートベルトの安全性に関する調査，平成19年度.
- 6) 橋爪豊，積山善規，福島正朗：複合積層材料の構造強度に関する研究，海上技術安全研究所報告，第1巻，第5号，2001.
- 7) 竹本博安：水面衝撃水圧に関する一考察，日本造船学会論文集，第156号，pp.314-322，1984.
- 8) ITTC – Recommended Procedures and Guidelines Seakeeping Experiments 7.5-02-07-02.1, p.6, 2011.

記号表

記号	単位 記載のない時	説明
A	G	加速度両振幅（大隅の値）
$A(+), A(-)$	G	上向き加速度振幅, 下向き加速度振幅
a	m/sec ²	加速度
a_{amp}	G	加速度片振幅＝加速度両振幅の半分（木原の値）
B	m	線幅
D, d	m	型深さ, 喫水
Fn		フルード数
GM_L	m	縦メタセンター高さ
g	m/sec ²	重力加速度
H_w	m	波高
L, L_{oa}, L_{pp}	m	船長, 全長, 垂線間長
L_{CG}	S.S.	重心前後位置
l	m	距離
ss	S.S.	Square Station number
T_1, T_e, T_p, T_w	sec	平均波周期, 出会い波周期, 縦揺れ固有周期, 波周期
W	tonf	排水量
z, z_a	m	上下揺れ変位, 上下揺れ片振幅
下付き FP, M, AP		位置を表す FP, Midship, AP
下付き f, c, a		実験で計測した位置に対応した前後位置 順に(S.S. 10.39), (S.S. 5.0), (S.S. -0.06)
下付き F, C, A		前, 中央, 後のおおよその位置を示す
下付き ss	S.S.	任意の ss であることを示す
下付き $(1/3), (ave), (1/10), (1/1000)$		有義値, 平均値, 10 分の 1 最大平均値, 1000 分の 1 最大期待値
β	deg	船体中央部デッドライズ角
ε_{HP}	rad	縦揺れの上下揺れに対する位相遅れ
κ_p	m	縦慣動半径
τ_0	deg	初期トリム
θ, θ_a	deg	縦揺れ変位角, 縦揺れ片振幅
λ	m	波長
ω, ω_e	rad/sec	波円周波数, 出会い波円周波数

5. 調査結果

5.1 あんえい号安全運航チャートの検討

5.1.1 安全運航限界の推定

第三あんえい号事故では、大きな動揺によって座席に座った状態で船体に1G以上の下向き加速度が一旦掛かって腰が浮き、続けて腰が座席にたたきつけられて旅客が負傷したと考えられていること¹⁾から、安全運航限界として、①航行中に予想される波浪に対して1G以上の下向き加速度が作用しないような船速（限界船速）、あるいは、②予定している船速で航行した場合に下向き加速度が1Gを超えない波高（限界波高）が考えられる。

ここでは、4.1節で報告した水槽実験における上下加速度の計測結果を基に、石垣島（西表島）―波照間島間の航海を想定して、下向き加速度の最大値を予測するとともに、下向き加速度が1Gを超えない船速及び有義波高の推定を行った。

(1) 上下加速度の最大値の推定

大隈²⁾は、船首上下加速度の実測値はレイリー分布による推定値と一致するとしている。また、3.4.2節に示したように昨年6月に実施したあんえい号の実船計測でも客室内の上下加速度の計測値は、ほぼレイリー分布となっていた。

そこで、上下加速度の極値の確率分布がレイリー分布で近似できるとして、西表島―波照間島間の片道航海で予想される下向き最大加速度の期待値（ ζ''_{max} ）を水槽実験で計測された下向き加速度の有義値（ $\zeta''_{1/3}$ ）と向波状態で波周期 T_m の波浪中を船速 V_s で航行した場合の出会い波数 N （表5.1-1）を用いて(5.1-1)式³⁾で推定した。

表 5.1-1 下向き最大加速度の期待値の推定に用いた出会い波数 N

波周期 (s)	船速:kn			
	10	15	20	25
4.5	1,946	1,572	1,385	1,272
6.7	1,126	874	749	673
8.0	892	682	576	513

$$\frac{\zeta''_{max}}{\zeta''_{1/3}} = 0.706 \left(\sqrt{\ln N} + \frac{\gamma}{2\sqrt{\ln N}} \right) \quad (5.1-1)$$

ここで、 γ はオイラーの定数で約0.5722の値となる。

下向き最大加速度の期待値の推定結果を表5.1-2、表5.1-3に示す。事故発生時の有義波高 $H_{1/3}=1.91\text{m}$ 、波周期 $T_m=6.7\text{s}$ 、船速 $V_s=15\text{kn}$ の条件では、前部客室の第1列（最前列：Acc-1）位置での下向き最大加速度は、片道航海中に1.2Gを超えることが予測されており、船速が20knになると船体中央部座席（前部客室6列目：Acc-2）でも、下向き加速度の最大値が1Gを超える状況が想定される。

表 5.1-2 下向き最大加速度の期待値の推定結果（その 1）

①Acc-1 ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	船速Vs:kn			
	10	15	20	25
1.00	-	-0.66	-0.81	-0.96
1.50	-0.76	-1.00	-1.18	-
1.91	-	-1.24	-1.45	-

②Acc-1 ($H_{1/3}=1.00m$)

波周期 (s)	船速:kn			
	10	15	20	25
4.5	-	-	-0.86	-
6.7	-	-	-0.81	-
8.0	-	-	-0.66	-

③Acc-2 ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	船速Vs:kn			
	10	15	20	25
1.00	-	-0.50	-0.64	-0.78
1.50	-0.52	-0.75	-0.95	-
1.91	-	-0.93	-1.17	-

④Acc-2 ($H_{1/3}=1.00m$)

波周期 (s)	船速:kn			
	10	15	20	25
4.5	-	-	-0.65	-
6.7	-	-	-0.64	-
8.0	-	-	-0.53	-

⑤Acc-3 ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	船速Vs:kn			
	10	15	20	25
1.00	-	-0.44	-0.54	-0.62
1.50	-0.62	-0.76	-0.81	-
1.91	-	-0.94	-0.99	-

⑥Acc-3 ($H_{1/3}=1.00m$)

波周期 (s)	船速:kn			
	10	15	20	25
4.5	-	-	-0.59	-
6.7	-	-	-0.54	-
8.0	-	-	-0.44	-

表 5.1-3 下向き最大加速度の期待値の推定結果（その 2）

①Vs=10kn ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	x/Lwl		
	0.235	0.062	-0.345
1.50	-0.76	-0.52	-0.62

②Vs=15kn ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	x/Lwl		
	0.235	0.062	-0.345
1.00	-0.66	-0.50	-0.44
1.50	-1.00	-0.75	-0.76
1.91	-1.24	-0.93	-0.94

③Vs=20kn ($T_m=6.7s$)

有義波高 $H_{1/3}(m)$	x/Lwl		
	0.235	0.062	-0.345
1.00	-0.81	-0.64	-0.54
1.50	-1.18	-0.95	-0.81
1.91	-1.45	-1.17	-0.99

④Vs=20kn ($H_{1/3}=1.00m$)

波周期 (s)	x/Lwl		
	0.235	0.062	-0.345
4.5	-0.86	-0.65	-0.59
6.7	-0.81	-0.64	-0.54
8.0	-0.66	-0.53	-0.44

(2) 限界速度、限界波高の推定

表 5.1-2、表 5.1-3 に示した上下加速度の最大期待値（図 5.1-1～図 5.1-4 に一部を図示）から、事故時と同じ波周期 ($T_m=6.7s$) の場合に、西表島一波照間島間の片道航海で下向き加速度の最大値が 1G を超過しない限界速度、限界波高を推定（内挿）した。

限界速度の推定値を表 5.1-4 に示す。最前列の座席では、有義波高 1.5m の波浪中では 16kn 程度の船速で航行すると、西表島一波照間島間の片道航海中に 1 度は下向き加速度が 1G を超えると推測される。なお、前部客室の第 5 列目までの使用を制限すると、限界船速は 6kn 程度速く約 21kn に設定できると推測される。

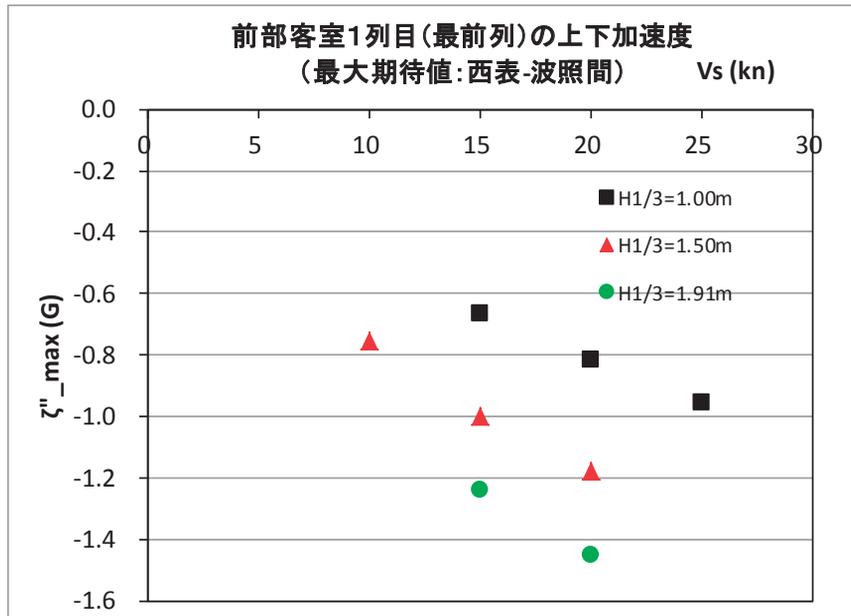


図 5.1-1 下向き最大加速度の期待値 (船速影響) (前部客室 1 列目 : $T_m=6.7$ s)

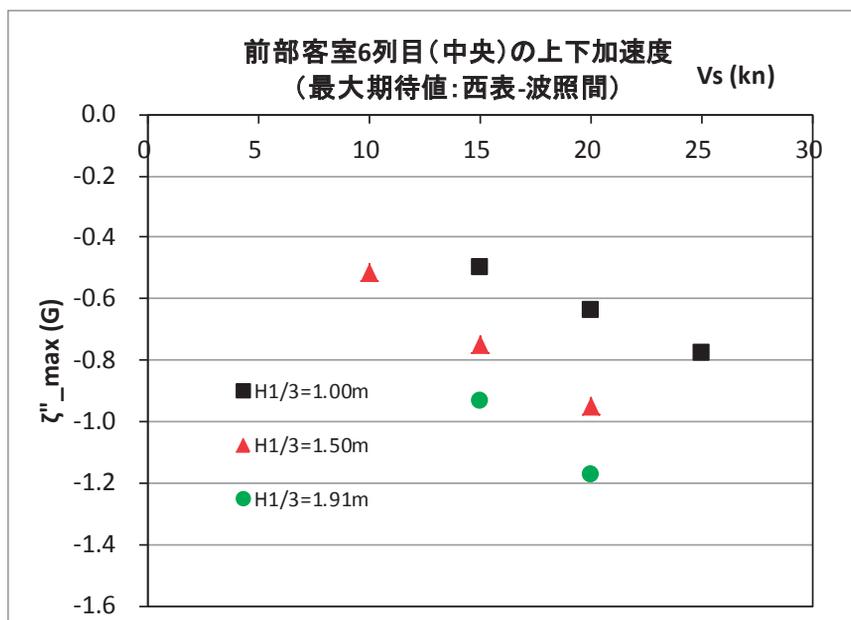


図 5.1-2 下向き最大加速度の期待値 (船速影響) (前部客室 6 列目 : $T_m=6.7$ s)

表 5.1-4 限界速度の推定結果

有義波高 (m)	限界速度 (kn)	
	前部客室 1列目	前部客室 6列目
1.00	26.5	33.0
1.50	15.5	21.1
1.91	9.4	16.4

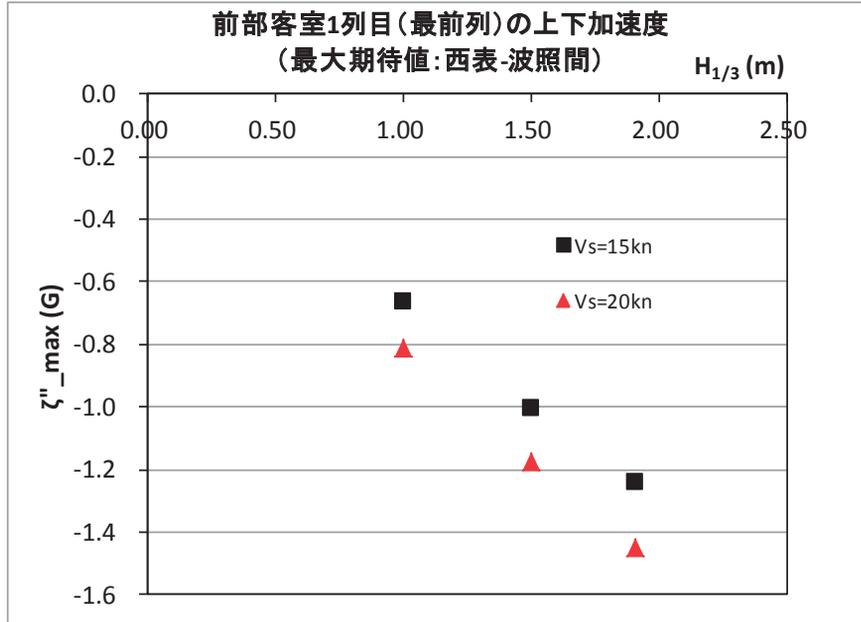


図 5.1-3 下向き最大加速度の期待値（波高影響）（前部客室 1 列目： $T_m=6.7$ s）

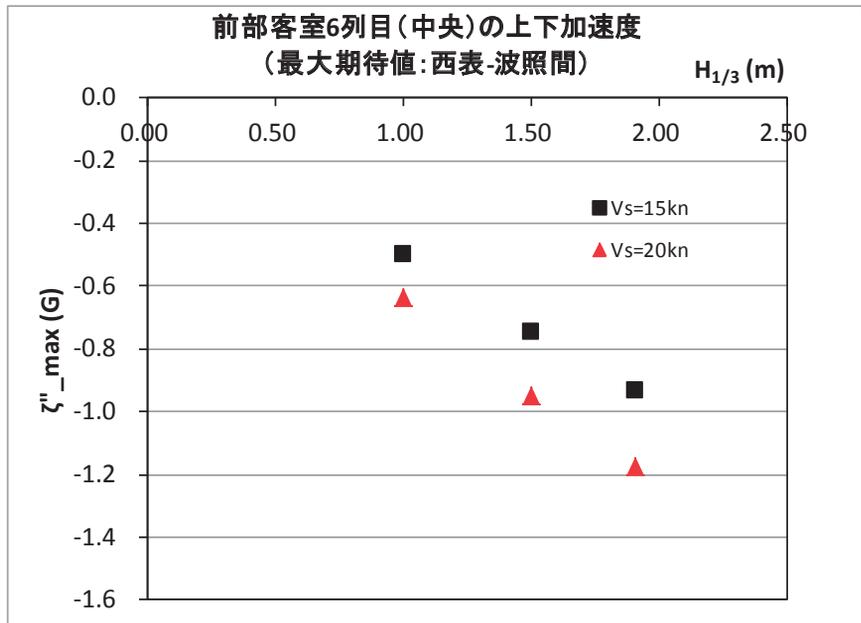


図 5.1-4 下向き最大加速度の期待値（波高影響）（前部客室 6 列目： $T_m=6.7$ s）

表 5.1-5 限界波高の推定結果

速度 (kn)	限界波高(m)	
	前部客室 1列目	前部客室 6列目
15	1.52	2.04
20	1.26	1.61

限界波高の推定値を表 5.1-5 に示す。西表島一波照間島間を 15kn で航行する場合、最前列の座席で片道航海中に下向き加速度が 1G を超えないようにするには、波高 1.5m 以下でなければならないと推測される。なお、前部客室の第 5 列目までの使用を制限すると、限界波高は 0.5m 程度高く約 2m に設定できると推測される。

