



## 沖合波浪およびAISデータを用いたフェリー海難の事故分析に関する研究

笹，健児

若林，伸和

小林，英一

寺田，大介

塩谷，茂明

---

(Citation)

土木学会論文集B3（海洋開発）, 67(2):I\_832-I\_837

(Issue Date)

2011

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2011 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002905>



# 沖合波浪およびAISデータを用いた フェリー海難の事故分析に関する研究

## A STUDY ON CASUALTY ANALYSIS OF FERRY USING OCEAN WAVE DATABASE AND AIS DATA

笹健児<sup>1</sup>・若林伸和<sup>2</sup>・小林英一<sup>3</sup>・寺田大介<sup>4</sup>・塩谷茂明<sup>5</sup>

Kenji SASA, Nobukazu WAKABAYASHI, Eiichi KOBAYASHI,  
Daisuke TERADA and Shigeaki SHIOTANI

<sup>1</sup>正会員 博(商船) 広島商船高等専門学校准教授 商船学科  
(〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野4272-1)

<sup>2</sup>非会員 博(工) 神戸大学大学院教授 海事科学研究科  
(〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)

<sup>3</sup>非会員 工博 神戸大学大学院教授 海事科学研究科(同上)

<sup>4</sup>非会員 博(工) 水産工学研究所研究員 漁業生産情報工学部(〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)

<sup>5</sup>正会員 工博 神戸大学大学院教授 自然科学系先端科学融合研究環  
(〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町5-1-1)

It is inevitable to maintain the safety of cargo for vessels during the navigation. This study reveals some operational difficulties of cargo management in rough weathers from some interviews. These casualties tend to happen in weather conditions due to atmospheric depressions. Two cases of cargo damage happened in each ferry are analyzed in detail, using offshore wave and AIS database. Numerical simulations of ship motions reveal that roll motions of "A Maru" have increased more than three times after she has altered her course. It would cause the chaotic cargo shift by repeating roll motions in high waves. It is shown that condition of vessels, waves, and cargo loading are inevitable to estimate the safety of cargo damage. Offshore waves and AIS database make possible to estimate the situation of marine casualty on some level. In future studies, the relation between ship motions and cargo damage must be grasped, including dynamic forces to prevent these casualties.

**Key Words :** *Cargo damage, ship motions, offshore wave, AIS data, freak wave, cargo lashing, ferry cargo, RO/RO cargo*

### 1. 研究の目的

船舶の海難は一旦発生すれば、人命の損失だけでなく、積載貨物や燃料油、船舶が海洋中を漂流し沿岸環境の甚大な被害も伴う。海難防止を実現するため、航海中、係留中、入出港時、錨泊時などの船体運動が理論的および実験的に研究され<sup>1),2),3),4)</sup>、船体構造や係留設備のあり方について技術革新が順次実施されてきた。船体運動を考える場合、その外力条件である波浪が重要であることは議論の余地がないが、広範囲な海域を移動し続ける船舶にとって正確な波浪情報を得ることは容易ではない。港湾工事や沿岸防災を主目的に、ナウファスの沿岸波浪データが整備されるようになり<sup>5)</sup>、近年はホームページ上にてもリアルタイム値が提供されるまでに発展してきた。ホームページ上でも実況値が全国規模で確認

できるシステムは船舶関係者にとっても、運航判断を行う上で貴重な情報源となっている。しかし、一昨年に三重県の沿岸にて大きな船体動搖が発生した後に航行不能となったフェリーA丸の海難事故など、荒天時における船舶の安全管理は未だ課題も多く残されている。言い換えれば、近年、技術革新がめざましい波浪情報システムをもとに船舶や積載貨物の安全限界を推定する方法論に改善の余地があると考えられる。この点について検討を進めるにあたり、まず荒天時の貨物損傷という問題点を正確に把握する必要があると考えた。本研究では現場関係者を対象に荒天時の運航管理における問題点を聞き取り調査した。つぎに過去の事例から荒天時に航行していた船舶が船体破損した海難時の波浪データ、さらに船舶AISデータの関係を分析し、貨物損傷に至った背景を船体動搖の数値シミュレーションにより再

