

博士論文

「RO/RO フェリーの大傾斜発生事故の実海域再現水槽を用いた
再現実験及び発生メカニズムの検討」

(Experimental Study about the Occurrence of a Large Roll Motion
of a Fast RO/RO Ferry in a Quartering Sea)

横浜国立大学大学院

工学府

宮崎 英樹

2018年3月

目 次

1. 緒 論	1
2. 供試模型と搭載装置	3
3. 実験条件	5
4. 大傾斜の発生確認	8
5. 大傾斜の発生メカニズムの検討	14
6. 左急旋回の発生メカニズムの検討	23
7. 荷崩れによる影響	27
8. 操船による大傾斜の回避	30
9. 結 言	37
参考文献	39
謝 辞	41

1. 緒 論

これまでも客船の海難事故に関する研究は多々行われてきた。古いものでは昭和 29 年 9 月に発生した洞爺湖丸等青函連絡船の海難事故を対象としたもの¹⁾や 1994 年 9 月に発生した大型クルーズ・フェリー「エストニア」号の転覆事故を対象としたもの²⁾がある。客船以外にも漁船のブローチング³⁾や波乗り現象、貨物船のパラメトリック横揺れなどを対象としたものは数多くある。重大な海難事故が発生すると事故原因の究明がなされて、国内法や IMO での国際基準の改正等に至るケースがある。

事故原因の究明方法としては理論計算に基づく方法と、模型船を用いて水槽実験から求める方法の 2 つがある。運輸安全委員会が作成する事故調査報告書は前者に対応したものが多く見受けられる。水槽実験による究明は時間や費用が嵩むために、理論計算に基づく方法が行われることが多い。しかし、海難事故は複雑な状況下で発生することが多く、理論計算の適用範囲には制限がある。

平成 21 年 11 月に三重県熊野灘沖を航行中に全長 166.86m の高速 RO/RO フェリーが右舷側に大きく傾斜する事故が発生した。その後、三重県の御浜町沖で座礁して横倒しの状態となった。本事故は運輸安全委員会の調査対象となり、平成 23 年 2 月に事故調査報告書「フェリーありあけ船体傾斜」⁴⁾（以下、事故報告書とする。）が公表されている。事故報告書によると左斜め追い波中を航行中に荷崩れを起こし、次の出会い波で右舷側に 45 度程度の大傾斜が発生したことが記載されている。

事故調査は海上技術安全研究所に委託されて、理論計算に基づく原因究明が行われた。理論計算は静的な復原力の釣り合い計算として取り扱われており、動的な影響は考慮されていない。事故当時の海象は時化ておらず、船体に損傷はなかった。そのような状況で船体が荷崩れを起こすような横傾斜に達するかどうか疑問が残る。そこで事故当時の海象で荷崩れが生じるような横傾斜が発生するのか、本事故の原因に動的な影響がないか確認することを目的として、海上技術安全研究所の実海域再現水槽を用いて水槽実験による原因究明を行った。

本論文は 9 章から構成されている。

第 1 章では研究の背景や目的について述べた。

第2章では本研究で使用した供試模型と模型船に搭載した装置について述べる。

第3章では大傾斜の再現実験の際の実験条件や海上技術安全研究所の実海域再現水槽の主要目について述べる。

第4章では事故当時の海象の再現や事故報告書に記載されている大傾斜の再現、その際の航跡の比較などについて述べる。

第5章では荷崩れを誘起した波について検証し、同様の波長と波高を有した規則波中の船体運動との比較や大傾斜の発生状況について検討を行う。

第6章では大傾斜後の左急旋回の発生メカニズムについて定傾斜を与えた状態での操縦試験結果から検討を行う。

第7章では同一の波浪場で同一の航跡上を航走させて、荷崩れが大傾斜に影響を及ぼすかの検討を行う。

第8章では操船による大傾斜の回避の可否について、変針と減速での効果について検討を行う。

第9章は結言として、第8章までの結果を総括する。

2. 供試模型と搭載装置

水槽試験で用いた供試模型の写真を図 1 に、主要目を表 1 に示す。模型船の縦慣動半径は 0.25L、横揺れ固有周期は 2.13 秒である。



図 1 供試模型

本実験は自由航走実験で行った。模型船の船体運動は光ファイバジャイロ（FOG）で、位置や船速は曳引台車の自動追尾機能を用いて計測した。模型船は事故時と同様に自動操舵で目標方位を維持するように操舵し、プロペラ回転数は一定で操船した。自動操舵は FOG で計測される方位角と回頭角速度を入力値として比例・微分制御とした。

表 1 供試模型の主要目

	実船	模型船
垂線間長さ(L)	150.0 m	3.5 m
全幅(B)	22.8 m	0.532 m
喫水(d)	6.26 m	0.146 m
トリム	1.68 m	0.039 m
G_0M	1.80 m	0.042 m

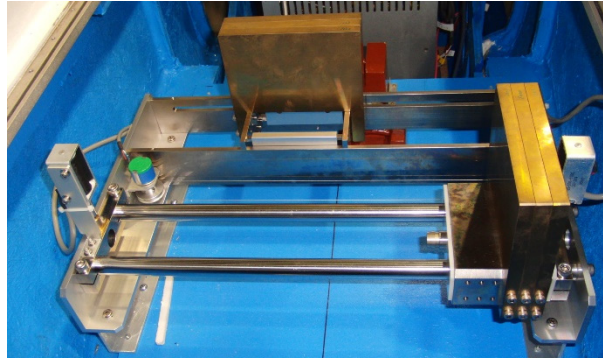


図2 荷崩れ再現装置

事故報告書には左斜め追い波中を航行中に右舷側に 22 度以上傾斜した際に搭載されているシャーシーが荷崩れをし始め、その後は 25 度に達するとコンテナが荷崩れし始めると記載されている。この現象を再現するために荷崩れを再現するための装置を取り付けた。その写真を図 2 に示す。装置は外部からの電圧入力により移動ウェイトの固定を解除することが出来る。また、本装置では移動ウェイトの移動速度は制御しておらず、移動ウェイトは船体が横傾斜することで移動する。従って、通常は移動ウェイトを固定した状態で航行するが、設定した横傾斜角の閾値を超えた際に移動ウェイトの固定が解除されて、船体の右傾斜によりウェイトが右舷側に移動する。本装置で生じる傾斜モーメントは事故報告書に記載されていた傾斜モーメント (6,430 tm) と同等となるように、移動ウェイトの重量と移動距離で調整した。

模型船にはフィンスタビライザーを装着しているが、姿勢角による制御は行っていない。事故報告書によるとフィンスタビライザーが発生する最大傾斜モーメントは 1,044 tm で、事故当時の排水量での傾斜モーメントに換算すると 2.5 度程度の定傾斜角に相当する。フィンスタビライザーが発生する最大傾斜モーメントが荷崩れにより生じる傾斜モーメントよりも小さいこと、高石らの実験⁵⁾によると波浪中ではフィンスタビライザーは制御をしなくても減揺効果があることから、本実験では模型船にフィンスタビライザーを装着しているが揚力を発生させない角度で固定して行った。

3. 実験条件

3.1 事故当時の海象

事故報告書には事故当時の気象及び海象に関する情報が記載されている。海象については事故発生当時の平成 21 年 11 月 13 日の紀伊半島の東、熊野灘の有義波高は 4.59m で、平均波向きは北を 0 度として時計回りに 270 度と推定される。波スペクトルのピーク波周期は 10 秒で、これは 156m の波長に相当すると記載されている。しかし、方向スペクトル⁶⁾などの記載はなくこの情報だけでは実海域再現水槽で波浪場を再現することは出来ない。そのため、気象庁が配信する毎時大気解析 GPV（格子データ）を入力値として第 3 世代波浪モデル WAM（Cycle4）を用いて波浪推算を行った。波浪推算の対象は平成 21 年 11 月 13 日午前 5 時の北緯 33 度 38 分から 33 度 40 分まで、東経 136 度 16 分から 136 度 18 分までの格子である。波浪推算で得られた結果を表 2 に示す。波向きは 0 度を北として時計回りで設定している。得られた波浪推算結果から実海域再現水槽で造波するために必要なデータを作成し、事故当時の波浪場の再現を行った。

表 2 波浪推算結果

有義波高 (m)	4.51
有義波周期 (sec.)	8.8
ピーク周期 (sec.)	10.2
ピーク波向き (deg.)	84.4

3.2 実海域再現水槽

海上技術安全研究所にある実海域再現水槽⁷⁾は長さが 80m、幅が 40m、深さが 4.5m の屋内水槽で、水槽の全周に 382 台のフラップ型の造波機が設置されている。本造波機 1 台の幅は 0.55m で、382 台を用いることで多方向不規則波を発生させることが可能である。本水槽には消波ビーチはなく、造波機が入射波を吸収する機能を有している。

曳航台車は主台車と副台車から構成されている。副台車にはターンテーブルが設置されていて、ターンテーブルに取り付けられた模型船は水平面内の 3 自由度の運動を与えることが出来る。本台車には自動追尾機能があり、模型船を曳航するだけでなく自由航走している模型船の位置や速度を計測することが出来る。

本水槽を用いて多方向不規則波中を自由航走する RO/RO フェリーが大傾斜する状況が発生するかの確認を行う。

表 3 実海域再現水槽造波機の仕様

造波機形式	フラップ式
造波周期	0.43 – 4.00 (sec)
最大波高	0.35 (m) (波長 10m 以下の場合)

3.3 実験で使用した波浪場

上記波浪推算結果から模型スケールに換算した目標値と水槽で再現した波浪場との比較を表 4 に示す。

表 4 波浪場の比較

	目標値	計測値
有義波高	0.105 (m)	0.106 (m)
有義波周期	1.21 (sec)	1.28 (sec)
ピーク周期	1.55 (sec)	1.58 (sec)

僅かな違いはあるが、実用上支障はないと考える。また、上記波浪場の主方向と模型船の針路が事故当時の出会い角 ($\chi = 35$ 度) に相当するように模型船の針路を決定した。模型船の加速開始時刻を変更して何度も試したが事故報告書に記載されている荷崩れが発生するようなロール角は得られなかった。本実験では出会い波数を多く確保するため、航走距離が長くなる水槽の対角線を航走することにした。しかし、走行範囲には制約があり、多方向不規則波では出会える波に限られる。そこで本実験では荷崩れを誘起するための波を上記波浪場に付加することとした。

実海域再現水槽では任意の時間と場所に集中波を発生させることが可能である。その機能を活用して集中波を作成して、上記波浪場と合成した。事故報告書には有義波高の 1.5 倍程度の波に遭遇した際に荷崩れが生じたと記載されているので、この波高を超えない程度の小さな集中波を付加することとした。

3.4 模型船の実験条件

模型船の目標船速は事故当時の船速相当の 1.61m/s とし、模型船のメタセンタ高さ (GM) は出航から事故当時までの燃料タンクや清水の消費による自由水影響を考慮した G_0M に相当した 0.042m とした。事故当時の G_0M から算出した平水中の復原力曲線 (GZ 曲線) に排水量 (W) を乗じた値 (復原モーメント) を図 3 に示す。縦軸は復原モーメントで、横軸は横傾斜角である。図中のオレンジ色の破線は、荷崩れによって生じた傾斜モーメントを表している。平水中において荷崩れが生じた場合の船体傾斜角は 32 度程度と推定される。