5.1.2 安全運航チャートの試設定

第三あんえい号の縮尺模型を用いた水槽実験結果を基に上下加速度の閾値を超過しない限界速力の計算を行い、安全運航チャートとして図表の形にまとめた（図 5.1-5、表 5.1-6）。

計算方法は 5.1.1 節に示した安全運航限界の推定に用いた方法と同じであり、付録 8 に示したように西表島一波照間島付近の海域の通年の平均波周期が約 6.4s であるので、計算に必要な下向き加速度の有義値としては波周期 6.7s での計測結果を用いた。なお、他船・他航路での安全運航チャートの設定を考慮して、限界速力の閾値は「出会波 1,000 波中の下向き加速度の最大期待値が 1G」とした。

図 5.1-5、表 5.1-6 で、制限航行時の限界速力の表記は、例えば、波高 1.0m の場合、1 列目の座席位置での上下加速度が閾値を超えないよう運航するためには、速力を 25kn 以下にする必要があることを意味する。

なお、波高 2.0m の場合、1 列目の座席位置では、限界速力が最低速力 10kn 未満となると推定されたが、参考のため計算結果を示した。

第三あんえい号事故¹⁾では、有義波高 1.91m の波浪中を速力 15kn で航行していたとされる状況で、前部客室 3 列目に座っていた乗客が負傷した。この波高の場合、図 5.1-5、表 5.1-6 に示した試設定した安全運航チャートでは、前部客室 3 列目で下向き加速度の最大期待値が 1G を超えない限界速力は 11kn であり、事故時より減速した運航が求められることになる。

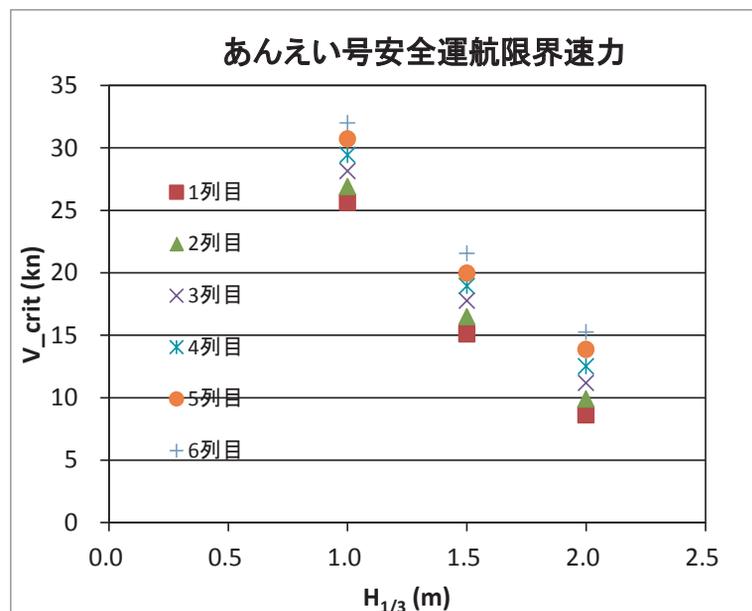


図 5.1-5 第三あんえい号の安全運航チャート（安全運航限界速力）の試設定

表 5.1-6 第三あんえい号の安全運航チャート（安全運航限界速力）の試設定

座席位置	波高				2.0m超
	～0.5m	～1.0m	～1.5m	～2.0m	
1列目	32ノット以上	25	15	9	10ノット未満
2列目		26	16	10	
3列目		28	17	11	
4列目		29	18	13	
5列目		30	19	14	
6列目		32	21	15	

座席位置・波高と速力の関係
 緑: 巡航速力で航行可能な範囲
 橙: 制限速力で航行すべき範囲
 黄: 10ノット未満に速力を制限すべき範囲

一方、第三あんえい号とほぼ同型の第三十八あんえい号事故⁴⁾では、有義波高 1.52m の波浪中を速力 15～20kn で航行していたとされる状況で、前部客室 3 列目に座っていた乗客が負傷した。この波高の場合、図 5.1-5、表 5.1-6 に示した試設定した安全運航チャートでは、前部客室 3 列目で下向き加速度の最大期待値が 1G を超えない限界速力は 17kn であり、事故時と同程度の速力となる。

図 5.1-5、表 5.1-6 に示した試設定した安全運航チャートは、出会波 1,000 波中の下向き加速度の最大期待値が 1G を超えない限界速力を示したものである。確率・統計論的には限界速力で航行している場合でも出会波 1,000 波中の下向き加速度の最大値が 1G を超える状況が発生する。そのため、同種事故を防止し安全運航を確保するためには、図 5.1-5、表 5.1-6 に示した限界速力を目安に運航するとともに、出会波に応じた適宜の減速及び不可避免的な過大な上下加速度の発生に備えたシートベルトの着実な着用が必須と考えられる。

参考文献

- 1) 運輸安全委員会：2 旅客船第三あんえい号旅客負傷事故、船舶事故調査報告書 MA2013-3、平成 25 年 3 月
- 2) 大隅三彦：続・中速艇の一設計法（1）、船の科学第 45 巻第 12 号、pp.35-43、平成 4 年 12 月
- 3) 元良誠三監修：船体と海洋構造物の運動学、成山堂書店、pp.197、昭和 57 年 11 月
- 4) 運輸安全委員会：3 旅客船第三十八あんえい号旅客負傷事故、船舶事故調査報告書 MA2013-3、平成 25 年 3 月

5.2 波浪中高速航走に伴う腰椎損傷回避のための加速度基準についての考察

第三あんえい号事故では、大きな動揺によって座席に座った身体に 1.0G 以上の下向き加速度が一旦掛かって腰が浮き、続けて腰が座席にたたきつけられて旅客が負傷したと考えられている。船上において腰椎損傷が発生するのは、①非常に大きな上向き加速度が直接座席から身体に作用した時、②座席に 1.0 G 以上の下向き加速度が作用し、人体が座席から浮き上がった後に座面と衝突し（落下加速度 1.0 G + 船体の上向き加速度が作用した結果）した時と考えられる。

以上の考察をもとに、Table 5-2-1 に、波高に対する限界船速の評価方法を示す。

Table 5-2-1 評価方法

方法 1 (①に対応)	上向き加速度に閾値を設け、船体長手方向各位置で評価する。
考え方	人体に大きな上向き加速度が働き、腰椎に過度の圧縮荷重(6.67 N 以上：5%損傷発生確率)が作用したときに腰椎損傷を生じる。そのため、圧縮荷重 6.67 N 以上となる上向き加速度を避ける。
注意点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 船上加速度と腰椎にかかる荷重の関係を知る必要がある。 ・ 同加速度でも人体が浮き上がる場合（シートベルト等の固縛なし）荷重は増加 ・ シートクッション性により同加速度に対し荷重は軽減
方法 2 (②に対応)	下向き加速度 1.0 G を閾値とし、船体長手方向各位置で評価する。
考え方	人体が浮き上がり落下しながら上昇する座面と衝突し脊椎損傷を生じる。人体が座面から浮き上がる下向き加速度 1.0 G を避ける。
注意点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 座席の下向き加速度が 1.0 G より小さい時、人体は座面から浮き上がらないのでシートベルトの有無は影響しない。 ・ シートクッション性により荷重は軽減
方法 3	重心前後位置での上向き or 下向き加速度の大きさが-1.0 G を超える。
考え方	HSC コードの設計加速度 (Chapter 4.3.1)

上記の 3 方法に基づき、船速と波高の限界ラインを求めた。

方法 1 での上向き加速度の閾値は、「高速船の座席・シートベルトの安全性に関する調査」中の図 5.2 から次のように決めた。トッピーと同等のシートで、人体が①のような加速度を受けて垂直に 6.67 N の衝撃荷重が作用する加速度は、体の座面からの浮き上がりなし（シートベルトで固縛）時 7.7 G、2 cm 程度浮き上がる（普通にシートベルトを使用）時 6.9 G、10 cm 程度浮き上がる（シートベルトなし）時 5.8 G である。参考として、同調査によると、シートのクッションを良くすることで荷重を最大で 1.0 N 程度軽減できる。なお、骨の強さは個人差があり、安全率をかける必要がある。そこで、シートベルトなし時の 5.8 G に安全率をかけて上向き加速度 5.0 G を閾値とする。また、参考のために閾値をさらに厳しくした 4.0 G および 3.0 G の計算も行った。計算結果を Fig.5-2-1 から Fig.5-2-3 に示す。

Fig.5-2-4 の方法 1（マーク）、方法 2（青線）、方法 3（赤線）の結果の比較を示す。方法 2 の結果は方法 1 の上向き加速度 5.0 G の結果と比べ各 ss での結果が左に位置し、方法 2 は方法 1 を含むことがわかる。また、方法 2 の結果は方法 1 の上向き加速度 4.0 と 3.0 G の間にあることがわかる。方法 3 の HSC コードに従う結果は、方法 2 の S.S. 8.0 と S.S. 6.0 の間にあることがわかる。

方法 1 で上向き加速度の閾値が 3.0~4.0 G となるのは、人体が座面から完全に浮き上がった状況に相当すると考えられる。「高速船の座席・シートベルトの安全性に関する調査」図 4.15 および図 5.2 を参考に浮き上がり量を検討した結果、30 cm 程度ではないかと予想する。

以上の結果を整理すると

- 船上での腰椎損傷の原因として①と②の両方が考えられる。
- ①と②では、発生する速度および波高の関係は異なる。
- ここで対象とした船舶に対しては、①を対象とした方法 1 で上向き加速度の閾値を 5.0 G とした結果は②を対象とした方法 2 の結果に含まれる。
- ここで対象とした船舶に対しては、方法 1 で上向き加速度の閾値を 3.0 G まで厳しくすると、方法 2 の結果は方法 1 の結果に含まれる。
- ここで対象とした船舶に対しては、方法 3 の結果は方法 2 の S.S. 8.0~S.S. 6.0 の間の結果に相当する。
- ここで対象とした船舶に対しては、方法 3 の結果は方法 1 での閾値 5.0 G より厳しい閾値 4.0 G の S.S. 8.0 またはさらに厳しい閾値 3.0 G の S.S. 6.0 の結果に相当する。

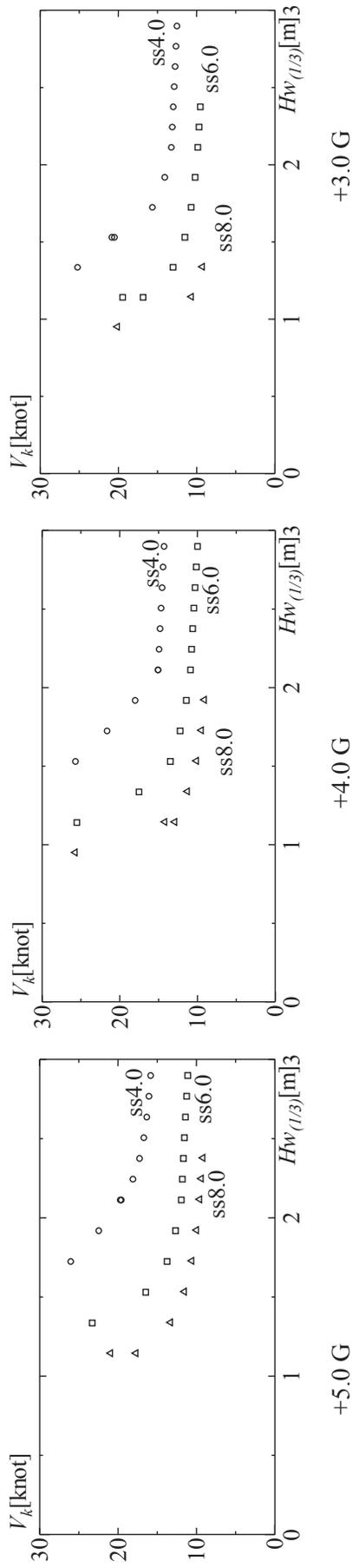


Fig.5-2-1 方法1 上向き加速度の 1/1000 最大平均値(有義値の 3.77 倍)が 5.0, 4.0, 3.0 G となる波高と速度 (加速度ごとに整理)



Fig.5-2-2 方法2 下向き加速度の 1/1000 最大平均値が-1.0 G となる波高と船速 (レイリー分布として算出、有義値の 1.93 倍)

Fig.5-2-3 方法3 重心前後位置で上向きおよび下向き加速度の 1/1000 最大平均値が+1.0G となる波高と速度
上向き(有義値の 3.77 倍)、下向き(有義値の 1.93 倍)