現・検証することで海難を誘発した要因・背景を考察した。これらより、今後の貨物損傷を防止する上で重要な点を取りまとめた。

## 2. 荒天時の貨物損傷および運航上の調査

データ分析を進めるにあたり、現場では荒天時の運航や貨物損傷についてどのように対応しているのか、またどのような点を問題と感じているのかを把握する必要がある。そこで船舶関係者を対象に聞き取り調査を実施し、荒天時における運航と貨物管理の問題点を取りまとめた。表-1に主な調査内容について、要約したものを示す。

表-1 荒天時の運航における運用状況

調査項目	現場での状況
荒天時の貨物損傷の経験	過去に何度か経験がある。特に低気圧の発達時に多い
積載貨物の種類	車両またはシャーシに様々な種類の貨物を積載している。紙ロール、穀物などは積載重量が大きいので注意が必要
貨物の損傷が発生しやすい場所	上側の甲板の方が下側よりも損傷しやすい。縦揺れや船首揺れのような回転運動の影響により、船首および船尾スペースが損傷しやすい。このため、荒天時には当該スペースには積載しない
運航判断の基準	船体運動、貨物への衝撃を考慮して決めるが、波浪予報値やナウファスの実況値を参考に経験的に判断する。ラッシングワイヤーの張力を静的に計算した結果も参考として検討している。
運航判断が難しいと感じる点	船体運動を推定する手段を現場では持たないので、経験的に見積もるしかない。利用している波浪予報サービスの精度が未だ不十分であり、これまでにも実際の波浪が予測値と大きく異なることがあった。
荒天時の波浪と船体運動について	有義波で議論されることが多いが、1000波に1回程度出現する極大波の存在が最も危険である。極大波の予報精度を高められないか?

表に示すとおり、荒天時、特に低気圧が発達する状況での運航判断が非常に難しい状況が窺える。また貨物損傷が発生しやすい区域も経験的に把握しており、荒天が予想される場合には船首、船尾のスペースには積載しない、ラッシングワイヤーの本数

を増やすなどの対応をしている。しかし、様々な貨物を積載した車両が不定期に到着する状況にて最適な積載位置を決定することは容易ではない。波浪予報の精度も計算機の大型化・高速化によって向上しているものの、急に発達する低気圧まわりの波浪場の予報精度は不十分な点も多いことが分かる。この中で全国規模の波浪実況値であるナウファスは船舶運航者にとっても非常に貴重な情報源であることも分かった。ナウファスの配信データは有義値（周期帯別の波浪情報も含めて）をベースに最大波の値も提供されている。1000波に1回程度出現すると言われる極大波については、これらをもとに推定することになるが、現状では有義波高の約2倍という経験則をもとに推定・対応している。

## 3. 貨物損傷を伴う海難の分析例

前章にて現場での運用状況および問題点がある程度明らかとなったが、海難に至った事例について定量的にデータ整理することが重要であると考えた。ここではフェリーの貨物損傷に関する海難事例について、当時のデータを分析し事故に至った背景などを考察する。

### (1) フェリーA丸の事例

2009年11月12日に東京を出港し、沖縄へ向けて航行中であったフェリーA丸が13日の早朝に三重県尾鷲沖で操船不能となり、そのまま漂流した後に沿岸域で座礁に至った事例を対象とする。対象としたフェリーA丸は全長167m、垂線間長150m、幅22.8m、喫水6.2mの長距離フェリーであり、航海速力は24.9ノットである。図-1に座礁後の船舶の様子を示す。



図-1 座礁後のフェリーA丸の様子

図より座礁時には船は右側に大きく傾き、事故報告のとおり、船の復原性を完全に喪失した状態となっていることが分かる。当該海難は2011年2月下旬に審判結果が公表されたため<sup>6)</sup>、著者らは当時の新聞報道等からの情報を整理することで事故の経過を取りまとめた<sup>7),8)</sup>。その後公開された報告書の内容とは大きな違いは見られず、船長は「突然の三角波により船が大きく傾いた」「積荷は出港前に荒天に備

えた固縛をしており、事故の1時間前である午前4時に点検した時点もラッシングに問題はなかった」と述べている。ではなぜ荷崩れがこのように発生したのであろうか、この点について入手できるデータをもとに検討してみる必要がある。船舶の位置、速力、方位については当該船舶に備え付けられているAIS（船舶自動識別装置）のデータを入手し、11月13日の0:00～12:00までの12時間について分析した。図-2に当日の船舶の航跡図を示す。