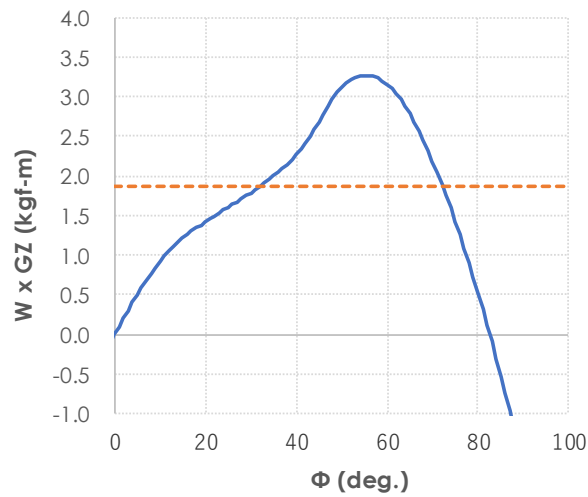


図 3 事故当時の GZ 曲線と排水量の積

4. 大傾斜の発生確認

4.1 船体運動

船体運動で用いる座標系を図4に示す。図中の Φ はロール角を、 θ はピッチ角、 ψ は方位角を表す。

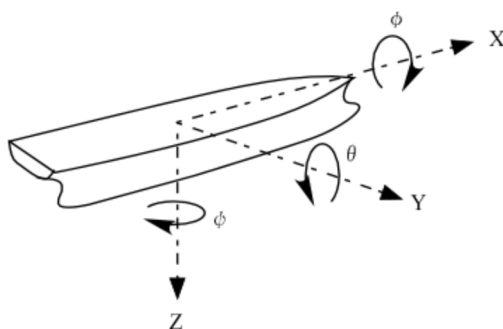


図4 船体運動の座標系

4.2 出会い波高計測

事故報告書によると大傾斜に至る前に荷崩れが生じたとされている。荷崩れは船体が22度以上に達すると生じると記載されており、斜め追波中で船体が20度以上傾斜するためには、大きな波高に遭遇する必要がある。模型船が出会う波を詳細に調べるために曳引台車の副台車に波高計を設置して、模型船が航走すると推定される航跡上の出会い波高の計測を行った。海難事故当時の波浪場を水槽内に発生させて、曳引台車を事故当時の船速に相当する1.6 m/sで走行して計測を行った。

計測された出会い波の時系列データを図5に示す。横軸は台車の加速開始からの経過時間で、縦軸は波高である。波高は上向きを正の値とした。色の違いは造波開始から台車が加速を開始するまでの時間で、190秒から290秒までの4条件を示している。加速開始時間が290秒のケースで比較的大きな波が継続的に計測されている。⁸⁾ これにより、模型船は造波開始から290秒程度経過してから加速を開始することとした。

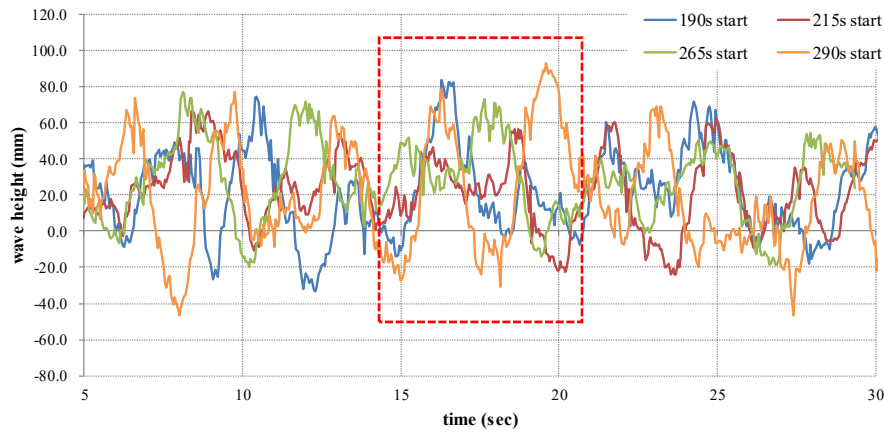


図5 出会い波の時系列データ

4.3 集中波の付加

上記で確認された継続的な比較的波高の高い波に模型船が遭遇するように試みたが、荷崩れが生じるようなロール角に達することは無かった。その際に計測されたロール角を図6に示す。

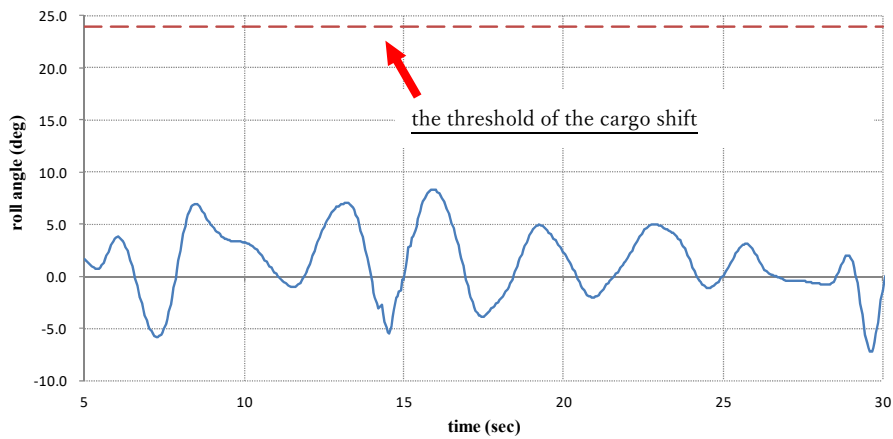


図6 ロール角の時系列データ (290秒スタート)

縦軸がロール角で、横軸が模型船の加速開始からの経過時間である。赤破線は荷崩れが生じるための閾値である。かなりの回数の試行錯誤を繰り返したが、閾値を超えるようなロール角は得られなかった。

そのため、本実験では再現した波浪場に小さい集中波を付加することとした。本実験で用いた集中波は、再現した波浪場の周波数スペクトルの1%に相当するパワーのものとした。集中波の方向関数は再現した波浪場と同様のものとした。付加する波のパワーは極力小さい方が適当と考える。当初⁹⁾¹⁰⁾は5%に相当するパワーの集中波を使用していたが、試行錯誤の末に1/5の1%に相当するパワーで荷崩れを生じるようなロール角に達することが確認された。

4.4 大傾斜の再現

事故報告書の「事故の経緯」によると波長船長比がほぼ同じ左斜め追い波中を航行している際に、突然、船体が右舷側に20~30度傾斜して、その後、45度程度の傾斜を生じたと記載されている。そこでこのような現象が実際に生じるものかどうかを確認した。

本波浪場は不規則波であり、様々な波長の波で構成されている。そのため、模型船の加速開始時刻は1番波長の短い波が水槽の端まで十分に伝播する時間を考慮して、造波開始から197秒以降とした。

造波開始から289.5秒後に加速開始した2状態（「T196」と「T198」）で事故報告書に記載されているような状況が確認された。その際の計測結果を図7と図8に示す。図7はロール角と旋回角速度、船速である。図中の赤い三角及び四角記号は荷崩れが誘起される波に遭遇した際の船速の極小値と極大値の時刻を示している。船速は波の下り斜面で加速され、上り斜面で減速されるので、極小値は船体が上り斜面、極大値は下り斜面に位置していると考えられる。図8は航跡である。図の原点は水槽中央と一致させ、縦軸と横軸は船長で無次元化した。模型船は図の右上から左下に向けて航走している。参考までに事故報告書から読み取ったAISのデータを青破線で併記する。

ロール角の図より304秒付近から右傾斜が始まり、306秒付近で20度を超える。このときに荷崩れ再現装置の固定が解除され、その後、一旦は減少するが307秒付近から再び右傾斜が増加し始める。308秒付近で大傾斜が生じている。その後は、荷崩れによって生じる定傾斜角付近を中心に船体が動揺している。

旋回角速度の図より304秒から306秒まで船体が左旋回していることが確認される。これは左舷船尾方向から荷崩れを誘起する波に遭遇し、船体が右傾斜することで左旋回が生じたと考えられる。その後、ロール角が減少する際に一旦は右旋回を始めるが、荷崩れに伴う定傾斜が生じると左旋回する。

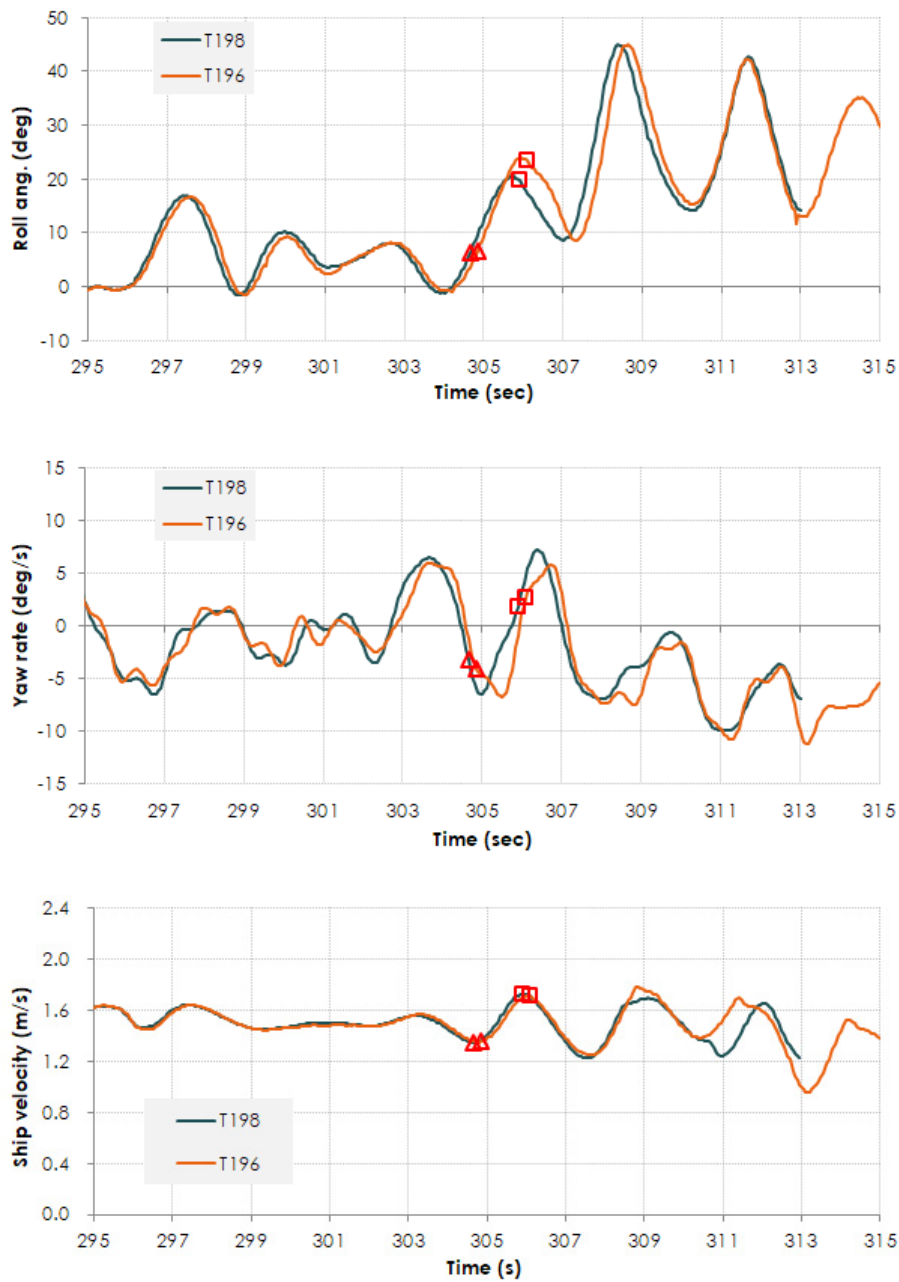


図7 大傾斜発生時の船体運動

本実験では荷崩れ再現装置の閾値を超えた後は舵角をゼロとした。事故報告書によると自動操舵に使用していたジャイロコンパスはロール角とピッチ角に対して±45度までしか対応しておらず、45度を超えると方位誤差が大きくなり使用できないと記載されている。そのため、本実験では自動操舵を停止して舵角ゼロとした。本来であればロール角が45度を超過した際に