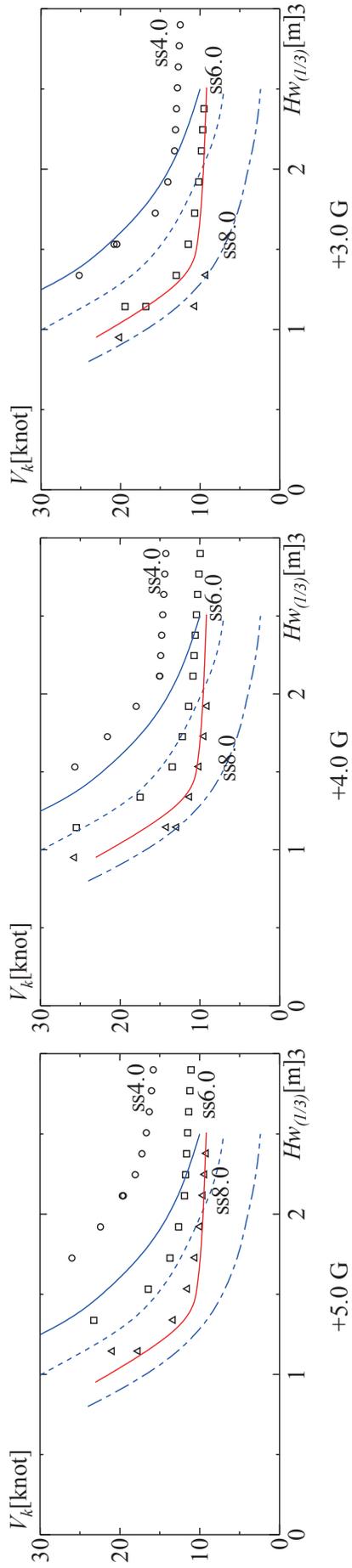


Fig.5-2-4 3つの方法の結果の比較 (方法1: マーク、方法2: 青線、方法3: 赤線)

5.3 下向き加速度が 1.0 G となる波高と船速についての船型影響

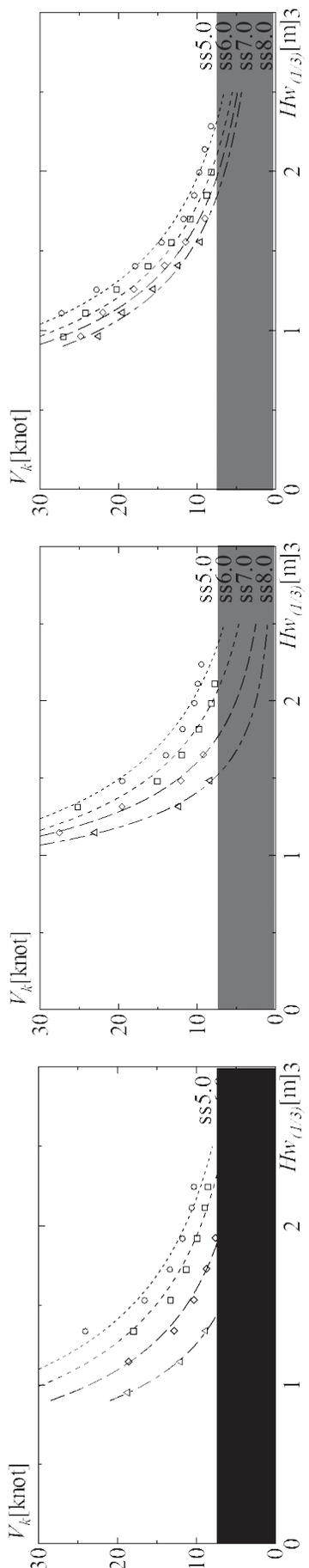
異なる 3 船型に対する不規則波中船上上下下加速度の計測結果から 1/3 有義加速度を求め、これを用いて下向き加速度の 1/1000 最大平均値が-1.0 G となるときの波高と船速、またその時の上向き加速度の 1/1000 最大平均値(≒1/1000 最大期待値の近似値とほぼ同じ)を求めた。なお、1/1000 最大平均値の算出にあたっては、下向き加速度はレイリー分布 (Rayleigh distribution) に従うとして有義値を 1.93 倍、上向き加速度はワイブル分布 (Weibull distribution) に従うとして有義値を 3.77 倍した。

Fig.5-3-1 から Fig.5-3-3 に、Ship A, Ship C, Ship B について、S.S. 5.0~S.S. 8.0 での算出結果を示す。同図では、上向き加速度の算出結果に、前進速度の等値線を示す。同図から、どの船型においても 10 knot 以上で航走するとき 2.0 G 以上の上向き加速度が生じている。また、船速の増加により上向き加速度は増加する。一方、波高の増加に対しては船型によって傾向が異なり、必ずしも上向き加速度は単調に大きくはならない。これは、本実験では波高が増加するに伴って波長が増加し、波長船長比が 1.0~4.0 の範囲で変化するため、その影響が現れたためである。

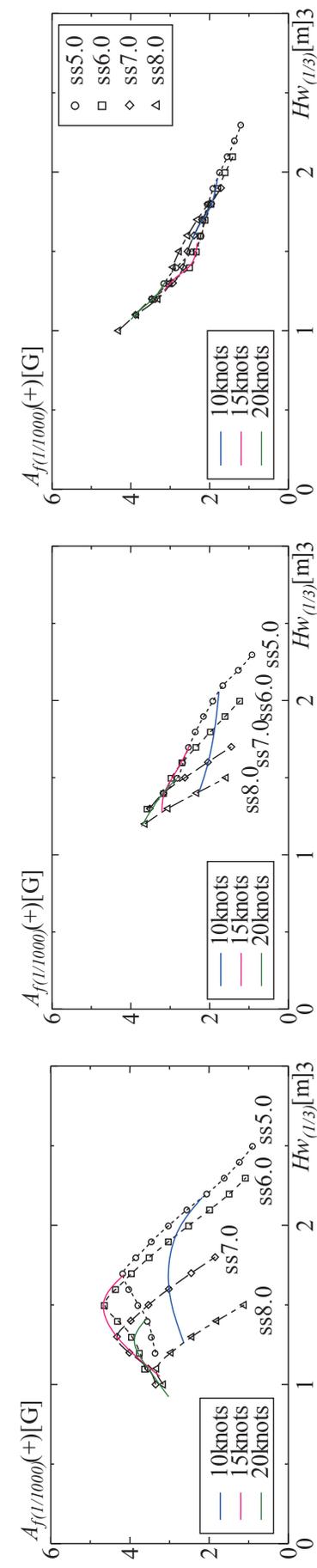
Fig.5-3-4 に、Ship A, Ship C, Ship B の S.S. 8.0 および S.S. 5.0 での比較を示す。3 船型の結果は重なるものの、詳細を見るとそれぞれ異なった結果を示す。また、長手方向位置が異なると、3 船型の結果の並びも異なる結果となった。下向き加速度-1.0 G 発生時の上向き加速度を見ると、波高に対する加速度の変化の傾向は、Ship A が他の 2 船型とは大きく異なる。また、長手方向位置が異なると上向き加速度が最も大きくなる船型も変わる。

Fig.5-3-5 に海上技術安全研究所の算出結果との比較を示す。本実験結果は海上技術安全研究所の結果に比べて厳しい (安全側の評価) 結果となった。これは、有義波高 1.0 m および 2.0 m の時は、海上技術安全研究所での実験に比べて本実験では波周期が短く、同じ船速では出会い周期が短くなり、その周波数影響が現れたためである。

最後に、参考のため、上記計算のもととなった Ship A, Ship C, Ship B の横断面 (S.S. 5.0~S.S. 10) での下向き加速度 1/1000 最大平均値算出結果を Fig.5-3-6 から Fig.5-3-8 に示す。

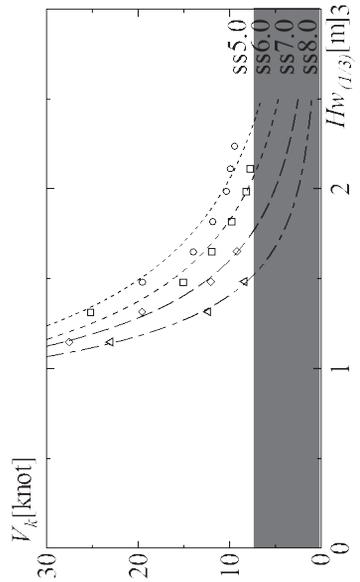


下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となる波高と船速 (レイリー分布として算出、有義値の1.93 倍) : 左下は加速度が低い領域

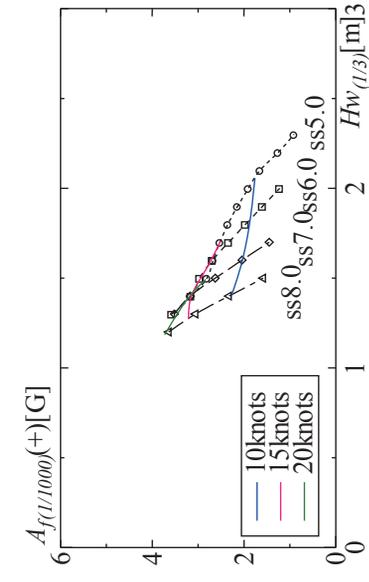


下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となるときの上がり加速度 (ワイブル分布として算出、有義値の3.77 倍)

Fig.5-3-1 Ship A

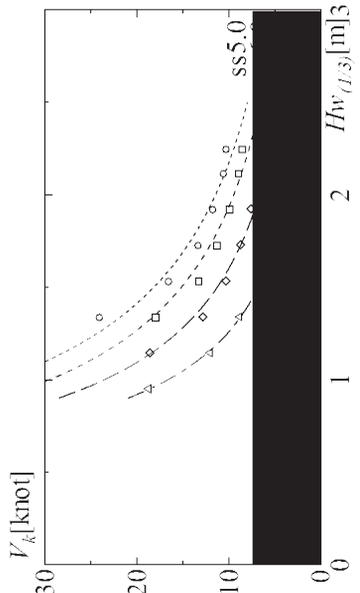


下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となる波高と船速 (レイリー分布として算出、有義値の1.93 倍) : 左下は加速度が低い領域

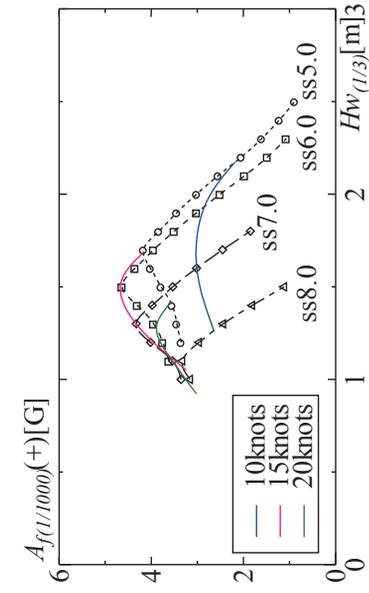


下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となるときの上がり加速度 (ワイブル分布として算出、有義値の3.77 倍)

Fig.5-3-2 Ship C

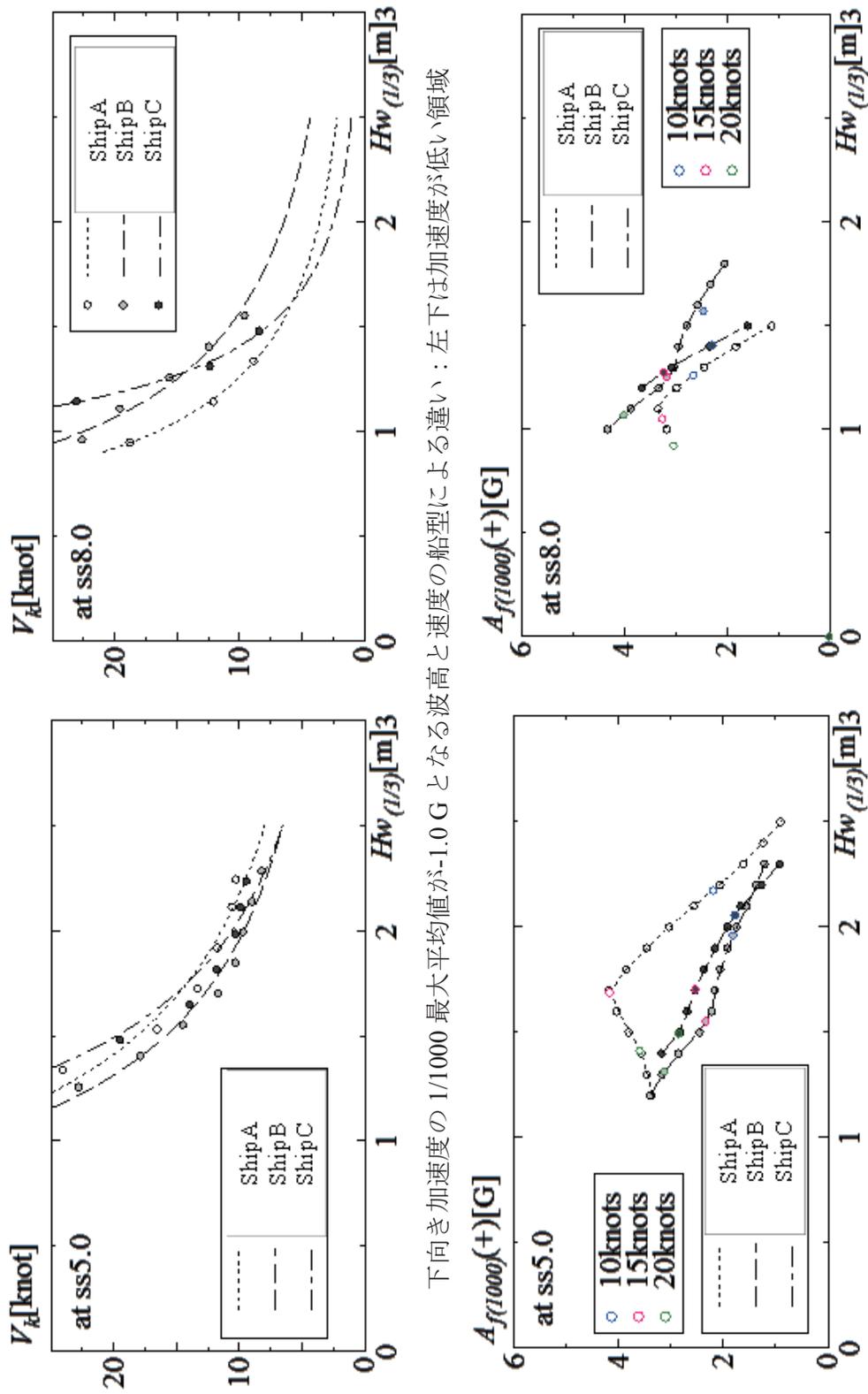


下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となる波高と船速 (レイリー分布として算出、有義値の1.93 倍) : 左下は加速度が低い領域



下向き加速度の1/1000 最大平均値が-1.0 G となるときの上がり加速度 (ワイブル分布として算出、有義値の3.77 倍)