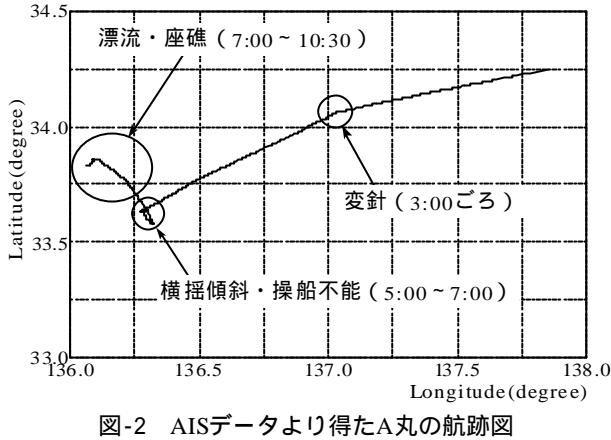


図-2 AISデータより得たA丸の航跡図

図より当日の3:00ごろに針路を東南東から南東方向へ変更しており、その2時間後である5:00過ぎに操船不能となった。航跡より船が左まわりに旋回した後に沿岸方向へ漂流している様子が分かる。ちょうどA丸が遭難警報を発した時間帯に合致する。このときの気象条件は日本の南で低気圧が発達する気圧配置となっていた。図-3に11月12日の9時と13日の9時の天気図を示す。

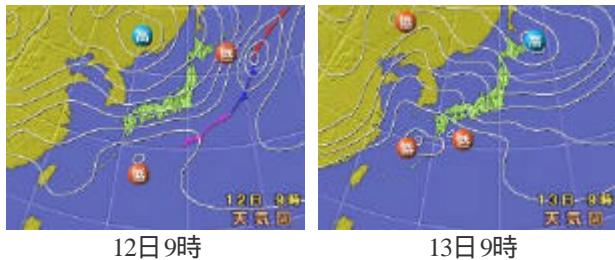


図-3 海難時の天気図の変化

前日に四国の南側に低気圧、大陸に高気圧が位置する影響で等圧線が東西に混み合う気圧配置となっており、13日の9時には低気圧が本州の南側にもう一つ発達している。天気図の等圧線より、海難の生じた尾鷲では東方向からの強風が連吹していた状況が裏付けられる。幸いにも海難地点から20km程度の海域にナウファスの波浪観測点が存在し、当該データを分析することによって海難時の波浪特性を取りまとめる。当該地点は沖合に位置し、東北沿岸を中心に津波観測を目的として設置されたGPSブイ式の波浪計の1つである。図-4に波浪計による観測波形を示す。