ゼロにするのが望ましいが、荷崩れからロール角が45度に達するまでに2秒しか要していないために航跡への影響少ないと考える。

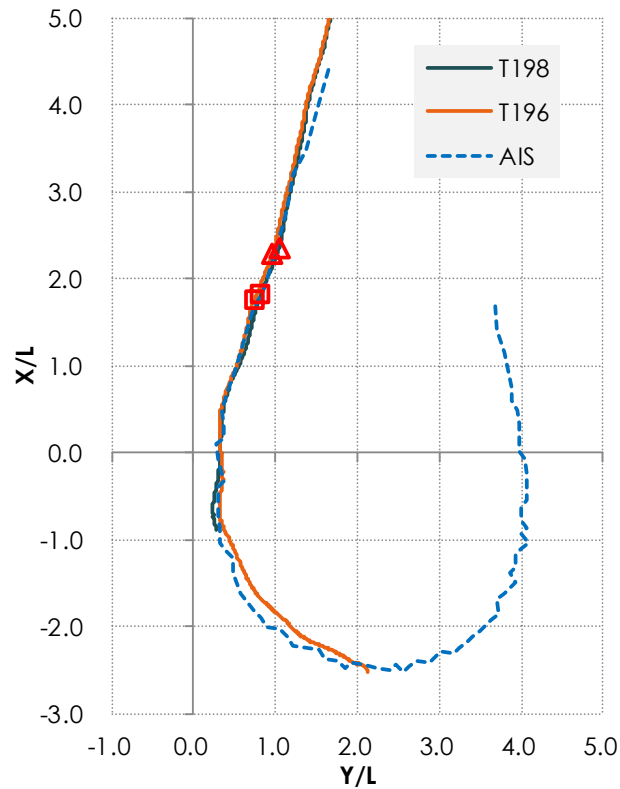


図8 大傾斜発生時の航跡

大傾斜後に自動操舵を継続させた場合についても計測を行った。その場合は大傾斜直後に左旋回をするが、船体姿勢が落ち着くにつれて一定方向に直進することが確認された。これは AIS データにあるような船首方位が180度回頭することとは矛盾する。

本実験の航跡と当該船舶の AIS データとはほぼ一致しており、大傾斜後の左旋回は荷崩れにより船体が定傾斜したことが主要因と考えられる。

実験の様子を図9～11に示す。

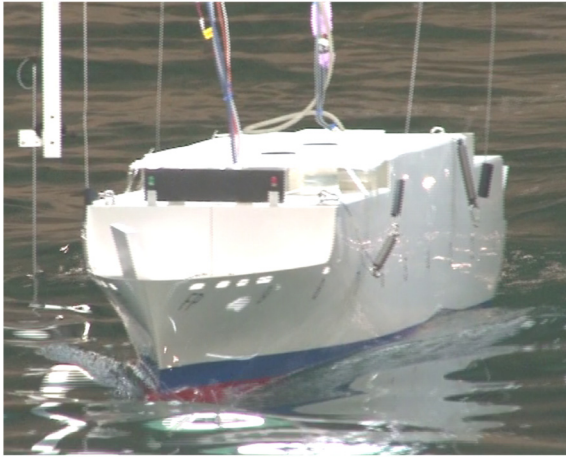


図9 左斜め追波中を航行



図11 次の波で大傾斜に至る



図10 ロール角が荷崩れの閾値を超過

5. 大傾斜の発生メカニズムの検討

5.1 出会い波による検討

次に模型船の出会い波について検討する。実海域再現水槽の曳引台車は位置や速度の入力データを作成すると、任意に走行することが出来る。その機能を用いて曳引台車が波高計だけを曳航する形で、模型船の航跡上を走行して計測を行った。波浪場が左斜め追い波であるため、計測は重心位置ではなく左舷の AP 付近の航跡上とした。計測結果を図 12 に示す。波高は上向きを正の値とした。図中の赤破線は図 7 の赤い三角と四角記号に対応した時間を示している。

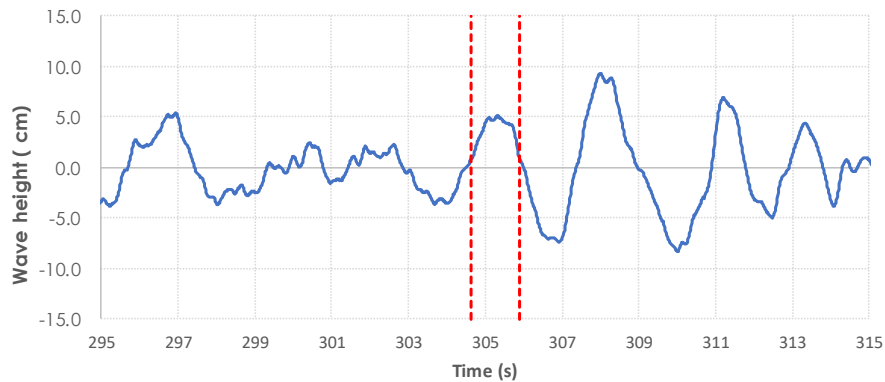


図 12 出会い波の時系列データ

左側の破線時は船尾が波の谷から少し持ち上げられた状態を、右側の破線では船尾が波の山付近を超えたことを示している。これにより図 7 の船速の変動が生じることがわかる。また、事故報告書では有義波高の 1.5 倍の波と遭遇して 25 度程度のロール角が生じたとされているが、今回計測された波高はそれよりも小さい値となった。その後、波の谷が通過した後に大傾斜が生じる時刻で有義波高の 1.5 倍程度の波に遭遇している。307 秒付近で船体のロール角が減少しているのは、左舷側の船尾付近の波面が下がったためと考えられる。

次に模型船の航跡上の 3 点で定置式波高計による波計測を行った。計測を行った 3 点は、荷崩れを誘起した波に遭遇したと考えられる時刻の重心位置とそこから半船長分を前後にずらした位置とした。波計測にはサーボ式波高計を用いて行った。計測された波高を図 13 に示す。縦軸は波高で、横軸は模型船の位置を船長で無次元化した値である。横軸のゼロが船体中央で、1.75 が F.P.、-1.75 が A.P.を示している。参考のために船体のプロファイルを併記した。このプロファイルは事故当時の喫水線は合わせているが、船体運動を無視したものである。ま

た、計測された波形から推定した規則波の波形を図中に赤い破線で併記した。波浪推算で算出された波の主方向を波向きと仮定した規則波で、波長は船長の1倍程度で波振幅は有義波高の1.5倍程度の波と推定される。水槽に再現した波浪場は多方向不規則波のため多少の誤差は含まれるが、計測された波形を推定出来ていることが確認された。

305.6秒にS.S.1 1/4では10 cm程度の波高が、S.S.6 1/4では-6 cm程度の波高が計測されている。両者の差は15.7 cmとなり、有義波高の1.5倍に相当する。その後、波高の高い箇所は船体前方へ移動して、波が船体を追い越していることが確認された。また、波が船体前方へ移動して船体後半部の波高が低くなり始めることで、船体のロール角の増加が抑制されたと考えられる。その後、307秒にA.P.で-8 cm程度となり、船尾付近での波高が低くなることで船体のロール角は一度減少する。その後、次の波に遭遇して船尾での波高が再び上昇して大傾斜へと至ったと考えられる。

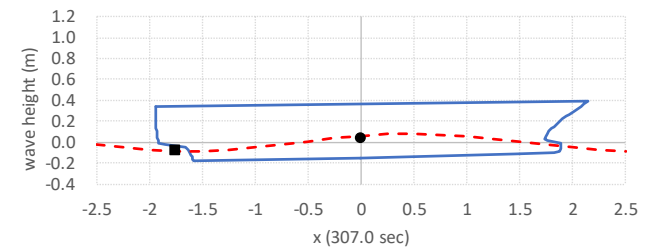
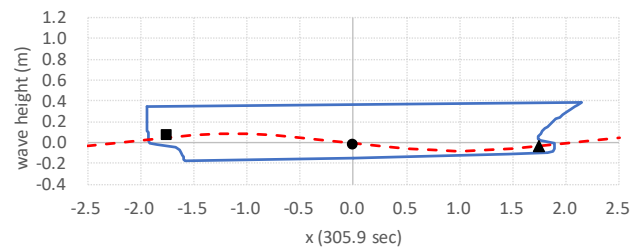
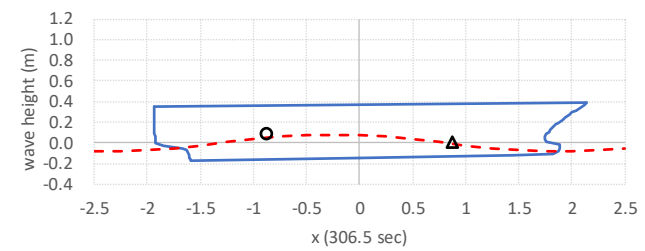
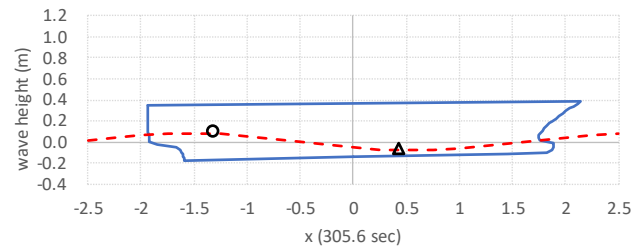
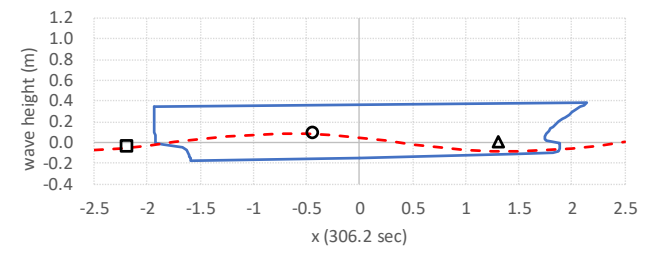
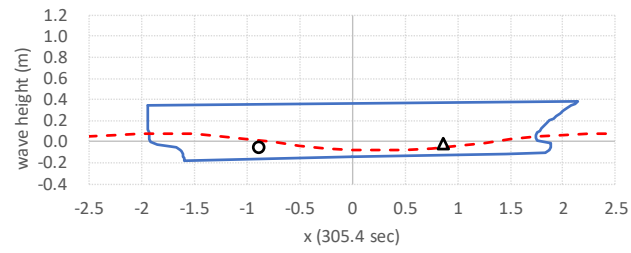


図 13 定置式波高計による出会い波の計測結果

5.2 復原力の検討

上記で推定された規則波での復原力を算出する。算出の条件は波長船長比が 1.0、波高 (hw) が有義波高と有義波高の 1.5 倍、出会い角 (χ) は -35, -40 度、船が波の下り斜面に位置した状態である。出会い角は真追波状態をゼロとして、反時計回りを正とする。算出結果を図 14 に示す。縦軸は GZ で、横軸は傾斜角である。算出結果は実船スケールの値である。