Fig.5-3-3 Ship B



下向き加速度の 1/1000 最大平均値が-1.0G となる波高と速度の船型による違い：左下は加速度が低い領域

上向き加速度の 1/1000 最大平均値が+1.0G となる波高と速度の船型による違い

Fig.5-3-4 Ship A, Ship B, Ship C, Ship B の S.S. 8.0 および S.S. 5.0 での比較

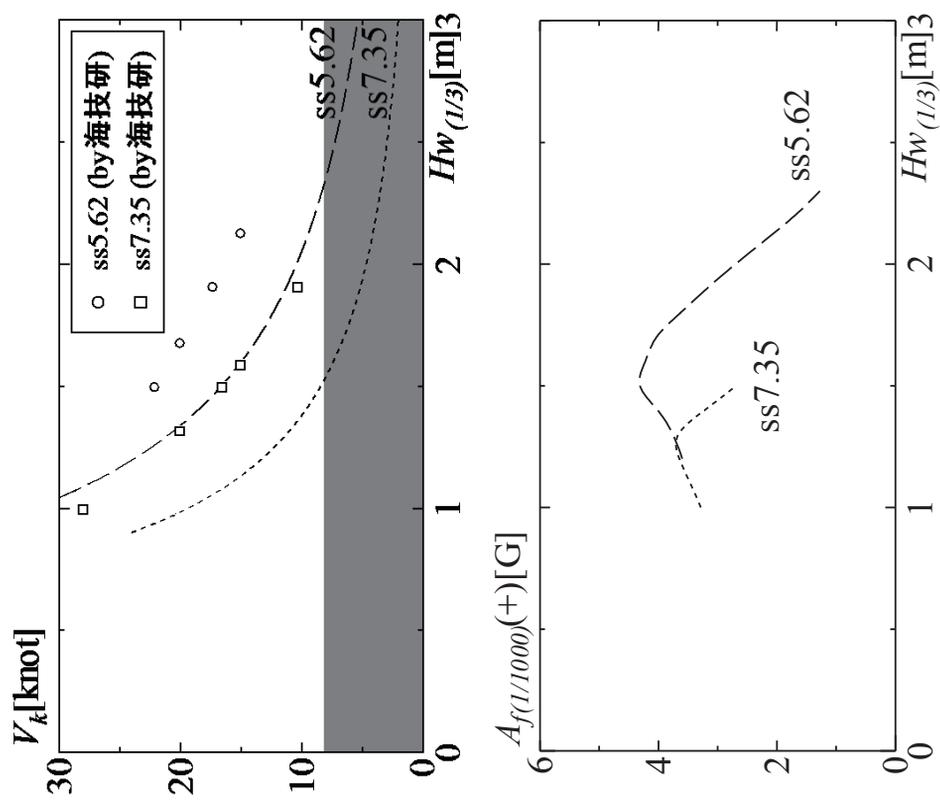


Fig.5-3-5 Ship A について下向き加速度の 1/1000 最大平均値が-1.0 G となる波高と速度の海技研の結果との比較 (上図)、
その時の上向き加速度 (下図)

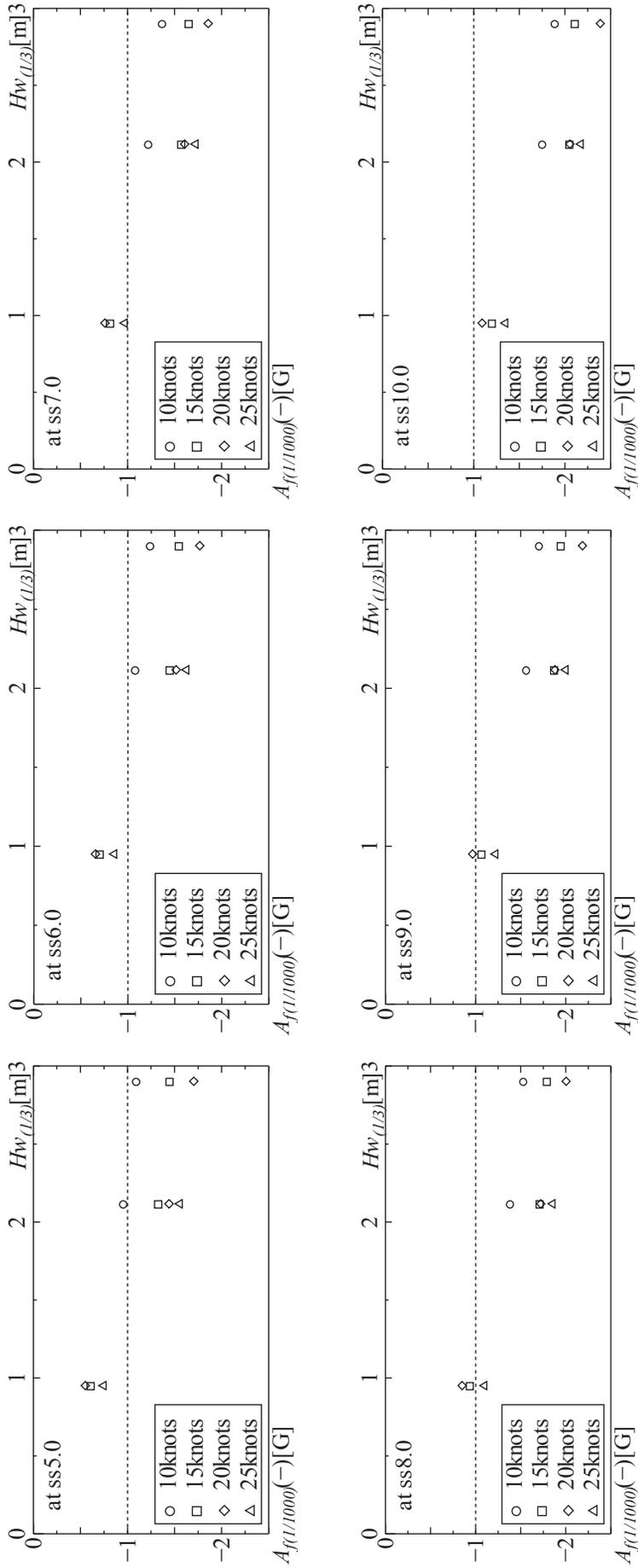


Fig.5-3-6 Ship A の横断面 (S.S. 5.0~S.S. 10.0) での下向き加速度の 1/1000 最大平均値 (レイリー分布として算出、有義値の 1.93 倍)

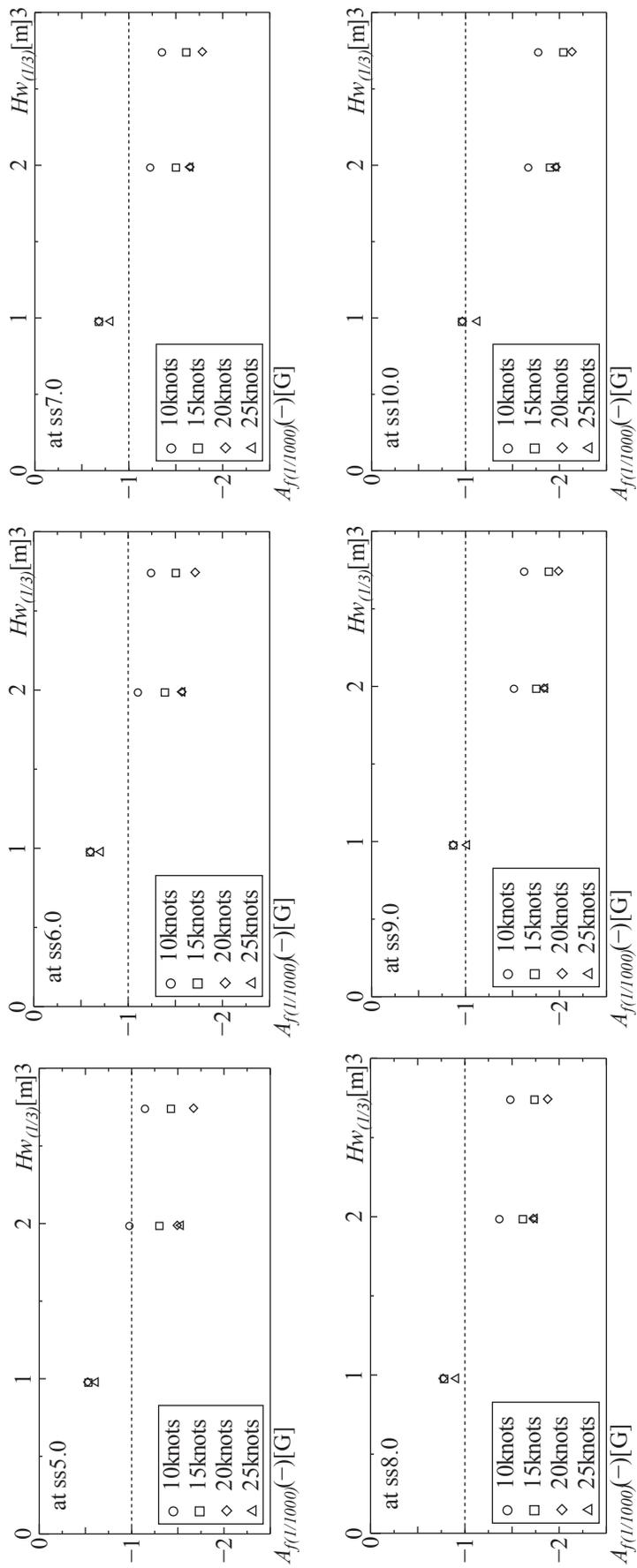


Fig.5-3-7 Ship C の横断面 (S.S. 5.0~S.S. 10.0) での下向き加速度の 1/1000 最大平均値 (レイリ一分布として算出、有義値の 1.93 倍)

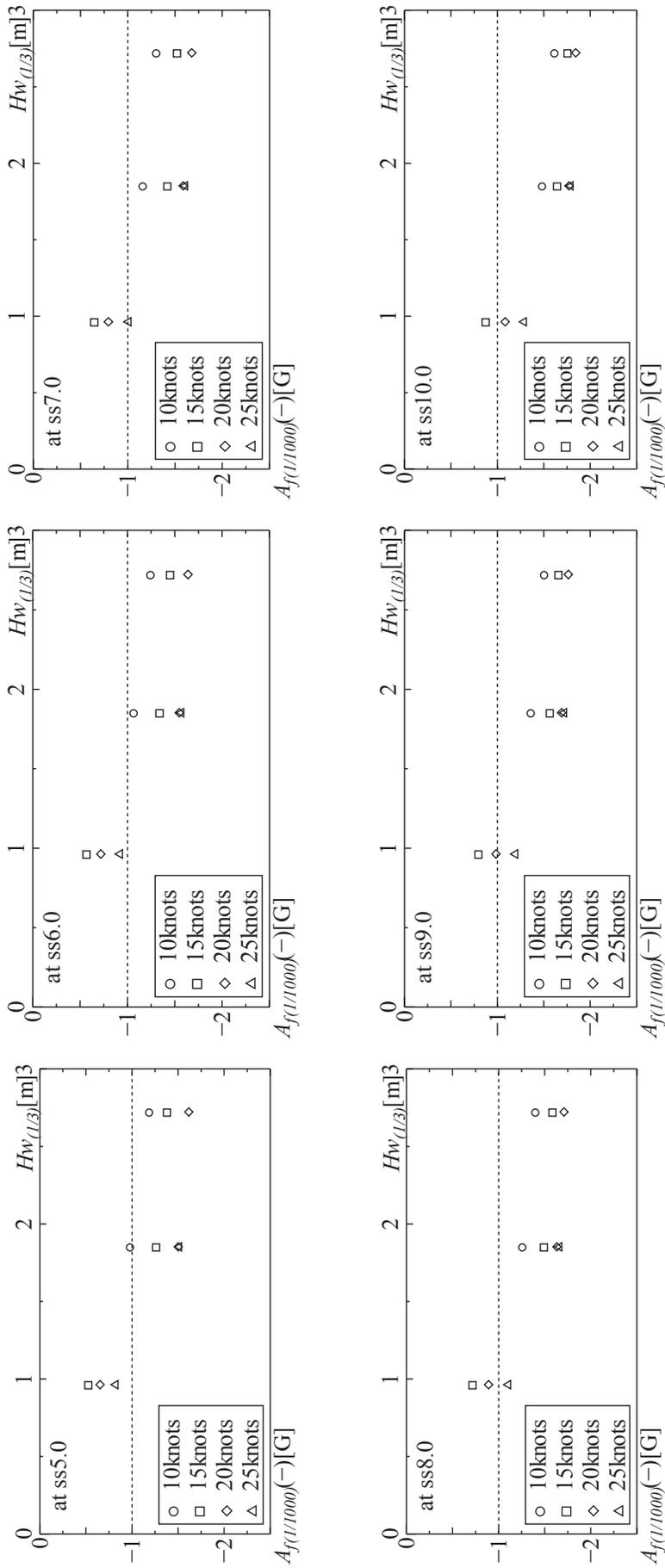


Fig.5-3-8 Ship B の横断面 (S.S. 5.0~S.S. 10.0) での下向き加速度の 1/1000 最大平均値 (レイリー一分布として算出、有義値の 1.93 倍)

5.4 船型影響を考慮した小型高速旅客船の安全運行のための操船資料の作成方法

小型高速旅客船の船上上下加速度は船型の影響を受ける。ここでは、「船長」「船長船幅比」「船体中央断面デッドライズ角」を船型パラメタとして、任意船型の「下向き加速度振幅の 1/1000 最大期待値が 1.0 G となる波高と船速」を推定する方法を示す。

4-2-4-6 節に示す式等を直接用いる方法であり、対象とする海象の有義波高 $H_{W(1/3)}$ [m] と平均波周期 T_1 [sec] が $T_1=3.86 \times (H_{W(1/3)})^{0.5}$ に従う場合とそうでない場合に分けて示す。

$T_1=3.86 \times (H_{W(1/3)})^{0.5}$ に従う場合

STEP 0

対象とする船型の以下のデータを用意する。

船長 L_{pp} [m]、船長船幅比 L_{pp}/B 、船体中央断面デッドライズ角 β [deg]

計算したい船長方向位置 ss [ss. Number]、前進速度 U_{kt} [knot]

STEP 1

船長方向位置 ss [S.S. Number] で、下向き加速度振幅の 1/1000 最大期待値が 1.0 G となるのは、FP での平均加速度振幅[G]が 1/3.096 を Eq.4-2-23 の値で割った値のときである。なお、急峻な衝撃加速度の影響を和らげる場合はさらに 0.9 で割る。

STEP 2

Eq.4-2-27 の左辺に STEP 1 の解、右辺の各係数に Table 4-2-8 のフルード数 Fn ごとの係数を代入して $x (= \lambda/L_{pp})$ を求める。なお、実際には次式を解けばよい。

$$1/3.096 \div \left(\frac{A_{ss}(-)_{(ave)}}{A_{FP}(-)_{(ave)}} \right) \quad \text{or} \quad 1/3.096 \div 0.9 \div \left(\frac{A_{ss}(-)_{(ave)}}{A_{FP}(-)_{(ave)}} \right) = Ix^4 + Jx^3 + Kx^2 + Lx$$