た11月13日の有義波、最大波、船速、船首方位の時間変化を整理したものを示す。

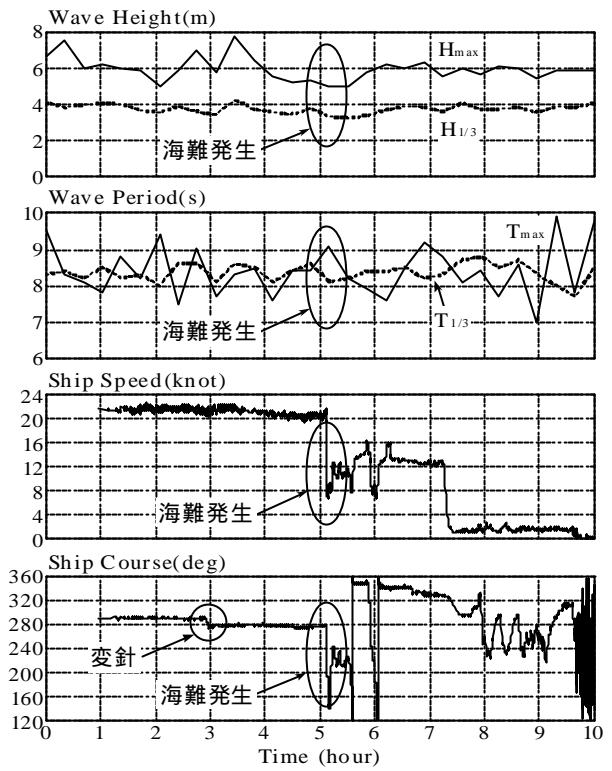


図-4 海難当時の有義波、最大波、船速、船首方位の時間変化（2009年11月13日）

有義波高は前日から強まった強風で4m程度まで発達し、13日の未明からこの状態で大きな変化は見られない。一方、最大波高は時間ごとでばらつきがあり、3:20に約8mまで増大したが5:00すぎには5～6mであった。有義周期および最大周期は8～9sで微変動している。この値だけから見ると海難発生の5:00ごろに特別に波浪条件が厳しくなったという状況は見出せない。船速は3:00ごろまで22ノット前後であったのが4:00～5:00には20ノットまでわずかに低下していることが分かる。5:00すぎに20ノットから8ノットまで低下し、7:00すぎまで12ノット前後で変動した後に2ノットに低下した。2ノットの速力は風浪によって漂流している状況を示している。船首方位は300°から3:00ごろに約20°変針し、約280°で航行していた。図には記載していないが、当時の波向は80°。前後でほぼ一定していたため、船に対する相対波向は3:00までは船尾から15°の方向であったのが、変針によって船尾から35°の方向に変化したことになる。すなわち、斜め後方の追波状態で海難時まで航行していたことになる。前章で示したとおり、極大波の出現傾向、波浪の不規則性が重要であるとのコメントを得たため、ここでも観測波形を整理した。図-5に11月13日の3:00～4:00、5:00～6:00におけるGPS波浪計による観測波形を示す。

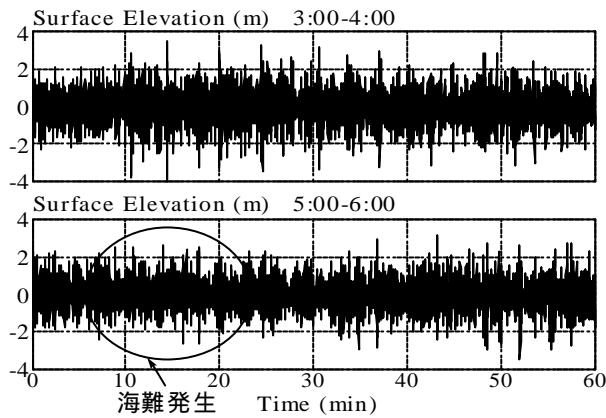


図-5 11月13日の観測波形（尾鷲GPSブイ波浪計）

有義値で比較すると両者はほぼ同じであるが、最大波は3:00～4:00の方が大きい。事故発生の5:10～5:20における波形を見ると、波浪計の設置位置から20km程度離れているが、乗組員が証言した極大波の存在は確認できない。しかし、波浪が伝播する際に地形の影響で波高が局所的に非常に大きくなることがあるため、船長の証言通りに事故海域で急に大きな三角波が来た可能性、観測された波浪と類似した波浪が伝播することで船体運動が発生し、固縛が不十分なため、またはカオス的現象により貨物損傷が発生した可能性のそれぞれが考えられる。

## (2) フェリーS丸の事例

フェリーA丸の海難の他にも貨物損傷を伴った事例は存在するが、ここでは2010年12月22日に発生したフェリーS丸の事例を取り上げる。残念ながら当時の波浪データを入手することができなかつたため、AISデータと当時の気圧配置を中心に考察した。フェリーS丸は関東と北海道を往復する大型フェリーであり、主要目は全長190m、垂線間長175m、幅26.4m、満載喫水6.6m、航海速力24ノットである。12月22日は接近した低気圧の影響が懸念され、欠航を含めた検討が行われた。船長は複数の波浪予報にて航海中に遭遇しうる有義波高の最大値は3m程度との情報であったため、過去の経験から荒天時の貨物固縛で対応可能と判断した。図-6に2010年12月22日の9:00および23日の9:00における天気図を示す。

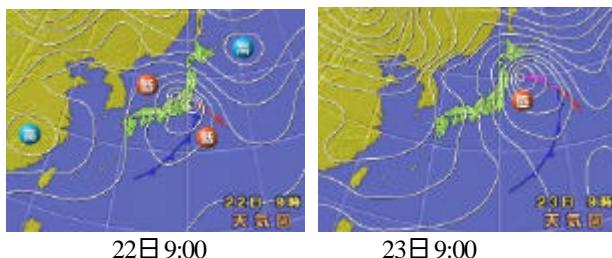


図-6 荒天航海時の天気図（2010年12月21日～22日）

21日の夜から22日の朝にかけて、前線を伴った低

気圧が九州近くに位置していたが、これが勢力を強めながら北東進している。22日の3:00に関東の南方、15:00には東北沖の海上に低気圧の中心があり、太平洋沿岸で波浪が強まつた状況が想像できる。宮城県沖での波浪予報値は有義波で3mであったが、図-7に示す宮城県江ノ島での有義波高の変動を見ると、22日の午後には最大で6mまで発達していることが分かる。これは予報値の2倍の値であり、実際に航海に出ると予報値をはるかに上回る波浪状況であったという船長のコメントを裏付けるものである。