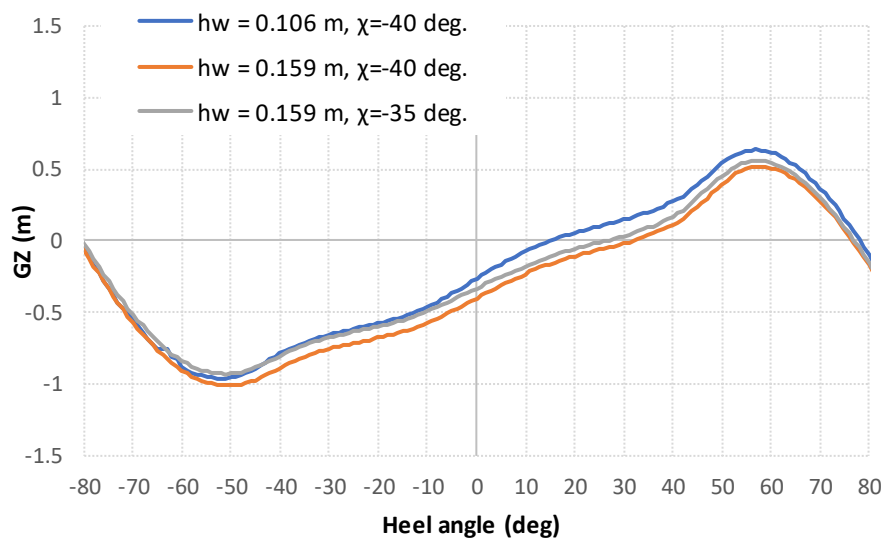


図 14 推定された波形での GZ 曲線

出会い角が -40 度で波高が有義波高の場合の静的な釣り合い角は 15 度程度で、有義波高の 1.5 倍の場合は 32 度程度である。出会い角が -35 度で波高が有義波高の 1.5 倍の場合は 27 度程度であった。有義波高が 1.5 倍となると静的な釣り合い角が急激に増加し、かつ波との出会い角が大きくなるとさらに増加したことが確認された。

5.3 規則波による検討

上記で推定された波形を用いて船体運動の計測を行った。波条件は波長船長比が 1.04、波高が有義波高と有義波高の 1.5 倍、出会い角が -40 度である。その計測結果を図 15 に示す。図の縦軸は上からロール角とピッチ角で、横軸は時間である。

左斜め追波を航行しているために右舷側へのロール角の方が大きくなっていることが確認された。横揺れの中心角は波高が有義波高の場合が 3.05 度、有義波高の 1.5 倍の場合が 5.99 度である。また、それぞれの片振幅は 7.3 度と 11.5 度である。

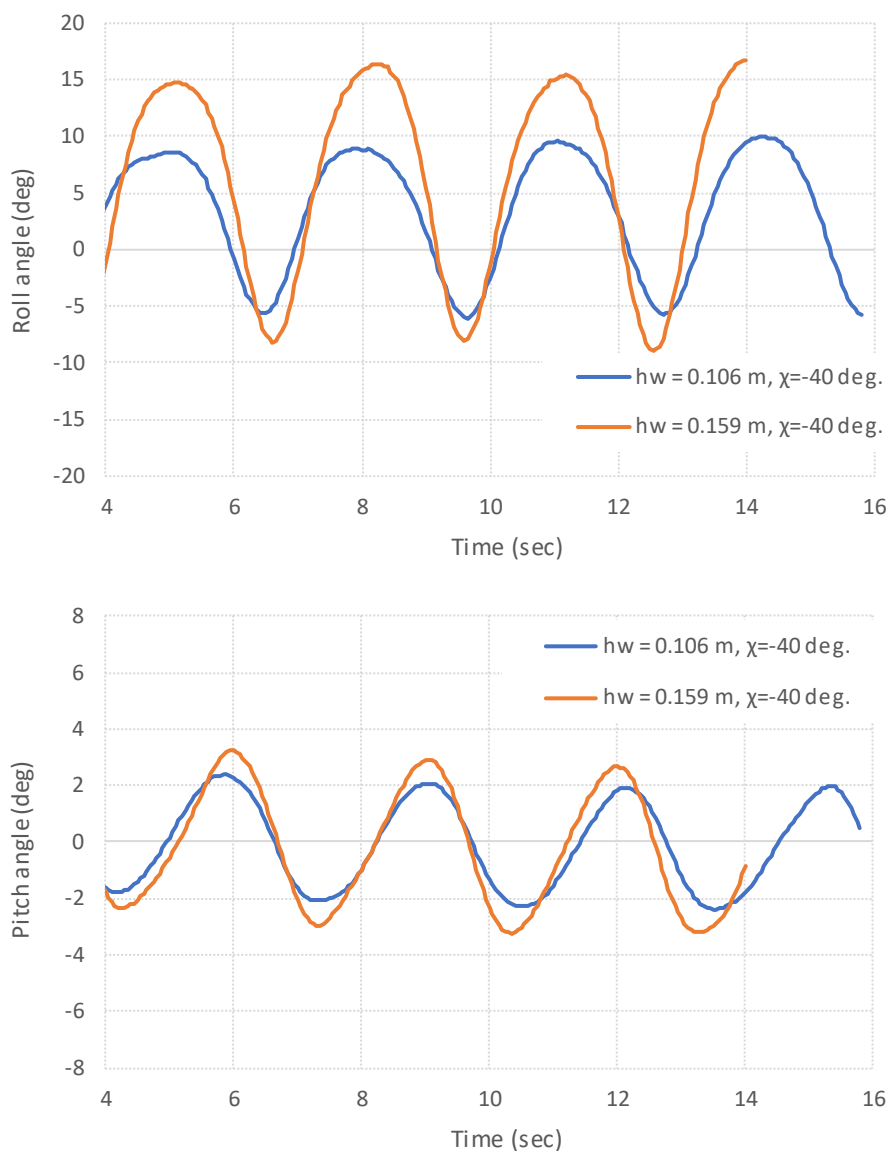


図 15 推定された波形での規則波中の船体運動

ピッチ角はゼロを中心とした往復運動で、波高が有義波高の場合の片振幅が 2.05 度、有義波高の 1.5 倍の場合が 2.94 度である。波高が 1.5 倍になるとピッチ角の片振幅の 1.5 倍となっていることが確認された。

有義波高の 1.5 倍の規則波中でも荷崩れが生じるようなロール角には達しないことが確認された。

5.4 大傾斜が発生した場合と規則波での船体運動の比較

大傾斜の再現実験で計測されたデータと上記で推定された規則波中で計測された計測データの比較を行う。規則波中で計測された船体運動の時系列データを図 16 に、大傾斜再現実験で計測された時系列データを図 17 に示す。図の縦軸は上からロール角、ロール角速度、船首方位角、斜航角で、横軸は時間である。斜航角は時計回りを正とする。

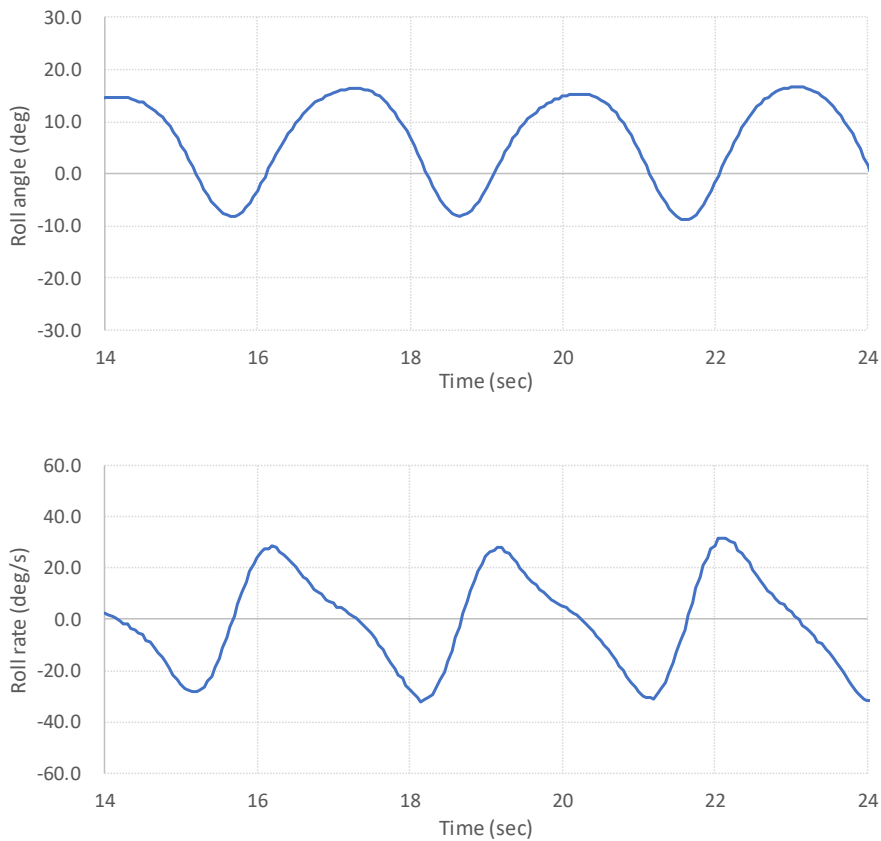


図 16 推定された波形での規則波中の船体運動

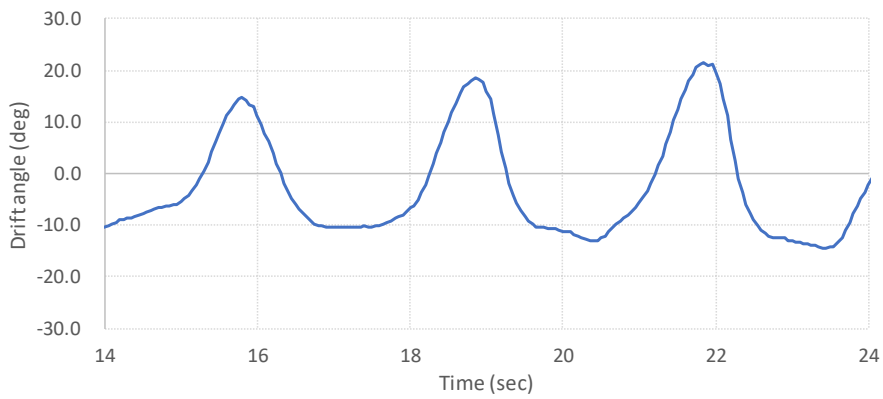
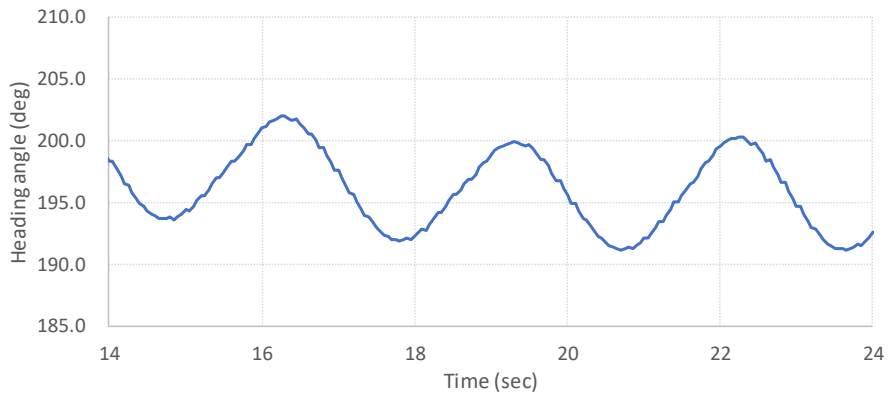


図 16 推定された波形での規則波中の船体運動 (続き)