しかし、4 次方程式の解を求めるのは簡単ではない。Table 5-4-1 および Table 5-4-2 に急峻な衝撃加速度の影響を和らげない場合と和らげた場合の、前後位置 S.S. Number = 10, 9, 8, 7, 6, 5 およびフルード数 $Fn=0.0, 0.34, 0.51, 0.68, 0.85, 1.36$ の時の計算結果を示す。Table 5-4-1 または Table 5-4-2 を用いる場合は、求めたい船速の前後 2 点、求めたい前後位置の前後 2 点の組み合わせの計 4 点の計算を行い、結果を線形補間して答えを得る。

STEP 3

フルード数に対する波高 $H_{W(1/3)}$ は STEP 2 で得られた x に $L_{pp} \div (3.86^2 \times 1.56)$ を掛けることで求まる。また、フルード数 Fn は次式で U_{kt} [knot] となる。

$$U_{kt} = \frac{Fn \sqrt{g L_{pp}}}{(1.852 \times 1000 \div 3600)}$$

ここで求めた波高を、 $H_{WA}(U_{kt}), H_{WB}(U_{kt}), H_{WC}(U_{kt}), H_{WLi}(U_{kt})$ とする。

STEP 4 船長船幅影響

$H_{WB}(U_{kt}), H_{WA}(U_{kt})$ の各船型の船長船幅比 $L_B/B_B, L_A/B_A$ に対する変化の割合を用いて、次式で船長船幅比 L_{pp}/B での波高 $H_W(L_{pp}/B)$ を求める。

$$Hw(L_{pp}/B) = Hw_B(U_{kt}) \left\{ 1 + \frac{(Hw_A(U_{kt}) - Hw_B(U_{kt}))(L_{pp}/B - L_B/B_B)}{Hw_B(U_{kt})(L_A/B_A - L_B/B_B)} \right\}$$

STEP 5 デッドライズ角影響

$Hw_{Li}(U_{kt})$, $Hw_C(U_{kt})$ の各船型のデッドライズ角 β_{Li} , β_C に対する変化の割合を用いて、次式でデッドライズ角 β での無次元平均加速度振幅 $Hw(L_{pp}/B, \beta)$ を求める。

$$Hw(L_{pp}/B, \beta) = Hw(L_{pp}/B) \left\{ 1 + \frac{(Hw_C(U_{kt}) - Hw_{Li}(U_{kt}))(\beta - \beta_{Li})}{Hw_{Li}(U_{kt})(\beta_C - \beta_{Li})} \right\}$$

STEP 6 グラフの作成

縦軸を U_{kt} 、横軸を $Hw_{(1/3)}$ としたグラフ上の計算結果を ss ごとに示す。

$T_1 = 3.86 \times (Hw_{(1/3)})^{0.5}$ に従わない場合 (平均波周期が与えられている場合)

STEP 0

対象とする船型の以下のデータを用意する。

船長 L_{pp} [m]、船長船幅比 L_{pp}/B 、船体中央断面デッドライズ角 β [deg]

計算したい船長方向位置 ss [ss. Number]

計算したい平均波周期 T_1 [sec] (および波長船長比 $\lambda/L_{pp} = 1.56 \times T_1^2/L_{pp}$)

STEP 1

船長方向位置 ss [ss. Number] で、下向き加速度振幅の 1/1000 最大期待値が 1.0 G となるのは、FP での平均加速度振幅[G]が 1/3.096 を Eq.4-2-23 の値で割った値のときである。なお、急峻な衝撃加速度の影響を和らげる場合はさらに 0.9 で割る。

STEP 2

Eq.4-2-25 に波長船長比を代入し、無次元平均加速度振幅 A' を求める。

STEP 1 で 0.9 で割った場合は次式で x を求める。

$$1/3.096 \div 0.9 \div \left(\frac{A_{ss}(-)_{(ave)}}{A_{FP}(-)_{(ave)}} \right) = A'x$$

STEP 1 で 0.9 で割っていない場合は次式で x を求める。

$$1/3.096 \div \left(\frac{A_{ss}(-)_{(ave)}}{A_{FP}(-)_{(ave)}} \right) = \frac{A'x^2}{\left(\frac{T_1^2}{3.86^2 \times L_{pp}} \right)}$$

ただし、 $x < 0.9 \times T_1^2 \div 3.86^2 \div L_{pp}$ となった時は

$$1/3.096 \div 0.9 \div \left(\frac{A_{ss}(-)_{(ave)}}{A_{FP}(-)_{(ave)}} \right) = A'x$$

STEP 3

フルード数に対する波高 $Hw_{(1/3)}$ は STEP 2 で得られた x に L_{pp} を掛けることで求まる。

また、フルード数 Fn は次式で U_{kt} [knot]となる。

$$U_{kt} = \frac{Fn \sqrt{g L_{pp}}}{(1.852 \times 1000 \div 3600)}$$

ここで求めた波高を、 $H_{wA}(U_{kt})$, $H_{wB}(U_{kt})$, $H_{wC}(U_{kt})$, $H_{wLl}(U_{kt})$ とする。

STEP 4 船長線幅影響

$H_{wB}(U_{kt})$, $H_{wA}(U_{kt})$ の各船型の船長線幅比 L_B / B_B , L_A / B_A に対する変化の割合を用いて、次式で船長線幅比 L_{pp} / B での波高 $H_w(L_{pp} / B)$ を求める。

$$H_w(L_{pp} / B) = H_{wB}(U_{kt}) \left\{ 1 + \frac{(H_{wA}(U_{kt}) - H_{wB}(U_{kt}))(L_{pp} / B - L_B / B_B)}{H_{wB}(U_{kt})(L_A / B_A - L_B / B_B)} \right\}$$

STEP 5 デッドライズ角影響

$H_{wLl}(U_{kt})$, $H_{wC}(U_{kt})$ の各船型のデッドライズ角 β_{Ll} , β_C に対する変化の割合を用いて、次式でデッドライズ角 β での無次元平均加速度振幅 $H_w(L_{pp} / B, \beta)$ を求める。

$$H_w(L_{pp} / B, \beta) = H_{wLl}(U_{kt}) \left\{ 1 + \frac{(H_{wC}(U_{kt}) - H_{wLl}(U_{kt}))(\beta - \beta_{Ll})}{H_{wLl}(U_{kt})(\beta_C - \beta_{Ll})} \right\}$$

STEP 6 グラフの作成

縦軸を U_{kt} 、横軸を $H_{w(1/3)}$ としたグラフ上の計算結果を ss ごとに示す。

Table 5-4-1 Sample of the calculation results of STEP 2 without reduction of impact acceleration for $ss=10, 9, 8, 7, 6, 5$.

Ship A	$ss=10$	9	8	7	6	5
$F_n=0.0$						
$F_n=0.34$	1.05368	1.13537	1.23599	1.36497	1.54091	1.81296
$F_n=0.51$	0.96271	1.0314	1.11433	1.21746	1.35103	1.53546
$F_n=0.68$	0.89042	0.94995	1.02095	1.10775	1.21731	1.326207
$F_n=0.85$	0.83104	0.88363	0.94583	1.02101	1.11441	1.23483
$F_n=1.36$	0.67936	0.71651	0.75975	0.81094	0.87284	0.94972

Ship B	$ss=10$	9	8	7	6	5
$F_n=0.0$	1.75904	2.06496				
$F_n=0.34$	1.39352	1.51549	1.67514	1.90454	2.34142	
$F_n=0.51$	1.29676	1.3992	1.52806	1.69915	1.95005	2.45683
$F_n=0.68$	1.23385	1.32637	1.44084	1.5886	1.79286	2.11948
$F_n=0.85$	1.155568	1.23902	1.3392	1.46547	1.63268	1.8736
$F_n=1.36$	0.91594	0.97199	1.03824	1.11825	1.21753	1.34536

Ship C	$ss=10$	9	8	7	6	5
$F_n=0.0$						
$F_n=0.34$	1.45365	1.5774	1.73849	1.96703	2.37612	
$F_n=0.51$	1.29339	1.38873	1.50654	1.65826	1.86695	2.19533
$F_n=0.68$	1.23658	1.32478	1.43272	1.56969	1.75317	2.02415
$F_n=0.85$	1.10581	1.17952	1.26817	1.3778	1.51858	1.70999
$F_n=1.36$	0.77438	0.81848	0.87007	0.931546	1.00648	1.10054

Ship LI	$ss=10$	9	8	7	6	5
$F_n=0.0$	1.85425					
$F_n=0.34$	1.27264	1.37773	1.51132	1.69216	1.97046	
$F_n=0.51$	1.15623	1.24347	1.35105	1.4892	1.6783	1.97288
$F_n=0.68$	1.06389	1.13901	1.23003	1.34381	1.49243	1.70093
$F_n=0.85$	0.988733	1.05504	1.13448	1.23222	1.35676	1.52388
$F_n=1.36$	0.804159	0.85052	0.90484	0.96972	1.04902	1.14896

Table 5-4-2 Sample of the calculation results of STEP 2 with reduction of impact acceleration for $ss=10, 9, 8, 7, 6, 5$.

Ship A	$ss=10$	9	8	7	6	5
$Fn=0.0$						
$Fn=0.34$	0.96542	1.03745	1.12549	1.23599	1.38172	1.59003
$Fn=0.51$	0.88728	0.94905	1.02315	1.11433	1.23056	1.38655
$Fn=0.68$	0.82437	0.87851	0.94283	1.02095	1.1864	1.24583
$Fn=0.85$	0.7725	0.82047	0.87736	0.94583	1.03037	1.13842
$Fn=1.36$	0.637203	0.6718	0.71212	0.75975	0.81723	0.88844

Ship B	$ss=10$	9	8	7	6	5
$Fn=0.0$	1.54314	1.72352	2.01945			
$Fn=0.34$	1.26719	1.37012	1.50042	1.67514	1.93749	2.5941
$Fn=0.51$	1.18776	1.27677	1.38671	1.52806	1.72199	2.02595
$Fn=0.68$	1.13417	1.21566	1.31516	1.44084	1.60788	1.85064
$Fn=0.85$	1.06718	1.14053	1.22911	1.3392	1.48166	1.67802
$Fn=1.36$	0.85325	0.90468	0.96532	1.03824	1.1282	1.24304

Ship C	$ss=10$	9	8	7	6	5
$Fn=0.0$						
$Fn=0.34$	1.32501	1.42985	1.56214	1.73849	1.99943	2.5559
$Fn=0.51$	1.19057	1.27463	1.37718	1.50654	1.67802	1.92566
$Fn=0.68$	1.14078	1.21916	1.31413	1.43272	1.58733	1.80347
$Fn=0.85$	1.02459	1.09112	1.17068	1.26817	1.39166	1.55575
$Fn=1.36$	0.72456	0.76546	0.81325	0.87007	0.9939126	1.02547

Ship LI	$ss=10$	9	8	7	6	5
$Fn=0.0$	1.58199	1.79598				
$Fn=0.34$	1.16168	1.25224	1.36487	1.51132	1.7167	2.06042
$Fn=0.51$	1.06202	1.13905	1.23291	1.35105	1.50716	1.73126
$Fn=0.68$	0.98164	1.04898	1.12997	1.23003	1.3583	1.53225
$Fn=0.85$	0.91545	0.9755	1.04709	1.13448	1.24453	1.38943
$Fn=1.36$	0.75188	0.794798	0.845019	0.90484	0.97773	1.06916

5.5 小型高速旅客船の安全運行のための12隻の操船資料

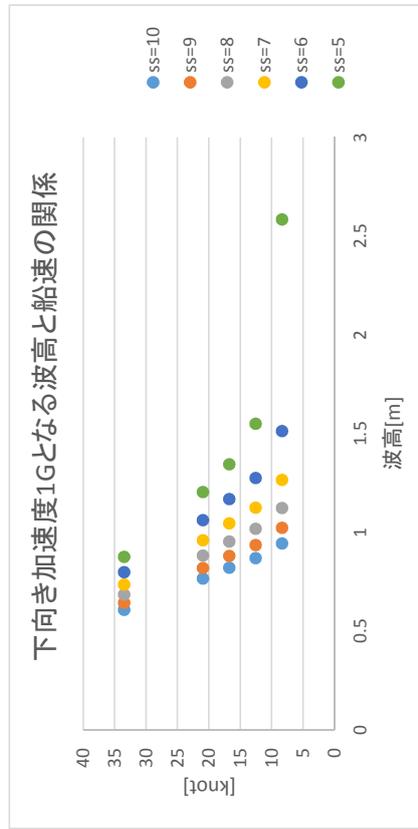
Table 5-5-1 に要目を示す12隻の小型高速旅客船について、s.s. 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 での「下向き加速度が1.0 Gとなる波高と船速」を求めた結果を Fig.5-5-1～5-5-12 示す。また、この結果をもとに、それぞれの船型で客席位置での「下向き加速度が1.0 Gとなる波高と船速」を補間により求めた結果も示す。（上図：-1.0 Gとなる波高 m、中図：-1.0 Gとなる ss、下図：-1.0 Gとなる船速 knot）

Table 5-5-1 小型高速旅客船12隻の要目

船名	長さ L_{pp} [m]	幅 B [m]	Midship デッドライズ角 β [deg]
exship1	20	4	12.5
exship2	19.103	4.28	19
exship3	19.66	3.8	12.1
exship4	22.01	4	11.5
exship5	16.21	4.16	12.5
exship6	22.18	3.9	17
exship7	22.03	3.9	16.5
exship8	13.94	4.3	15.5
exship9	19.13	4.04	11
exship10	13.82	4.01	20
exship11	13.42	4.37	13
exship12	13.7	3.8	20

exship1 (基準速度34.5knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
9	2.56	1.63	1.46	1.32	1.21	1.12				
14	1.75	1.50	1.34	1.22	1.12	1.05				
19	1.44	1.31	1.19	1.09	1.01	0.95				
23	1.38	1.24	1.13	1.04	0.97	0.91				
37	1.15	1.05	0.98	0.91	0.86	0.81				



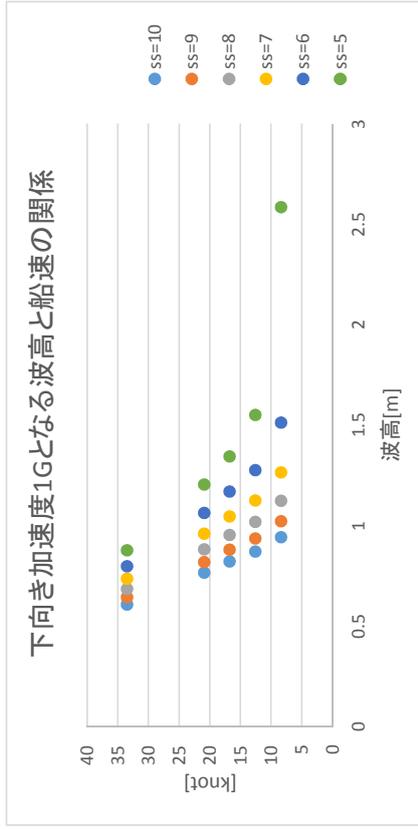
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.6	基準速度	10.6	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.2	基準速度	12.3	5knot以下	5knot以下	5knot以下
3列目	6.8	基準速度	14.0	5knot以下	5knot以下	5knot以下
4列目	6.4	基準速度	16.1	5knot以下	5knot以下	5knot以下
5列目	6.0	基準速度	18.4	5.9	5knot以下	5knot以下
6列目	5.6	基準速度	21.0	7.1	5.1	5.1