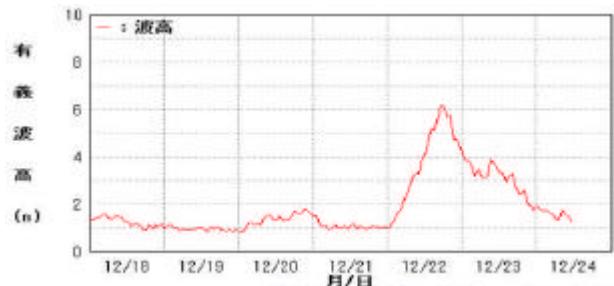


図-7 有義波高の変化（宮城県江ノ島）

図-8および図-9に22日のAISデータより、船の航跡図、速力・針路の変化を取りまとめた。

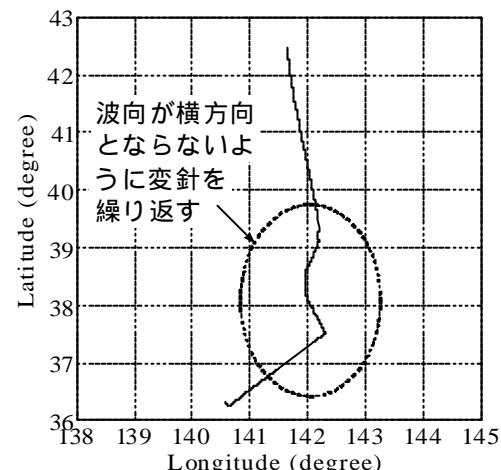


図-8 S丸の航跡図（2010年12月22日）

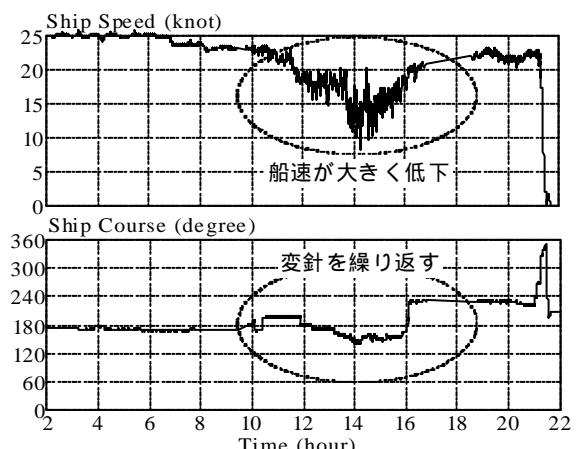


図-9 S丸の速力および方位の変化（2010年12月22日）

これらより、北海道から関東へ向かう航海中に予想の2倍近い波浪に遭遇し、有義値で5~6mであったことを考えると、最大波高で10m以上あったものと想像され、宮城県から福島県の沖では波浪を横方向に受けないように針路を200°から150°と変針を繰り返している。これは当該海域で通常の針路である南方向とすれば相対波向が横方向となってしまい、横搖れがこれ以上増加すると転覆の危険性があったためである。変針した影響で船首から斜め方向の向波状態となったため、今度は縦搖れが卓越したと推測できる。高波浪中で大きな縦搖れが続いた影響で船速が10ノット程度までに大きく低下している。変針すれば縦搖れが卓越することは予測できたが、A丸のような状況を避けるために苦肉の策であった。フェリーのため、横搖れを低減する減搖装置を作動させているが、船速がこれだけ低下すると減搖効果も期待できず、非常に危険な航海となったことが想像できる。荒天対策として船首、船尾スペースには貨物を積載しなかったこと、荒天用のラッシングを行ったためにシャーシの脚が破損した2台の貨物被害のみで留まった。しかし、波浪予報の精度が十分でなく、船体運動の特性、船体運動と貨物衝撃の関係を経験で予測している現状の困難さが窺える。