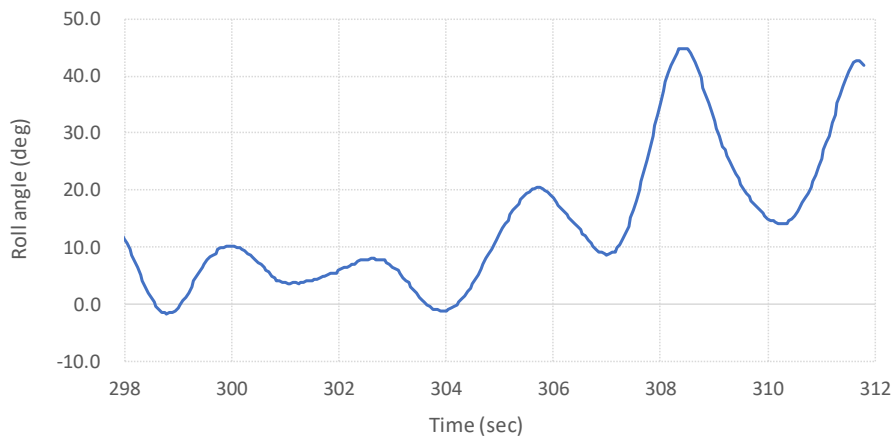


図 17 推定された波形での規則波中の船体運動

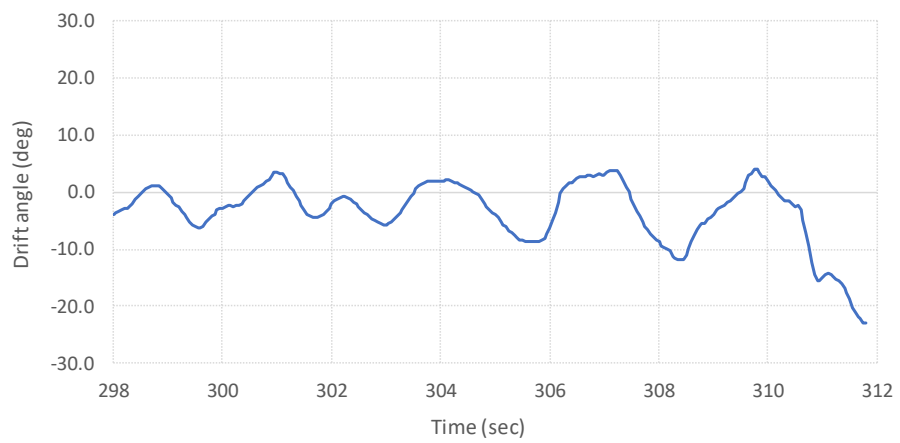
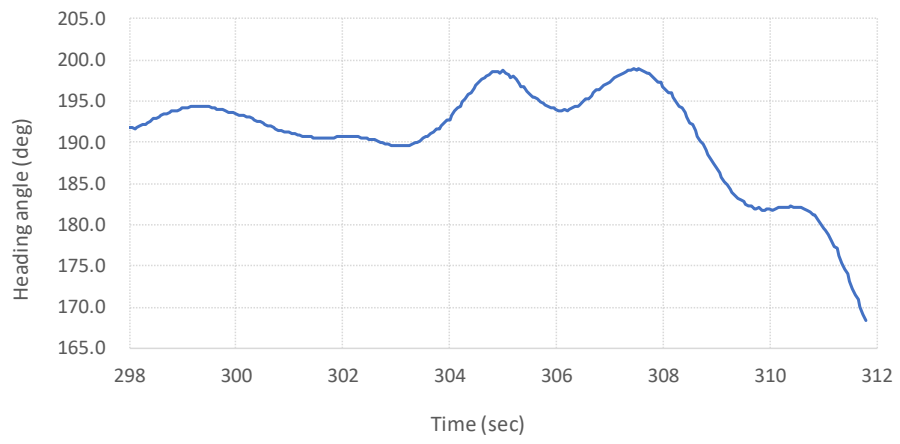
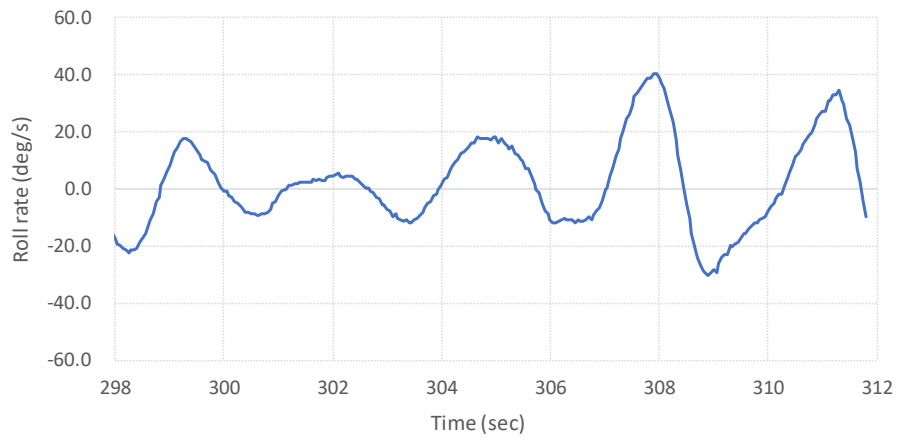


図 17 推定された波形での規則波中の船体運動 (続き)

規則波中での船体運動は周期的な運動で、波との相対位置で運動は決まる。本実験では波高が大きいために船首方位の平均値が僅かに減少する傾向を示しているために斜航角が僅かに発達していつているが、斜航角の傾向は捉えている。斜航角は船体が左舷側にロールした場合にはプラスの値を、右舷側にロールした場合にはマイナスの値を取る。

一方、再現実験で計測された船体運動は多方向不規則波中のため、周期性は確認することが出来ない。荷崩れに至る状況は 304 秒から 306 秒にかけてである。304 秒付近でのロール角は -1 度程度で、ロール角速度はマイナスからプラスの値へ転じている。規則波と異なるのはロール角速度の形状である。ロール角速度のピーク値は規則波の方が大きい。しかし、ロール角速度がプラスの部分の面積はほぼ同じである。規則波中のロール角は片振幅が 11.5 度と計測されているので両振幅で 23 度程度となる。304 秒でロール角が -1 度であるので、306 秒付近ではロール角が 22 度程度まで達することとなり計測結果と一致する。

また、斜航角はプラスの値を取ることは少なく、マイナスの値となることが殆どである。斜航角がマイナスということは、主方向の波との出会い角が大きくなる傾向を成る。一方、主方向の波との出会い周期は長くなる傾向となる。この影響はロール角速度にも表れており、斜航角がマイナス側に転じた辺りからロール角速度の傾きが変化している。

大傾斜に至った経緯は以下のとおりと考えられる。

304 秒付近でほぼ直立した状態で波長船長比が 1.0、波高が有義波高の 1.5 倍の波に出会い角 -40 度程度で遭遇した。船体は右舷側にロールし始め、その途中で斜航角がマイナスに転じる。マイナスの斜航角が生じたことで波との出会い周期が延びて、ロール角がさらに増加して荷崩れが生じる傾斜角に達した。

6. 左急旋回の発生メカニズムの検討

事故報告書では大傾斜発生後の急旋回についても指摘されている。指摘している内容は、海上公試時の-35度旋回よりも小さい旋回径が旋回している点についてである。大傾斜の再現実験でも大傾斜後に自動操舵を解除して舵中央にすることで、AISデータをほぼ同様の航跡が得られている。この現象について検討を行う。

基本特性を確認するために平水中での操縦試験を行った。3.4で求めた荷崩れが生じた場合の平水中での船体傾斜角（32度程度）を与えて行うことを検討したが、旋回中の外方傾斜で傾斜角が増加することを考慮して半分程度の16.6度での計測とした。

計測方法としては以下のとおりである。

- ① ワイヤークランプで模型船を拘束して直立状態で加速する
- ② 加速終了後にワイヤークランプを緩めて定傾斜を与える
- ③ 船体の横揺れが落ち着き、船首方位がほぼ一定となった段階で操舵を開始する

試験条件は直立状態での-35度旋回と定傾斜を与えた状態での自動操舵・旋回試験である。その計測結果を図18と19に示す。図18は航跡の比較で、図19は船体運動の計測結果である。図19の縦軸は上から無次元旋回角速度、ロール角、斜航角、船速である。

16.6度の定傾斜を与えた状態で自動操舵にて航走した場合には、目標方位を維持できることが確認された。これは舵による回頭モーメントが船体の定傾斜で生じる船体に働く回頭モーメントよりも大きいことを意味している。

次に舵中央で航走した場合には僅かに左に旋回することが確認された。水槽の走行範囲の都合上、定常状態までの計測は出来なかった。これが定傾斜で生じる船体に働く回頭モーメントの影響である。