Fig.5-5-1 exship1

exship2 (基準速度30knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
9	2.36	1.51	1.28	1.14	1.04	0.96				
14	1.53	1.28	1.13	1.03	0.95	0.88				
18	1.33	1.17	1.05	0.96	0.89	0.83				
23	1.20	1.06	0.96	0.89	0.82	0.77				
36	0.87	0.79	0.73	0.69	0.64	0.61				



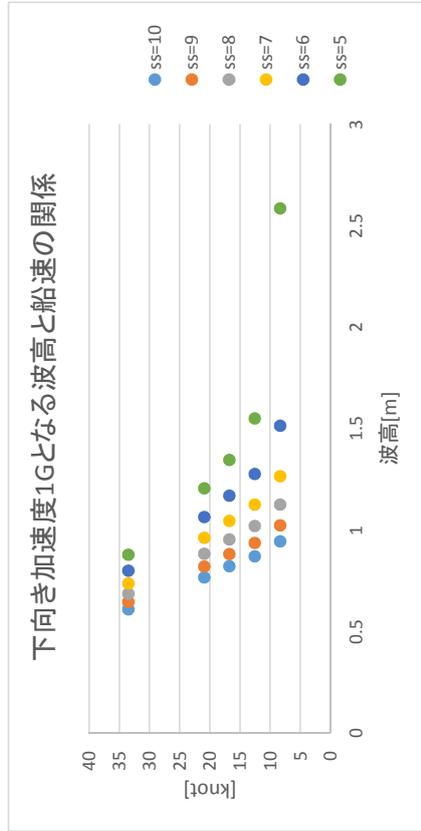
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.2	基準速度	20.7	6.0	5knot以下	5knot以下
2列目	6.8	基準速度	22.4	7.1	5knot以下	5knot以下
3列目	6.4	基準速度	24.2	8.2	5.6	5.6
4列目	6.0	基準速度	25.9	9.5	6.6	6.6
5列目	5.6	基準速度	27.5	11.3	7.6	7.6
6列目	5.2	基準速度	29.3	13.4	8.7	8.7

Fig.5-5-2 exship2

exship3 (基準速度32knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
9	2.48	1.64	1.48	1.34	1.23	1.15				
14	1.77	1.52	1.36	1.24	1.15	1.07				
18	1.45	1.32	1.20	1.11	1.03	0.96				
23	1.40	1.25	1.14	1.06	0.99	0.93				
37	1.18	1.08	1.00	0.93	0.88	0.83				



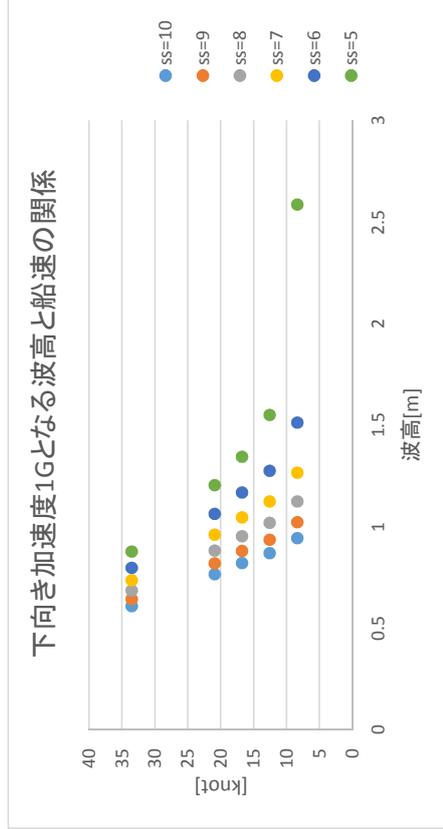
制限速度 (knot) の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.4	基準速度	9.5	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.0	基準速度	11.0	5knot以下	5knot以下	5knot以下
3列目	6.6	基準速度	12.7	5knot以下	5knot以下	5knot以下
4列目	6.2	基準速度	14.6	5knot以下	5knot以下	5knot以下
5列目	5.8	基準速度	16.8	5.7	5knot以下	5knot以下
6列目	5.4	基準速度	19.2	6.9	5.3	5.3

Fig.5-5-3 exship3

exship4 (基準速度42knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
10	2.32	1.66	1.51	1.38	1.27	1.18				
15	1.78	1.56	1.40	1.28	1.18	1.10				
19	1.45	1.34	1.23	1.13	1.05	0.99				
24	1.42	1.28	1.17	1.09	1.01	0.95				
39	1.22	1.12	1.04	0.97	0.91	0.87				



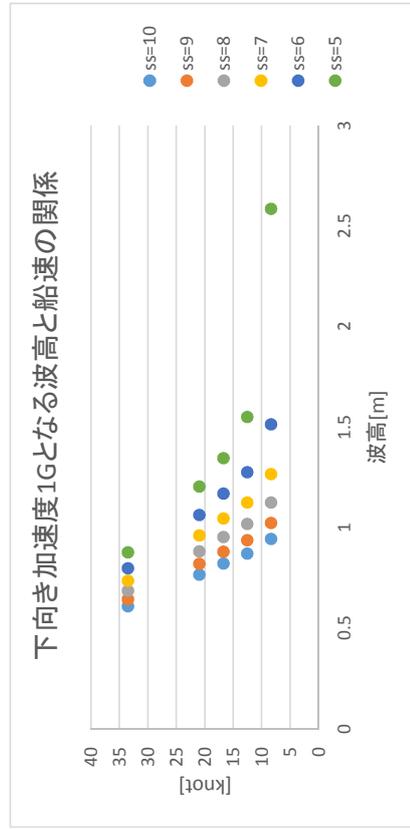
制限速度 (knot) の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.6	基準速度	12.0	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.2	基準速度	13.6	5knot以下	5knot以下	5knot以下
3列目	6.8	基準速度	15.5	5knot以下	5knot以下	5knot以下
4列目	6.4	基準速度	17.7	5.0	5knot以下	5knot以下
5列目	6.0	基準速度	20.1	6.1	5knot以下	5knot以下
6列目	5.7	基準速度	22.3	7.0	5knot以下	5knot以下

Fig.5-5-4 exship4

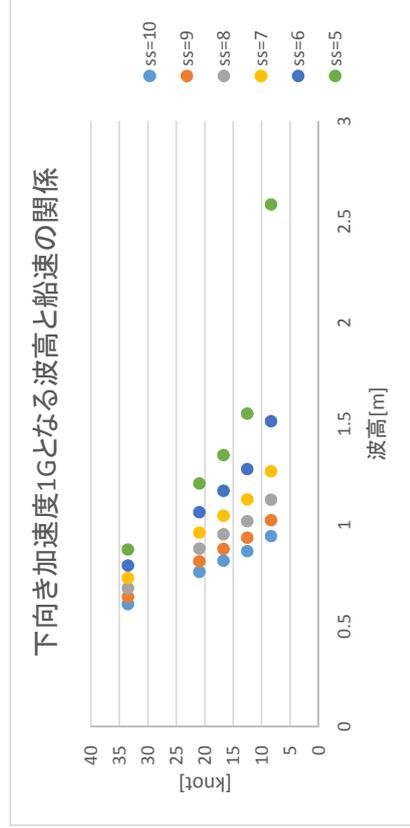
exship5 (基準速度23knot)

SS	knot									
	8	3.24	1.61	1.38	1.23	1.12	1.04	10		
12	1.77	1.45	1.27	1.15	1.05	0.98	9			
17	1.45	1.27	1.14	1.04	0.96	0.90	8			
21	1.36	1.20	1.08	0.99	0.92	0.86	7			
33	1.10	1.00	0.92	0.86	0.80	0.76	6			



exship6 (基準速度44knot)

SS	knot									
	10	1.87	1.57	1.40	1.27	1.17	1.08	9		
15	1.58	1.39	1.26	1.15	1.06	0.99	8			
19	1.35	1.25	1.13	1.05	0.97	0.91	7			
24	1.27	1.15	1.05	0.98	0.91	0.86	6			
39	1.00	0.92	0.85	0.80	0.75	0.71	5			



制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	6.4	基準速度	12.6	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	5.9	基準速度	15.3	5.4	5.2	5.2
3列目	5.5	基準速度	17.8	6.9	6.4	6.4
4列目	5.2	基準速度	19.8	8.1	7.4	7.4
5列目	4.8	基準速度	23.0	9.9	8.9	8.9
6列目	4.6	基準速度	基準速度	10.9	9.7	9.7

Fig.5-5-5 exship5

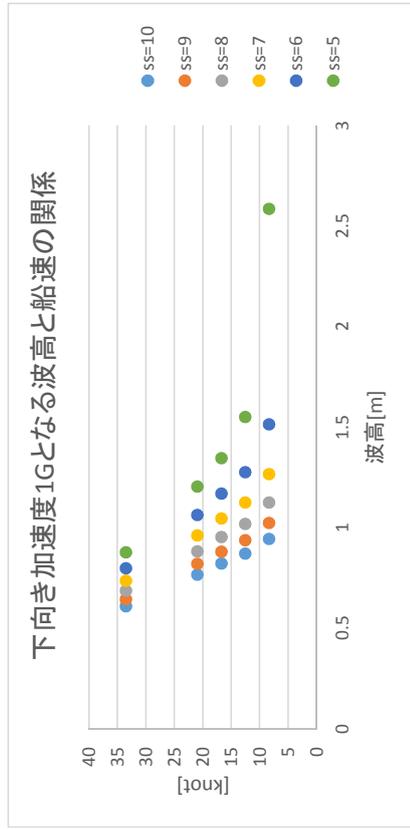
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.3	基準速度	18.9	5.4	5knot以下	5knot以下
2列目	7.0	基準速度	20.5	6.0	5knot以下	5knot以下
3列目	6.6	基準速度	22.5	6.9	5knot以下	5knot以下
4列目	6.3	基準速度	24.2	7.7	5.1	5.1
5列目	6.0	基準速度	25.8	8.5	5.7	5.7
6列目	5.6	基準速度	27.9	9.7	6.5	6.5

Fig.5-5-6 exship6

exship7 (基準速度39knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
10	1.92	1.58	1.41	1.28	1.18	1.09				
15	1.60	1.41	1.27	1.16	1.07	1.00				
19	1.36	1.25	1.14	1.05	0.98	0.92				
24	1.28	1.16	1.06	0.98	0.92	0.86				
39	1.02	0.94	0.87	0.81	0.77	0.73				



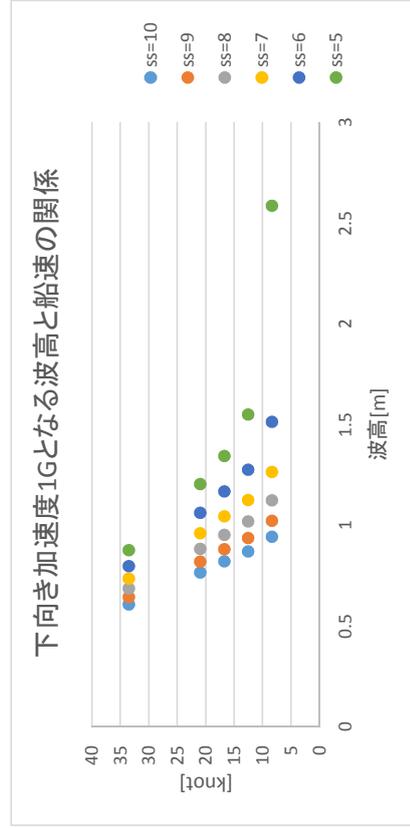
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.4	基準速度	17.5	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.1	基準速度	19.1	5.5	5knot以下	5knot以下
3列目	6.8	基準速度	20.7	6.2	5knot以下	5knot以下
4列目	6.4	基準速度	22.8	7.1	5knot以下	5knot以下
5列目	6.0	基準速度	25.1	8.2	5.5	5.5
6列目	5.7	基準速度	26.8	9.1	6.1	6.1

Fig.5-5-7 exship7

exship8 (基準速度25.2knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
8	3.34	1.55	1.27	1.12	1.02	0.94				
12	1.67	1.32	1.15	1.04	0.95	0.88				
15	1.41	1.20	1.06	0.96	0.89	0.82				
19	1.27	1.11	0.99	0.91	0.84	0.78				
31	0.96	0.86	0.79	0.74	0.69	0.65				



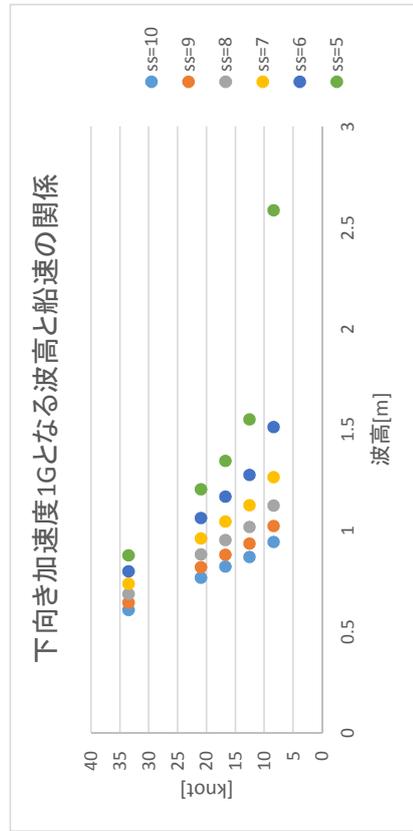
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.9	基準速度	6.0	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.6	基準速度	7.4	5knot以下	5knot以下	5knot以下
3列目	7.3	基準速度	8.9	5knot以下	5knot以下	5knot以下
4列目	7.0	基準速度	10.5	5knot以下	5knot以下	5knot以下
5列目	6.7	基準速度	12.0	5knot以下	5knot以下	5knot以下
6列目	5.9	基準速度	16.7	6.9	6.9	6.9

Fig.5-5-8 exship8

exship9 (基準速度22knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
9	2.84	1.65	1.47	1.33	1.22	1.13				
14	1.81	1.53	1.36	1.24	1.14	1.06				
18	1.47	1.32	1.20	1.10	1.02	0.96				
23	1.42	1.27	1.15	1.06	0.99	0.93				
36	1.20	1.09	1.01	0.94	0.89	0.84				



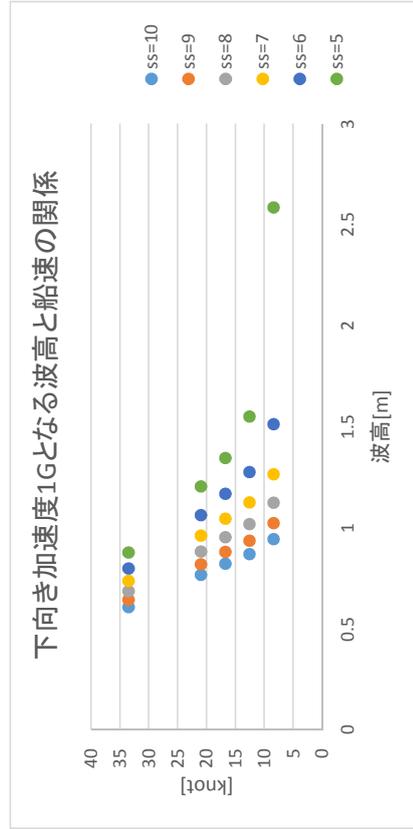
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	
1列目	8.3	基準速度	6.4	5knot以下	5knot以下	
2列目	7.6	基準速度	8.8	5knot以下	5knot以下	
3列目	7.0	基準速度	11.1	5knot以下	5knot以下	
4列目	6.6	基準速度	12.9	5knot以下	5knot以下	
5列目	6.2	基準速度	14.8	5knot以下	5knot以下	
6列目	5.9	基準速度	16.5	5.3	5knot以下	

Fig.5-5-9 exship9

exship10 (基準速度25knot)

SS	knot									
	5	6	7	8	9	10				
8	2.77	1.47	1.19	1.05	0.95	0.87				
12	1.50	1.20	1.05	0.95	0.87	0.80				
15	1.33	1.12	0.99	0.90	0.83	0.77				
19	1.15	1.01	0.91	0.83	0.77	0.72				
31	0.80	0.72	0.66	0.62	0.58	0.54				



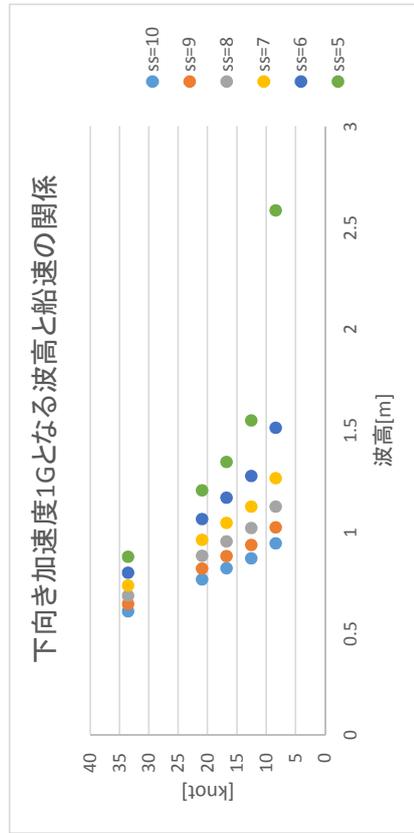
制限速度(knot)の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	
1列目	8.7	基準速度	5.6	5knot以下	5knot以下	
2列目	8.3	基準速度	7.0	5knot以下	5knot以下	
3列目	8.2	基準速度	7.4	5knot以下	5knot以下	
4列目	7.7	基準速度	9.4	5knot以下	5knot以下	
5列目	7.6	基準速度	9.8	5knot以下	5knot以下	
6列目	7.2	基準速度	11.8	5knot以下	5knot以下	

Fig.5-5-10 exship10

exship11 (基準速度22knot)

knot	SS									
	5	6	7	8	9	10				
8	3.70	1.59	1.31	1.16	1.05	0.97				
11	1.77	1.39	1.20	1.08	0.99	0.91				
15	1.46	1.23	1.09	0.99	0.91	0.85				
19	1.33	1.16	1.04	0.95	0.88	0.82				
30	1.04	0.94	0.86	0.80	0.75	0.70				



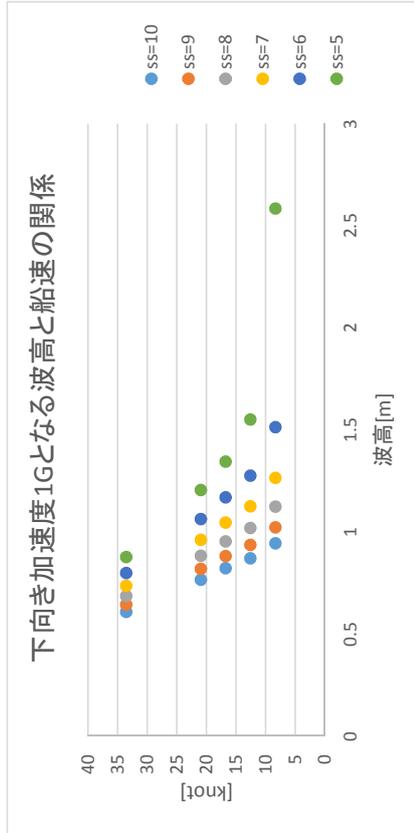
制限速度 (knot) の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	8.6	基準速度	5knot以下	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	7.9	基準速度	5knot以下	5knot以下	5knot以下	5knot以下
3列目	7.2	基準速度	6.7	5knot以下	5knot以下	5knot以下
4列目	6.5	基準速度	10.7	5knot以下	5knot以下	5knot以下
5列目	5.7	基準速度	15.4	7.0	7.0	7.0
6列目	5.0	基準速度	21.1	10.7	10.7	10.7

Fig.5-11 exship11

exship12 (基準速度22.2knot)

knot	SS									
	5	6	7	8	9	10				
8	2.70	1.48	1.20	1.06	0.96	0.88				
11	1.50	1.21	1.06	0.96	0.88	0.81				
15	1.32	1.13	1.00	0.91	0.84	0.78				
19	1.16	1.01	0.91	0.83	0.77	0.72				
31	0.80	0.73	0.67	0.62	0.58	0.55				



制限速度 (knot) の目安

座席位置	波高 (m)					
	SS	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0
1列目	7.1	基準速度	10.6	5knot以下	5knot以下	5knot以下
2列目	6.5	基準速度	13.7	5.6	5.6	5.6
3列目	5.9	基準速度	16.5	7.5	7.5	7.5
4列目	5.4	基準速度	18.9	9.2	9.1	9.1
5列目	4.8	基準速度	21.4	11.9	11.1	11.1
6列目	4.2	基準速度	15.2	15.2	13.8	13.8

Fig.5-12 exship12

5.6 平水海域における海難事故例での検証

平成26年6月5日、三河湾一色港から佐久島西港へ向け航行中であったH号は、強風による高波に襲われて動揺し、乗客が床面に身体を殴打し負傷する海難事故を発生した。本海難事故について、「下向き加速度が1Gとなる波高と船速」を求めた結果を以下に示す。また、この結果をもとに、客席位置での「下向き加速度が1Gとなる波高と船速」を補間により求めた結果も示す。

《H号の主要目》

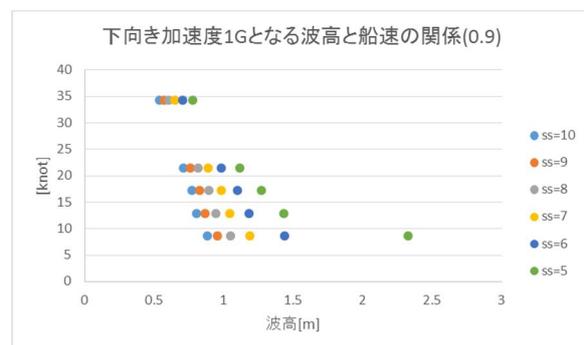
総トン数 19トン
 用途 旅客船
 船質 軽合金
 長さ×幅×深さ 19.60m×4.50m×1.60m
 出力 956kw（ディーゼル機関2基）

※入力データ：Lpp, B, β（デッドライズ角）：17.16m, 4.00m, 18.50度

1) 計算結果

図・表5-6-1は、H号のSS5～SS10での下向き加速度1Gとなる波高と船速の関係を示している。また、図5-6-2には、座席位置(1列目から6列目)での下向き加速度1Gとなる波高と船速の関係を示す。

ss number knot	5	6	7	8	9	10
0.00	3.54	3.47	3.40	3.33	3.26	3.18
8.57	2.33	1.44	1.19	1.05	0.96	0.88
12.86	1.44	1.18	1.04	0.95	0.87	0.81
17.15	1.27	1.10	0.99	0.90	0.83	0.77
21.43	1.12	0.99	0.89	0.82	0.76	0.71
34.29	0.78	0.71	0.65	0.61	0.57	0.54



(m)

図及び表5-6-1 SS5～SS10において下向き加速度1Gとなる波高と船速の関係

制限速力(kn)の目安

座席位置	波 高			
	～0.5m	～1.0m	～1.5m	～2.0m
1列目	基準速力	13.49	5knot以下	5knot以下
2列目	基準速力	15.66	5knot以下	5knot以下
3列目	基準速力	17.71	5.35	5knot以下
4列目	基準速力	19.92	6.51	5knot以下
5列目	基準速力	23.92	9.78	7.38
6列目	基準速力	25.64	11.87	8.58

表5-6-2 座席位置(1列目から6列目)での下向き加速度1Gとなる波高と船速の関係

6. 安全運航に向けて

6. 1 小型高速旅客船事業者へのヒアリング概要(沖縄県石垣島)

6. 1. 1 ヒアリングの目的

本事業においては、同様の腰椎損傷事故の発生を予防するため、他の小型高速旅客船についても検証し、個別船毎に上下加速度が -1G となる、船速、波高の関係とともに、乗客が受ける上下加速度は、その座席配置によって大きく異なることから、座席の配置による上下加速度について明らかにしてきた。

実際の航行においては、船長が大きいうねりや波を避けるため、頻繁に減速や変針を行うことによって、船体に大きな衝撃や揺れが生じないよう運航している。本訪問調査では、実際の運航において、どのような運航（波高、速力等）を行っているのか、また、発航停止基準はどのように決定しているかなどについてヒアリング調査を行った。

6. 1. 2 ヒアリングの概要

日 程 平成 26 年 7 月 18 日（金）

場 所 安栄観光会議室（石垣港離島ターミナル内）

参加者 A 社取締役(安全統括管理者)、船舶運航管理者

B 社取締役、統括部長(運航管理者)

C 社取締役

国土交通省、日本小型船舶検査機構

(事業者の発言の概要)

○ -1G チャートについて

- ・船長には、具体的に、また、意識してスピードを落とせという資料として大変参考になる。
- ・これまでわからなかったことが、 -1G であったり、これの発生を防ぐための速力という具体的な数値で出てきた。操舵室に貼り付けるとか、船長のよい判断材料になると思う。
- ・実際の航行速力は、チャートで示されるものより少し早いと思う。
- ・客席前席はチェーンをひいて立入禁止にしており、また、座席にテンピュールを敷いたり、シートベルトを徹底するようプレートにも注意喚起を行っている。このチャートはそういう制限を説明するのによい資料だと思う。
- ・これを基準にして朝の安全管理のミーティング資料に利用できる。

○ 船長の操船方法等について

- ・狭水路を航行する際には、スピードを落として運航している。狭水路では波の向き等に応じて針路する余地がほとんどないため、スピードの上げ下げによる対応がメインである。
- ・船長は最も船首側にいるので衝撃がよくわかる。
- ・透明な筒に玉をいれたようなものを操舵場所に立てておくことにより -1G の発生を容易に確認できるのであれば、すぐにでもこれを備えたい。

○ 安全運航の判断について

- ・夏は南から、冬は北東からと、季節によって風向きは異なり、航路の状況は変わってくる。また、島影か否かによっても波高は大きく異なるなど、海域によっても海象等は異なっている。さらに、同じ波高でも波長によって、航行条件は異なってくる。各社は、気象庁の発表する波高のみならず、航路毎に気象、海象の状態を判断し、船長に指示等を行っている。
- ・不規則波として大きな波が発生しやすい海域では減速するよう指示している。
- ・気象庁の広域をカバーする数値は、それだけでは使えず、保安庁の MICS データも参考にしている。これは、30 分ごとの灯台のデータであり、有用である。
- ・3社で情報交換を行っており、判断が違うことはなく、ほぼ同じである。また、離島にある代理店情報も利用している。

○ 安全管理規程について

- ・このチャートが参考資料ならいいが、気象庁の発表する波高をもとに、この数値を守れと言われると困る。
- ・うねりや波、風向でも波の立ち方が違う。気象庁のデータのみで判断するのではなく、風向きや島影等の情報等の様々な情報によって出航判断している。

(安全管理規程に関する事業者からの発言に対して、国交省から以下発言があった。)

- ・気象庁の発表と実際の波高等が異なるのであれば、実際の波高等に基づき判断すればよく、実態に即した規定とすべき。
- ・現在の安全管理規程は平水区域と沿海区域で減速すべき波高が異なっているなど、必ずしも合理的なものとなっていないので、安全管理規程の雛形に囚われず、船舶、航路等の実態を考慮した規定とすべきと考える。(これに対し事業者から同意の意思が示された。)

高速旅客船事業者に対するヒアリングについて

- 1 日本小型船舶検査機構では、平成 24 年 6 月に沖縄県石垣島とその周辺諸島との間を航行する小型高速旅客船において発生した乗客負傷事故（腰椎損傷事故）について、その原因究明を図り再発防止対策を徹底するため調査研究事業を実施しています。
- 2 これまでの調査研究では、当該航路を運航する小型高速旅客船において、(独)海上技術安全研究所や大阪府立大学などの関係機関の協力を得て、客室内の上下加速度等を計測するとともに模型試験を繰り返し行った結果、船体の上下加速度を -1G に抑えることによって大きな上向きの加速度を抑えられることが明らかになり、 -1G が発生する波高、速力等の条件を検証しました。
- 3 また、運輸安全委員会の船舶事故調査報告書においては、腰椎損傷を引き起こすメカニズムについて、下向きの加速度が -1G を超えれば、腰が一旦浮き上がり、その後、重力によって腰が落下し、椅子に叩きつけられることによって、腰椎損傷が起こる可能性があるとしていています。
- 4 さらに、本事業においては、同様の腰椎損傷事故の発生を予防するため、他の小型高速旅客船についても検証しており、個別船毎に上下加速度が -1G となる、船速、波高の関係とともに、乗客が受ける上下加速度は、その座席配置によって大きく異なることから、座席の配置による上下加速度について明らかにしました。(別添、「 -1G が発生する速力・波高・座席位置の関係」)
- 5 この「 -1G が発生する速力・波高・座席位置の関係」(別添の右表)は、横軸に波高、縦軸に船首側からの座席位置を示しており、表中の数値は -1G の加速度が発生する速力を示しています。この速力は、船首から向波を受けながらも減速せず、一定の速力で航行し、かつ、波を避けるための操船をしない状態での速力(模型試験の状態)であり、実際の航行の状況と比較すると最も厳しい状況での数値となっています。(ただし、この表は、航行中において、船長が -1G の加速度を発生させないよう操船する上で、非常に有益な参考資料になると考えています。)
- 6 実際の航行においては、船長が大きなうねりや波を避けるため、頻繁に減速や変針を行うことによって、船体に大きな衝撃や揺れが生じないように運航していると考えています。今般の訪問は、このチャートと実際の運航において、どの程度の差(波高、速力等)が存在するのか聞き取り調査を行うものです。