マイナスの舵角（ δ ）を与えることで旋回径は小さくなり、舵角が-8度でも直立状態での-35度旋回よりも小さい旋回径となっていることが確認された。

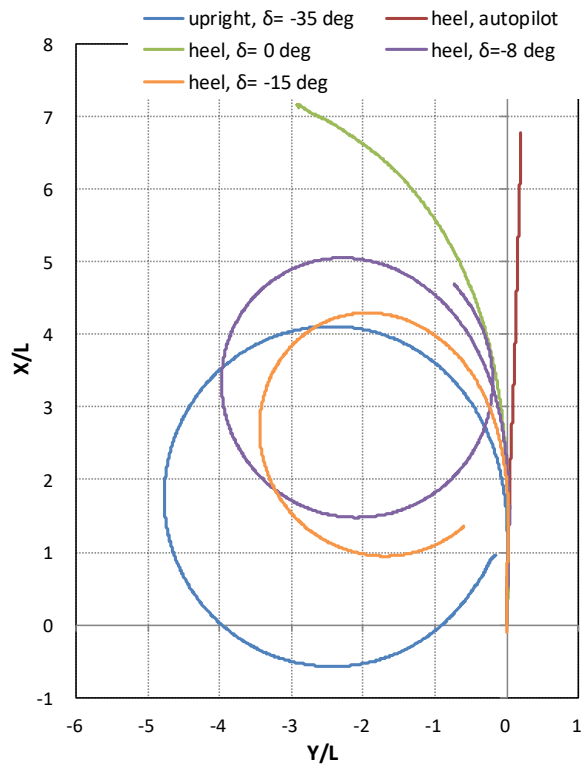


図 18 定傾斜付きでの航跡結果の比較

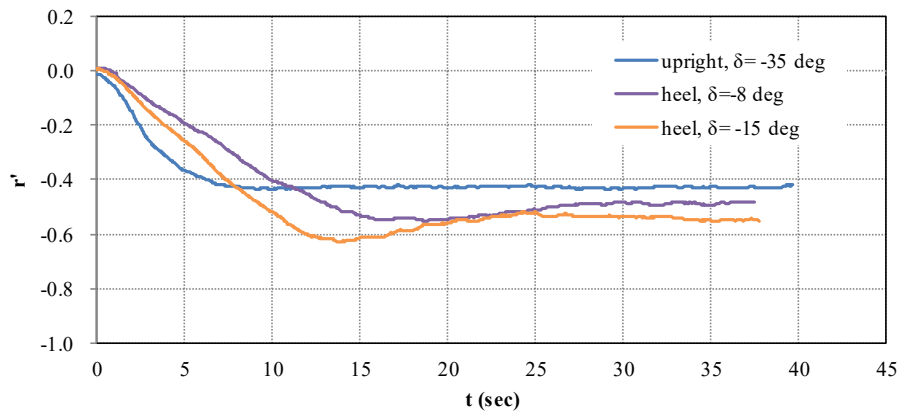


図 19 定傾斜付きでの船体運動の比較

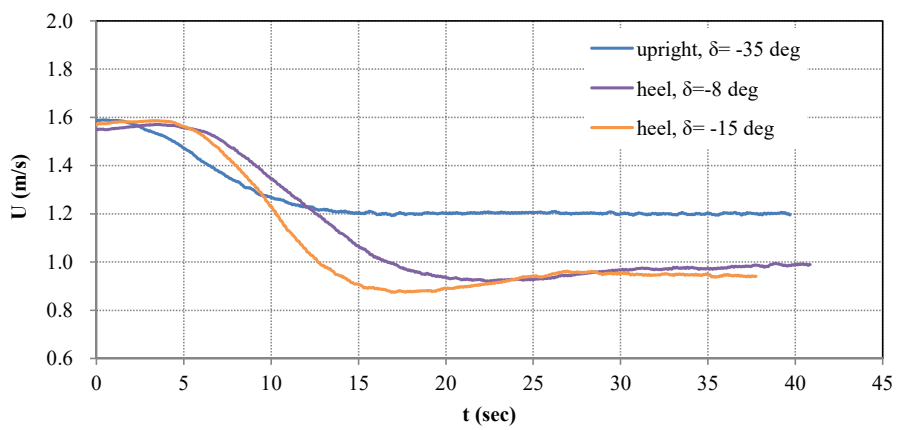
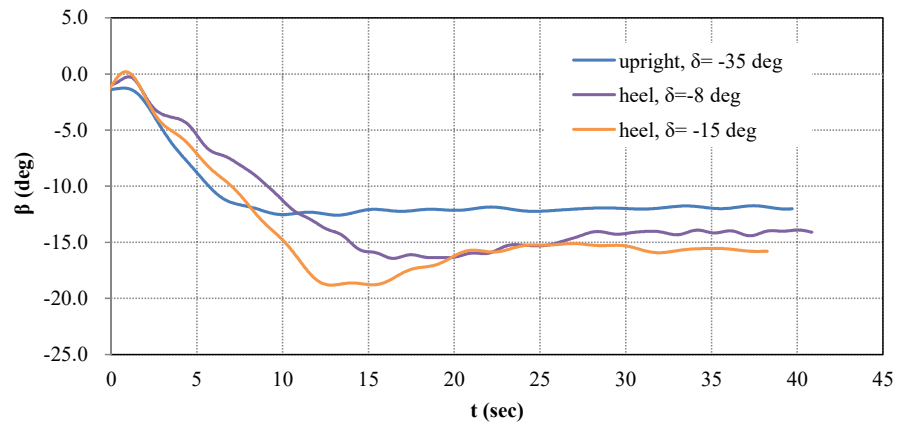
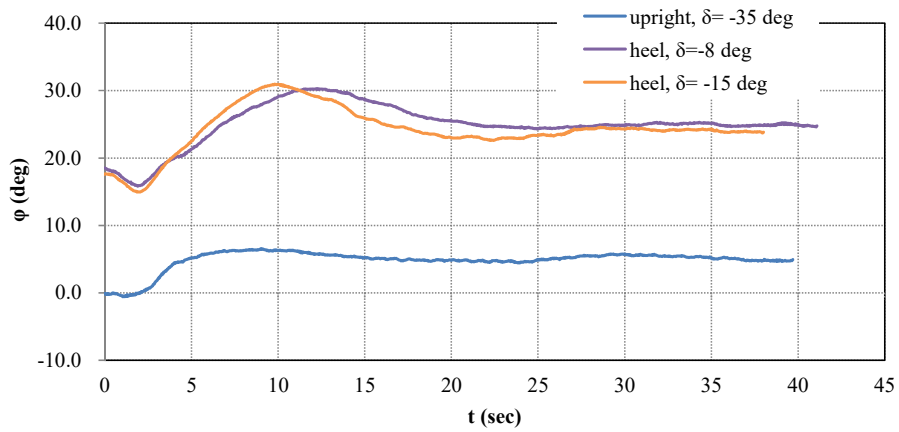


図 19 定傾斜付きでの船体運動の比較 (続き)

船体運動の時系列データを確認すると定傾斜を与えた場合は定常状態に達するまでの過渡状態が異なることが確認された。操舵直後は操舵による傾斜モーメントが働くためにロール角は一度減少する。その後、旋回角速度が発達するにつれて外方傾斜が生じてロール角が増加する。旋回角加速度は操舵舵角が大きい方が大きくなるため、操舵舵角が大きい方がロール角の発達が早い。その後、ロール角が減少し始めて定常状態へと達する。本実験では定常状態に達するまでに 30 秒程度の時間を要した。また、操舵後の旋回角速度の発達は直立状態が一番早く、航跡でも旋回縦距（アドバンス）は直立状態が一番短くなっている。

定傾斜角が 16.6 度の場合には舵角が-8 度でも、旋回角速度は直立状態の-35 度旋回よりも大きくなる。事故当時の定傾斜角（32 度程度）の場合はこの舵角よりも小さい値で、海上公試の-35 度旋回よりも小さな径で旋回したと考えられる。これは再現実験の際に舵中央で AIS とほぼ同等の航跡となったことと一致している。

7. 荷崩れによる影響

事故報告書によると大傾斜に至った主要因は荷崩れが生じたためとされている。荷崩れの有無と大傾斜との関係を確認するため、時刻と航跡を一致させて航走させて船体運動の比較を行った。航跡の比較を図 20 に、その計測結果の比較を図 21 に示す。荷崩れが生じたケースが「T198」で、生じていないケースが「T197」である。図中の赤い三角及び四角記号は荷崩れが誘起される波に遭遇した際の船速の極小値と極大値の時刻を示している。

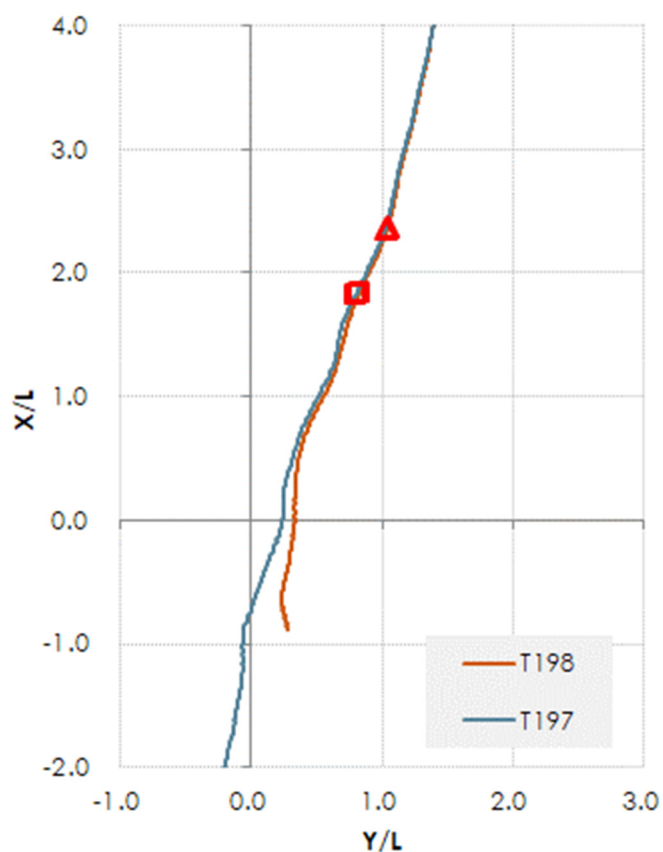


図 20 荷崩れの有無による航跡の比較

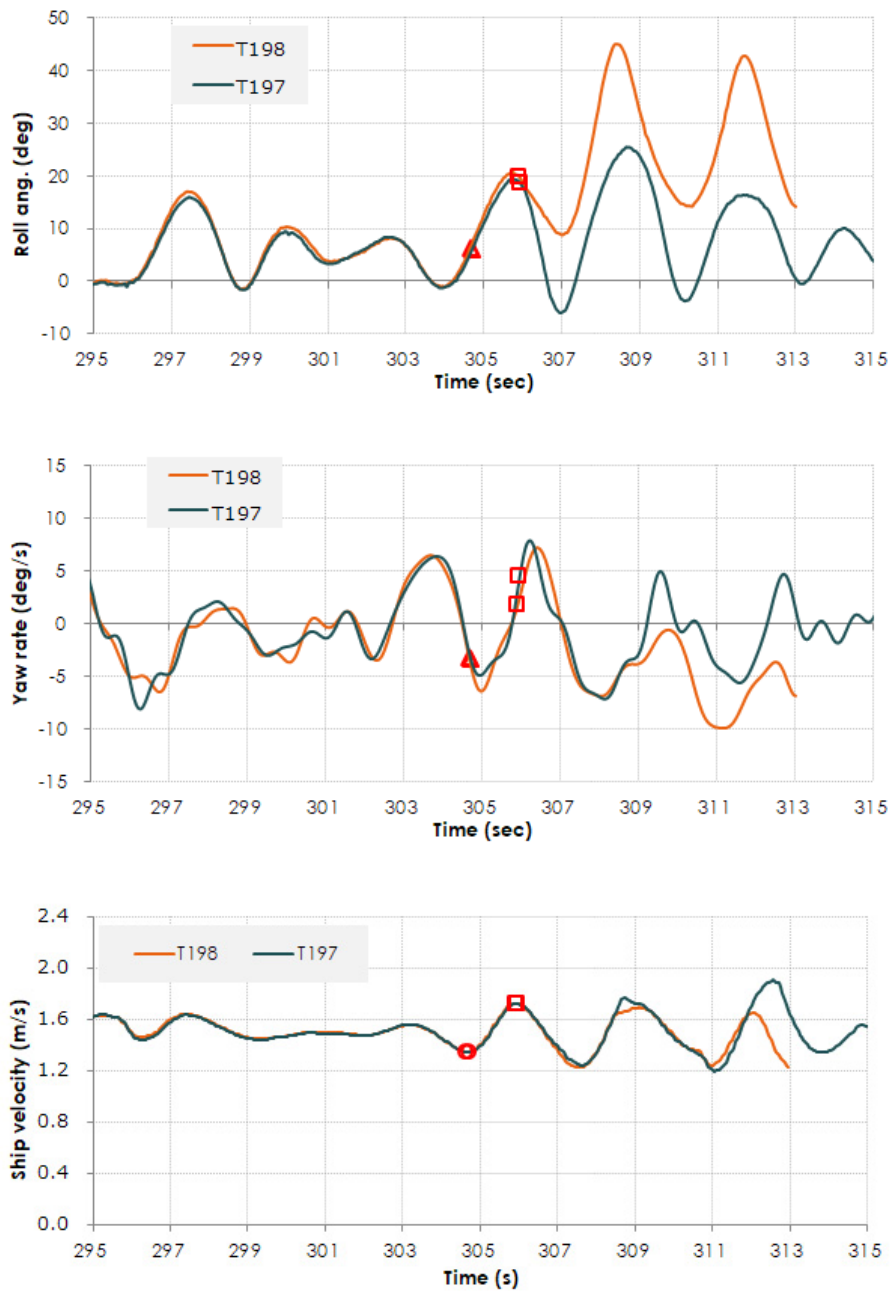


図 21 荷崩れの有無による船体運動の比較

赤い四角記号の位置での両者の相違は、時間が 0.05 秒、位置が水槽の縦方向に 3 cm、横方向に 9 cm であった。船首方位の相違は 1 度未満であった。時間と航跡はほぼ一致しており、両者の相違は荷崩れの有無だけと見なすことが出来る。

図中の四角記号の時刻付近で荷崩れ再現装置の固定が解除されているが、その直後までは旋回角速度や船速、航跡に相違は殆ど見られない。その後、移動ウェイトが右舷側へ移動して船体に傾斜モーメントが働き始めると船体が右舷側に定傾斜して旋回角速度は徐々にマイナスの値へ移行する。左旋回を始めると船体抵抗が増えて船速は徐々に低下し始める。

「T197」は309秒付近で右傾斜が大きくなっている。これは出会い波の計測で確認された荷崩れを誘起した波の次の波に遭遇したことで生じている。ロール角が大きくなったとしても、荷崩れが生じなければロール角は徐々に減衰して再び目標針路に向けて航走を始める。ロール角が減衰しているということは危険な状況が継続していた訳ではなく、偶発的に荷崩れを生じるような状況に陥ったと考えられる。

これらの結果から荷崩れが生じなければ大傾斜に至らないと考えられる。

8. 操船による大傾斜の回避

事故報告書によると本海難事故は荷崩れが生じたことによる大傾斜に至ったと記載されている。そこで同一の波浪場を航走して、荷崩れを生じるようなロール角を回避する操船方法について検討を行った。検討にはIMOの「荒天中の操船ガイドライン」^{11) 12)}（以下、「IMO ガイドライン」という。）を参考とした。IMO ガイドラインでは船速・波周期・波との出会い角をパラメータとして、特定の状況下で船が波の影響を非常に強く受け易い危険な状態に陥ることが指摘されている。

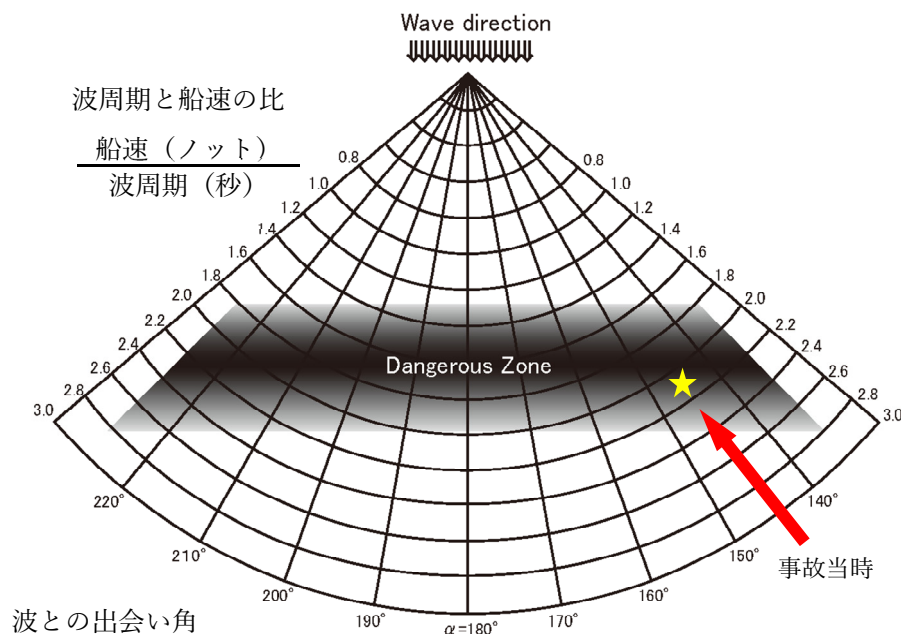


図 22 IMO の荒天中の操船ガイドライン

操船による大傾斜の可否の検討では波浪場は全て同一のものとした。回避の可否をより分かり易くするために、事故当時の海象を再現した波浪場に付加した集中波のパワーを再現実験で使用したものの2倍とした。そのため、改めてこの波浪場で大傾斜が発生する状況を再現している。

8.1 変針による回避

変針とは IMO ガイドラインの波との出会い角 (α) を変更することを意味する。復原性にとって波との出会い角は大きな要因で、出会い角が違えば波との出会い周期や船体の没水形状が異なり復原力に大きな影響を与える。

荷崩れを誘起する波が発生する時間と場所は再現実験により特定されている。その波に出会い角を変えて遭遇させるためには、再現実験とは異なる航跡を航走させる必要がある。また、航跡が異なるために、模型船の加速開始時間を調整する必要もある。

本実験では IMO ガイドラインを参考に α を ± 10 度 ($\alpha = 135, 155$ 度) 変更して行うこととした。

航跡の比較を図 23 に示す。縦軸は X 軸座標で、横軸は Y 軸座標である。赤線が再現実験 ($\alpha = 145$ 度) で、青線が $\alpha = 135$ 度で、黄緑線が $\alpha = 155$ 度である。赤線は左旋回しているが、それ以外の 2 ケースは自動操舵により目標方位が維持出来ていることがわかる。

船体運動の時系列データの比較を図 24~26 に示す。図 24 は縦軸がロール角、図 25 は縦軸がピッチ角、図 26 は縦軸が船首方位角である。

ロール角は黄緑線の変動は殆どなく、青線の最大値は 18 度程度であったが、18 度では荷崩れの閾値には達しない。追波状態に近づいた黄緑線はロール運動を殆どせずに、横波状態に近づいた青線は比較的大きなロール運動となっている。これは波浪中の船体運動の傾向と同じである。

ピッチ角は 3 ケースとも ± 2 度程度の振幅があり、目標の波に到達していると考えられる。波との出会い角変更することで出会い周期が変更され、ピッチ運動の周期も斜め追波状態の青線が一番短く、追波状態に近づけた黄緑線が一番長くなっていることがわかる。

船首方位は青線が 17 秒付近から僅かに左に旋回していることがわかる。これは船体が右舷側に傾斜したことによる影響と考える。しかし、傾斜が減衰すると目標方位に戻っていることがわかる。13 秒付近から黄緑線がプラスの値となっているが、これは追波に近づけたことで舵効きが悪くなり船首方位の修正に時間を要したと考えられる。

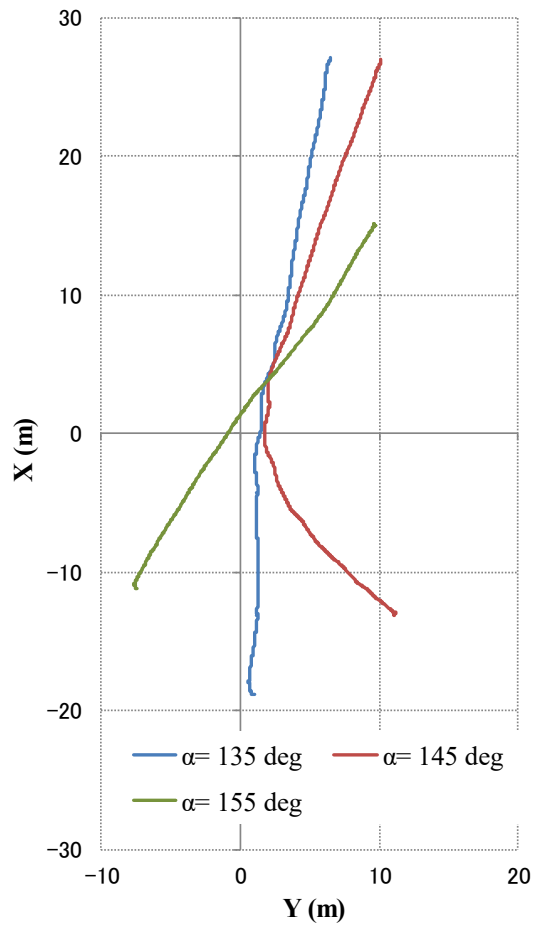


図 23 航跡の比較 (変針による回避)

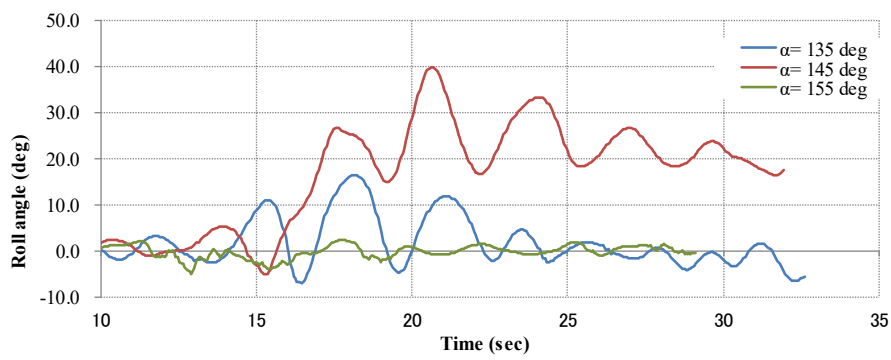


図 24 ロール角の比較 (変針による回避)

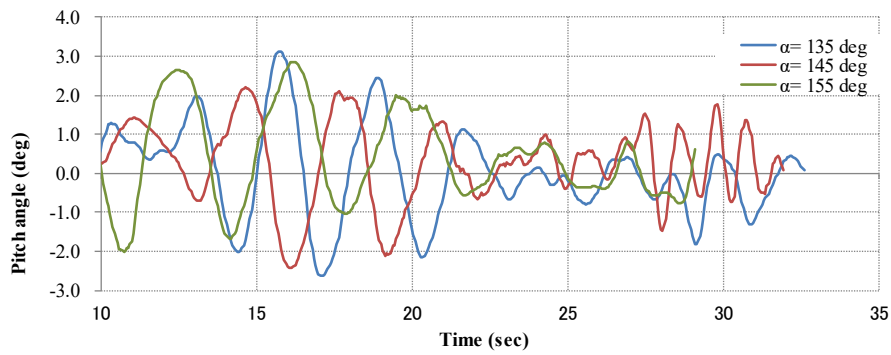


図 25 ピッチ角の比較 (変針による回避)

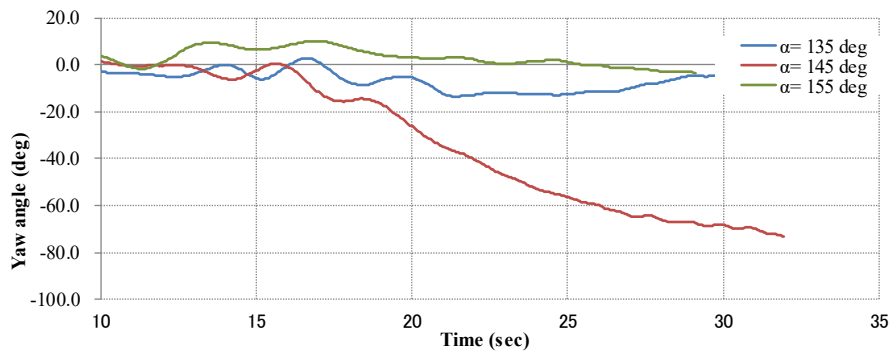


図 26 船首方位角の比較 (変針による回避)

以上のことから、今回の実験状態では±10度変針して波との出会い角を変更することで、荷崩れを発生させることを回避することが可能であった。

9.2 減速による回避

IMO ガイダンスでは船速を変更することで危険な状態を回避出来るとされている。船速を変更するということは、波との出会い周期を変更することを意味している。波との出会い周期を変更することで、復原力の小さい状態に留まる時間を短くして転覆の危険性を軽減する。

本実験では事故当時の船速（21kt）から 2kt と 5kt 減速して行うこととした。変針した際と同様に波浪場は再現実験で用いたものと同一のものとした。

航跡の比較を図 27 に示す。縦軸は X 軸座標で、横軸は Y 軸座標である。赤線が再現実験（U=21kt）で、青線が U=19kt で、黄緑線が U=16kt である。赤線は左旋回しているが、それ以外の 2 ケースは自動操舵により目標方位を維持出来ていることがわかる。

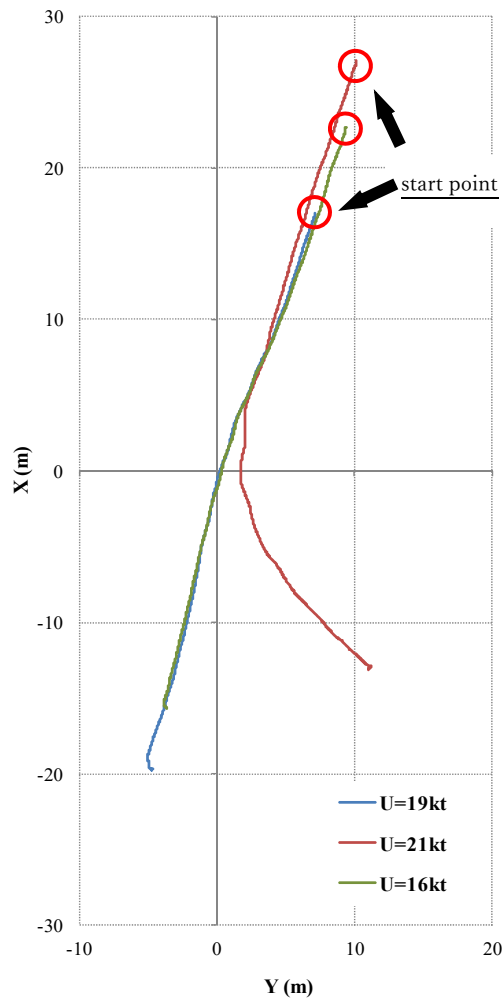


図 27 航跡の比較（減速による回避）

船体運動の時系列データの比較を図 28～30 に示す。図 28 は縦軸がロール角、図 29 は縦軸がピッチ角、図 30 は縦軸が船首方位角である。

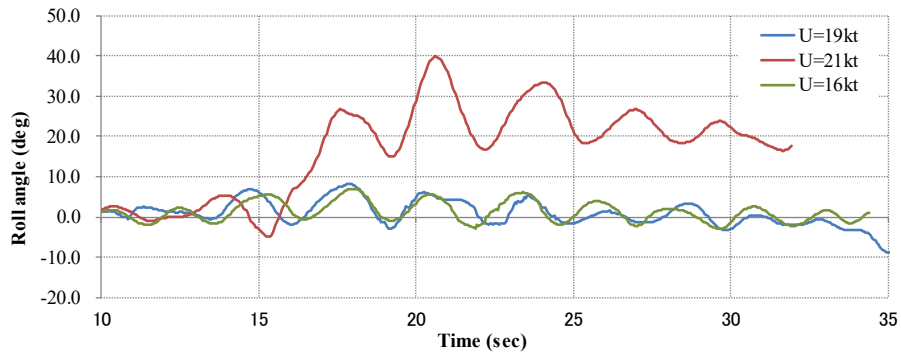


図 28 ロール角の比較 (減速による回避)