図 6.2.1 ヒアリング時の説明資料

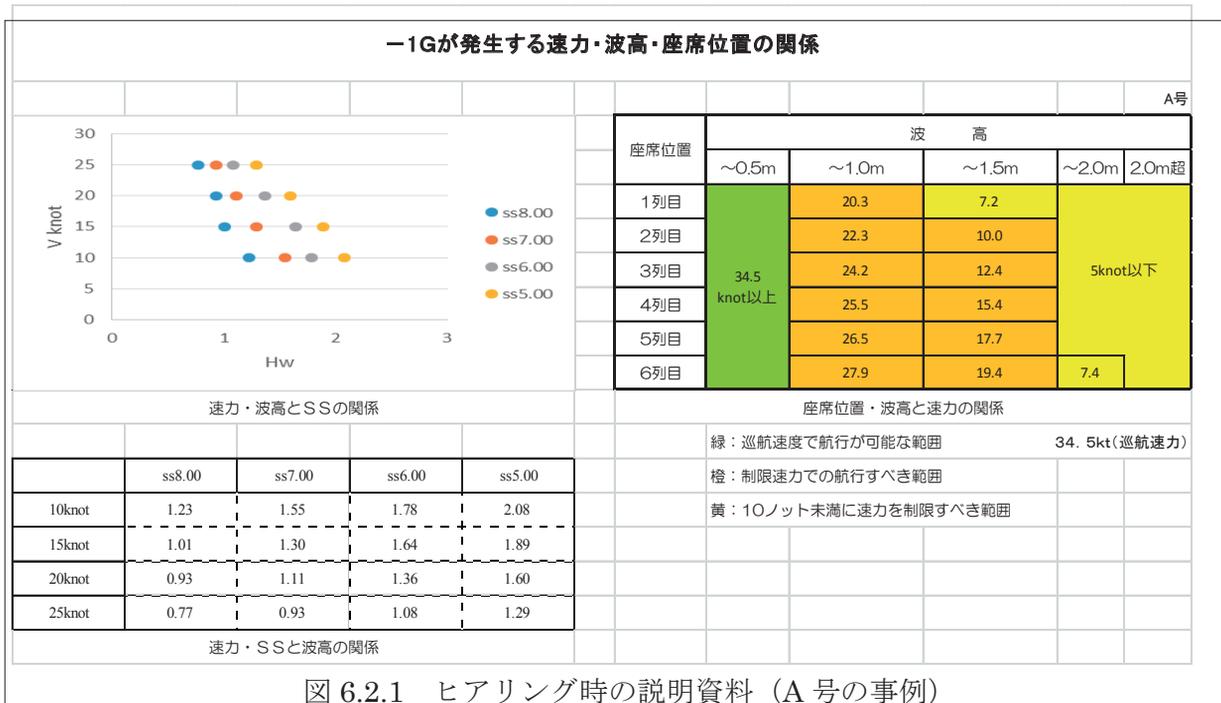


図 6.2.1 ヒアリング時の説明資料 (A 号の事例)

6.2 安全運航の考え方

本事業における調査研究では、(独)海上技術安全研究所や大阪府立大学などの関係機関の協力を得て、客室内の上下加速度等を計測するとともに模型試験を行い、船体の下向き加速度を1Gに抑えることによって、身体に大きな損傷を与える虞のある船体が浮上するときに発生する上向きの加速度を抑えられることが明らかになり、下向き1Gの加速度が発生する波高、速力等の条件等を検証した。なお、運輸安全委員会の船舶事故調査報告書においては、腰椎損傷を引き起こすのは、非常に大きな上向き加速度が直接座席から身体に伝わる場合と、座席に座った身体に1G以上の下向き加速度が一旦かかって腰が浮き、続けて腰が座席にたたきつけられて衝撃力が座席から身体に伝わる場合があり、後者が起きないようにすれば、前者が起きる可能性が低いことから、後者の対策を採ることが重要であるとされている。

・安全性向上に資する操船資料

本事業によって、個別船ごとの下向き1Gの加速度が発生する船速、波高、座席の相対的な関係を示す運航チャートの作成が可能となった。船長は、このチャートを操船時の参考資料「腰椎骨折事故を防ぐための操船資料」(以下、単に操船資料)とすることにより、下向き1Gが発生する条件を常に意識することによって、例えば、波高1.5mでは、何Gの加速度が発生しているということを意識しながら、操船することが可能となった。船長は下向き1Gが発生しないような操船(減速・避航)を行うことによって、腰椎骨折事故が起り得る下向き1Gが発生しないように操船することが可能となる。現状では、具体的に何ノットまで減速すれば、乗客への衝撃(加速度)が和らげられるか不明であったことから、船長はおおよその見当(具体的に何ノットまで減速すればよいかわからないという声がある。)で減速を行っていたと推測されるが、この操船資料を参考とすることによって、

具体的な数値を目安として減速する速力が把握できることとなった。さらに、本操船資料によって客席毎の加速度が把握できるようになった。これまでは、船首部や船尾部の何列目の座席で具体的にどの程度の加速度が発生しているかについて、具体的な数値として把握できていなかったが、船首部等の何列目で、その加速度が具体的に数値で把握することが可能となり、船長がそれぞれの客席の加速度を意識しながら操船できるようになった。また、併せて、事業者が下向きの1 Gを超える加速度を避けるために座席を制限する場合、具体的な範囲の把握が可能となり、具体的な安全管理措置の対応が可能となった。

・シートベルト、クッションの加速度の緩和効果

船舶の運航においては、突発的な大きな波やうねりに遭遇することがあり、このような波を避けられない場合に事故が発生（下向き1 G超）していることに十分に留意する必要がある。このような突発的な事象に対応するため、シートベルトやクッション等の予防対策を十分に行うことが求められる。シートベルトやクッションは、乗客が船体の動揺によって、座席に衝突する際の衝撃を低減させる効果が期待できるが、本調査研究においては、定量的な評価を行っておらず、今後の課題である。

・操船資料の取扱い

操船資料は、船の長さ、幅、デッドライズ角（中央断面図における船底外板の傾斜角度）、及び座席配置（一般配置図等により確認）のみによって作成が可能であり、簡易に計算が可能である。なお本操船資料は、船長13～25m程度、L/B3～6程度、速力40ノット程度、波高3m程度までの対応が可能である。

船長は、操船中にこの操船資料を参考資料することにより、下向きの1 Gの加速度が発生する状況を把握できることとなり、これを回避する操船を行うことによって、より安全な運航に資することとなる。

操船資料については、個船毎の船舶の特性を反映しており、船長の操船のための参考資料として、船橋に備置することが望ましいと考えている（当該意見は、小型高速船事業者へのヒアリング時にも事業者側の意見としてあったところである。）

本事業においては、個別船毎に試供船として12隻の操船資料を作成したところ、これらの操船資料については、船長の資料として安全運航に貢献したいと考えている。さらに、この操船資料は、特に平水を超えて航行する小型高速旅客船については、安全運航・腰椎骨折事故の防止の観点から、全ての船舶に備置することが望ましいと考えられるところ、例えば安全管理規程に添付する船長の操船資料とするなど効果的な活用等の検討を期待したい。

・安全管理規程、荒天時安全運航マニュアルの発航中止基準

安全管理規程や荒天時安全運航マニュアルは、小型高速船事業者が、船舶の運航にあたって安全管理措置等を策定し、地方運輸局に届け出る資料である。安全管理規程に記載される波高による発航中止基準等については、例えば、操船資料を参考にして、1 Gを超える下向きの加速度が発生しない速力を減速航行する際の速力として定めたり、1 Gを超える下向きの加速度が発生しない速力での減速航行によっては航海時間が長時間となるような場合には当該速力への減速を要する波高を発航中止基準として定めたりすることなどを十分に検討することを期待したい。

なお、ここで操船資料の数値は、水槽試験の条件、すなわち、船舶が正面から波を受けるとともに、その状態で一定の速力で航行する場合を前提に算定したものであり、最も厳しい条件の数値であることを考慮する必要がある。また、実際の運航においては、船長が減速や転舵を頻繁に行うことによって、波やうねりを避けて航行しており、下向き1Gのような大きな加速度を避けるように航行していることも十分に考慮すべきである。

さらに、安全管理規程や荒天時安全運航マニュアルの発航中止基準等の検討にあたっては、船舶が航行する海域における気象・海象条件について、種々の情報ソースから、可能な限り多くの情報を入手するとともに、船舶の航行性能などの特性を十分に把握し、これらの情報を総合的に検討することが重要である。

6.3 安全運航のための操船資料の普及に向けて

本事業においては、腰椎損傷事故の発生を予防するため、あんえい号以外の小型高速旅客船についても実験を行い検証した。これらの結果、下向きの加速度が1Gとなる船速、波高、及びその座席は、個船毎に異なることから、個別船毎に座席配置毎の上下加速度について明らかにした。これらの「-1Gが発生する速力・波高・座席位置の関係」のチャートについては、第5章に詳細に説明されているところであり、これらのチャートの有用性は、上記、6.1に示す現地ヒアリングによって明らかになっている。これらの成果については広く、小型高速旅客船事業者に普及させることによって、小型高速旅客船の安全性の向上が可能となることから、本事業においては、別紙のとおり各船主への配布を前提として「腰椎骨折事故を防ぐための操船資料」を作成した。(図6.3.1 普及用資料)

本資料は、船長が操船をしながら参考とすることができるよう1枚紙として作成し、下向きの加速度1Gが発生する速力・波高・座席位置の関係を示す3種類の表を示している。また、その下欄には、この資料の主旨を記載した。小型高速旅客船の船長は、本資料を参考としながら、操船を行うことによって、下向き加速度1Gが発生する波高、速力、座席位置等を念頭におきながら、この加速度が発生しないよう適切な速力への減速を行うことができる。

このように本資料については、可能な限り、小型高速旅客船事業者に普及させることにより、小型高速旅客船の安全対策の向上に努めて参りたい。

座席位置	波 高		
	~0.5m	~1.0m	~1.5m
1列目	30ノット以上	15	7
2列目		17	9
3列目		19	10
4列目		21	12
5列目		23	13
6列目		25	14

5ノット以下

下向き加速度1Gが発生する速度

緑：巡航速度で航行が可能な範囲
 橙：制限速度で航行すべき範囲
 黄：10ノット以下で航行すべき範囲

☆腰椎骨折事故を起こさないためには、

- ✓ 本表を参考に、下向きの1Gを超える加速度が発生しないよう速度を調整するとともに、大きな波やうねりを避けて操船しましょう。
- ✓ シートベルト着用を徹底しましょう。
- ✓ 特に前部席には、クッション等を設置しましょう。
- ✓ 特に高齢者等には、なるべく後部座席を利用していただきますよう。

☆安全運航のためには、十分な見張りが最も重要です。

☆本表は、船長が小型高速船の航行中に下向きの1Gを超える加速度を発生させないように操船するための参考資料として作成したものです。本表のみによる運航は行わないでください。

・ 小型高速旅客船においては、1Gを超える下向きの加速度が発生すると腰椎骨折事故が起きる可能性があります。このため、日本小型船舶検査機構では、海上技術安全研究所や大阪府立大学の協力により、腰椎骨折事故の発生予防のため、個別船毎に下向きの加速度が1Gとなる、船速、波高、座席配置の関係を算定した本表を作成しました。

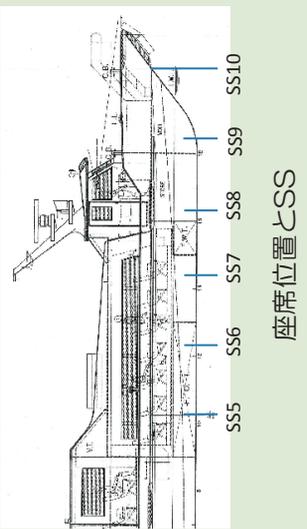
・ 本表の数値は、船首から向波を受けながらも減速せず、一定の速度で航行し、かつ、波やうねりを避けるための操船をしない状態（模型試験の状態）での速力であり、操船上の対応を考慮しない最も厳しい状況での数値を示しています。



下向き加速度1Gが発生するSS

	ss8	ss7	ss6	ss5
10ノット	1.2	1.6	1.8	2.1
15ノット	1.0	1.3	1.6	1.9
20ノット	0.9	1.1	1.4	1.6
25ノット	0.8	0.9	1.1	1.3

下向き加速度1Gが発生する波高 (m)



座席位置とSS

7. 結言

本委員会では、波浪中を高速航走する小型高速旅客船に生じる激しい縦動揺により、乗客が負傷（腰椎圧迫骨折）する事故が散発しているなか、乗客が受ける衝撃を緩和する方策として運航方法等について調査検討を行った。具体的には以下の項目を実施した。

- ① 小型旅客船の主要目、運航実態、座席クッション等の把握などの基礎調査（付録1, 付録2）
- ② 水槽試験による小型高速旅客船（第三あんえい号）の事故発生状況の再現と原因の分析（第3章）
- ③ あんえい号（実船）の実海域運動計測とその運動特性の分析（第3章）
- ④ あんえい号における波浪中安全運航の指針（加速度の閾値）の検討（第5章）
- ⑤ 小型高速旅客船の実海域航走時の船上上下加速度の簡易推定法の作成（第4章）
- ⑥ 小型高速旅客船の安全運航のための操船資料の提案（第5章）
- ⑦ 小型高速旅客船の安全運航の考え方と普及に向けての提案（第6章）

以上により、小型高速旅客船は波浪中を航走する際に生じる乗客の負傷が船体運動に伴う大きな船上上下加速度が原因であることを明らかにし、その回避方法として波浪中航走時の下向き加速度が乗客の着座位置で 1.0 G を超えない操船を実施することが望ましいことを示した。さらに、任意の小型高速旅客船が波浪中を航走する際、任意の乗客着座位置での船上上下加速度を推定するための簡易式を提案するとともに、小型高速旅客船事業者へのヒアリングを行い、小型高速旅客船の波浪中航走時の安全運航の考え方と操船のための資料を検討し作成した。

最後に、これら資料が普及し小型高速旅客船の安全に資することを期待する。