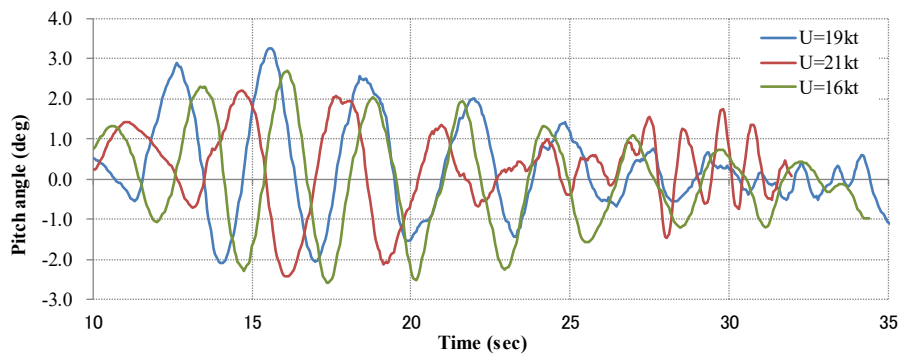


図 29 ピッチ角の比較 (減速による回避)

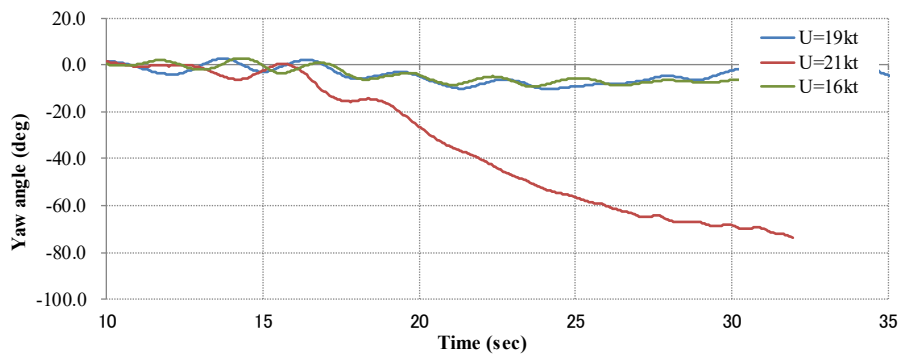


図 30 船首方位角の比較 (減速による回避)

ロール角は青線と黄緑線ともに最大で8度程度であった。これらは荷崩れの閾値には達していない。一方、ピッチ角は3ケースとも同じような傾向を示している。本実験では左斜め追波のため、減速することで波との出会い周期が短くなる。赤線と青線との相違は顕著ではないが、黄緑線はピッチ角の周期が短くなっていることがわかる。

船首方位は青線がほぼ目標方位を維持出来ているが、黄緑線が僅かにマイナスの値となっている。追波中や斜め追波中を航行している船舶は舵効きが悪くなることが知られているが、黄緑線は他のケースに比べて船速が遅いためにより一層舵効きは悪くなり目標方位との誤差を修正しきれないと考えられる。また、追波中や斜め追波中では波との出会い周期でヨー運動を生じるが、両者ともピッチ角の周期とほぼ同様の周期でヨー運動していることがわかる。

以上のことから、今回の実験状態では2ktと5kt減速することで、荷崩れを発生させることを回避することが可能であったと考えられる。

10. 結 論

高速 RO/RO フェリーが斜め追い波中を航行している際に大傾斜に至るという現象を水槽実験で再現すること及びその発生状況を詳細に解明した。

第 3 章では事故発生当時の波浪推算結果を基に実海域再現水槽内に波浪場を再現出来ることが確認された。

第 4 章では上記で再現された波浪場中で模型船を自由航走させて大傾斜が発生するかどうかについて確認を行った。残念ながら上記波浪場だけでは荷崩れを生じるようなロール角には達しなかった。しかし、上記波浪場の周波数スペクトルの 1%に相当するパワーの集中波を付加することで、荷崩れを生じるようなロール角に達することが確認された。計測された船体運動は事故報告書に記載されている内容と同様のものであった。また、荷崩れが発生直後に自動操舵を解除して舵中央で航走した際に計測された航跡と事故当時の AIS データを比較したところ、ほぼ一致していることが確認された。

第 5 章では大傾斜の発生メカニズムについて検討を行った。出会い波の計測を行ったところ、荷崩れを誘起した波は事故報告書に記載されている有義波高の 1.5 倍程度であることが確認された。また、定置式波高計の計測から荷崩れを誘起したと考えられる波条件の推定を行った。この結果からも事故報告書に記載されている波条件と一致した。推定された規則波中で自由航走による船体運動の計測を行ったが、荷崩れが生じるようなロール角には達しなかった。規則波中と上記再現実験で得られた船体運動の比較を行い、荷崩れが生じるロール角に達するためには波に遭遇した際の船体姿勢や波との出会い角、斜航角などの条件が必要であることが確認された。

第 6 章では大傾斜後の左急旋回について検討を行った。直立状態での $\delta = -35$ 度旋回と右舷側に定傾斜を与えた状態での旋回試験を行い、定傾斜が旋回性能に及ぼす影響を確認した。事故当時の定傾斜の半分の定傾斜で行ったところ、 $\delta = -8$ 度の旋回でも直立状態の $\delta = -35$ 度旋回よりも旋回径が小さくなることが確認された。しかし、定常状態に至るまで時間を要するために、アドバンスは直立状態よりも長くなることが確認された。

第 7 章では荷崩れが大傾斜に及ぼす影響について検討した。海象と航跡、時刻を一致させた状態で航走させたところ、荷崩れが生じなければロール運動は減衰して目標方位に向けて航走出来ることが確認された。

第8章ではIMOの荒天中の操船ガイダンスを参考に操船により大傾斜を回避することが出来るか検討を行った。操船方法は変針と減速によるものが考えられ、これらについて水槽実験を行った。本実験では針路を±10度変針することで荷崩れを生じるロール角には達しないことが確認された。また、減速した場合には実船相当で2ノットと5ノット減速することで荷崩れを生じるロール角には達しなかったことが確認された。

本研究で得られた結論は、事故報告書に記載されている内容とほぼ同様のものとなった。本事故については動的な影響は少ないと考えられる。

これらの水槽実験を通して高速RO/RO船が大傾斜に至った主たる原因は荷崩れによるものと考えられる。しかし、荷崩れを誘起したと考えられる波は、実海域で遭遇する可能性のある波である。遭遇したと考えられる規則波中での船体運動では15度程度のロール角が計測されているが、波に遭遇した際の船体姿勢や出会い角、斜航角など条件が重なるとそれ以上のロール角が発生する可能性があることが確認された。実海域を航行する際には、波との出会い角や出会い周期に注意する必要があると考える。

また、事故報告書では静止摩擦から荷崩れが生じる横傾斜角を算出しているが、ロール運動によって生じる積荷の横加速度を考慮する必要がある。その場合には荷崩れを生じる横傾斜角はより小さい値となることが考えられる。そのため、荷崩れを生じないための積荷の固定にはより一層の注意を払う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] 加藤弘, 佐藤正彦, 元良誠三 : 洞爺丸等の転覆事件に関する実験的研究, 造船協会論文集, 第 101 号, 昭和 32 年 5 月
- [2] 石田茂資, 村重淳, 渡辺巖他 : 波浪中における RO-RO 客船の甲板上浸水と損傷時復原性に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 179 号, 1996
- [3] 不破 健, 吉野泰平, 他 2 人 : 小型船のブローチングに関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 150 号 (1981).
- [4] 運輸安全委員会 : 船舶事故調査報告書, 運輸安全委員会, MA2011-2, 2011.
- [5] 高石敬史, 平野雅祥, 猿田俊彦, 高品純志, 中島利夫 : フィンスタビライザー及び舵の横揺れ軽減効果について, 関西造船協会誌, 第 171 号, 昭和 53 年 12 月
- [6] 竹沢誠二, 小林顕太郎, 笠原昭夫 : 長水槽内で発生させた方向スペクトル波について, 日本造船学会論文集第 163 号, 1988
- [7] 谷津克治, 上野道雄, 田口情邦, 藤原教文, 宮崎英樹, 沢田博史, 塚田吉昭 : 実海域再現水槽, 海上技術安全研究所報告, 第 10 巻第 4 号
- [8] 高石敬史, 渡辺健二, 増田 光一 : 出会い群波現象の確率論的解析, 日本造船学会論文集, 第 180 号, 1996
- [9] UENO Michio, MIYAZAKI Hideki, TAGUCHI Harukuni, KITAGAWA Yasushi, TSUKADA Yoshiaki : Reproduction of an Actual Sea and Ship Motion Using the All-round Wave Generator, Proceedings of OCEANS 2011, September 2011.
- [9] UENO Michio, MIYAZAKI Hideki, TAGUCHI Harukuni, KITAGAWA Yasushi, TSUKADA Yoshiaki : Model experiment reproducing an incident of fast ferry, JMST, Volume 18, June 2013.
- [10] MIYAZAKI Hideki, UENO Michio, TAGUCHI Harukuni, KITAGAWA Yasushi, TSUKADA Yoshiaki, KURODA Takako : Experimental study about avoiding dangerous situations of a RO/RO ferry in a quartering sea, Proceedings of The 12th PRADS, October 2013.

- [11] International Maritime Organization (1995) : Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas , MSC/Circ. 707 Ref.T1/2.04
- [12] International Maritime Organization (2007) : Revised Guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, MSC 1/Circ. 1228 Ref.T1/2.04

謝 辞

横浜国立大学大学院工学研究院システムの創生部門教授鈴木先生には、本研究の取りまとめを勧めて頂き、懇切丁寧な御指導と有益な御助言を数多く頂きました。心より感謝申し上げます。

著者に本研究の機会を与えてくださった海上技術安全研究所谷澤克治研究統括官、海上技術安全研究所流体性能評価系運動性能研究グループ上野グループ長や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田口グループ長には心より感謝いたします。また、本研究の水槽実験は、海上技術安全研究所運動性能研究グループ沢田博史氏や海上技術安全研究所運動性能研究グループ塚田吉昭主任研究員、海上技術安全研究所運動性能研究グループ北川泰土主任研究員と試行錯誤の上に成し遂げられたものです。心より感謝いたします。

流体性能評価系をはじめとする海上技術安全研究所各研究系等およびその他関係機関等において、これまでの研究を指導して下さった方々や共に研究に励んできた方々、また、陰ながらに研究活動を支えてくださった多くの方々に、心より御礼申し上げます。