#### 4. 船体運動の再現から見た検証

観測データによって航海中の貨物損傷の状況がある程度明らかとなつたが、どの程度の船体運動が発生したのかについて、フェリーA丸の事例を参考に検証した。尾鷲地点で観測された波浪データを入力波形とし、船体運動を数値シミュレーションによって求めた。流体力および波力はストリップ法<sup>9)</sup>によって計算し、次式に示す運動方程式にて解析した。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 (M_{ii} + m_{ij}(\mathbf{s}_{1/3})) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^5 N_{ij}(\mathbf{s}_{1/3}) \dot{X}_j(t) + \\ \sum_{i=1}^5 C_{ij} X_j(t) = F_j(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $M$ は船体質量、 $m$ は付加質量、 $N$ は減衰係数、 $C$ は復原力係数、 $F$ は波浪強制力、 $X$ は船体位変、 $t$ は時間、添え字 $i$ および $j$ は船体運動のモードを示す。ただし前後揺れは考慮していないので5モードについて検討した。 $\mathbf{s}_{1/3}$ は次式で示す出会周波数を示す。

$$\mathbf{s}_{1/3} = \frac{2\mathbf{p}}{T_{1/3}} - kV \cos \mathbf{c} \quad (2)$$

ここで、 $T_{1/3}$ は有義周期、 $k$ は波数、 $V$ は船速、 $\mathbf{c}$ は船に対する相対波向を示す。数値計算にあたり、A丸の詳細なデータは当時審査中のため、入手できなかつたため、同じフェリーでA丸よりも若干大きい船型データを用いた。対象船舶の主要目は全長

186.0m、垂線間長170.0m、幅25.5m、喫水6.0m、排水量14,121t、メタセンター高さ3.24mである。ここでは相対波向が船尾方向からの追波状態となるため、縦搖れの影響はほとんど無視できるとして横搖れの値に絞って評価した。表-2にシミュレーションケースの内訳を、図-10に11月13日の2:00~3:00、4:00~5:00、5:00~6:00における横搖れの計算結果を示す。

表-2 シミュレーションケースの内訳

ケース	入力波形	波向(°)	船速(ノット)
1	2:00~3:00	15	22
2	4:00~5:00	35	20
3	5:00~6:00	35	20

(注) 波向は船尾方向をゼロとして船首へ向かって測った角度を示す

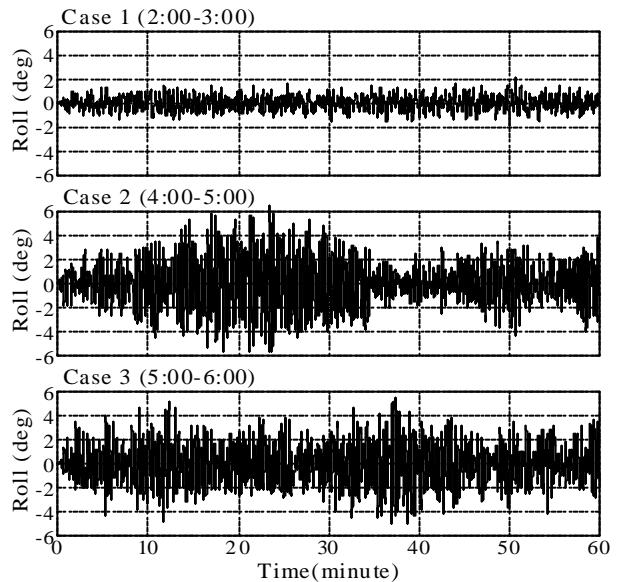


図-10 船体運動の計算結果（ケース1~3）

ケース1は船尾から15°の波向で航行していたため、横搖れ角も最大で2.0°と航行にほとんど支障のない状態であると考えられる。これに対し、ケース2およびケース3は相対波向が船尾から35°と斜め追波となった影響で最大横搖れ角は6.5°および5.4°発生した。A丸はここでの計算対象船より若干小さいこともあり、計算結果よりも大きな動搖が発生した可能性は高いと思われる。なお、ケース3は實際には途中で横搖れが過大となり復原性が喪失しているが、計算では復原性の喪失に至る結果は再現できなかった。3ケースとも波浪条件は有義波ベースではほとんど違いは見られないが、船首方位を300°から280°に変針させることで横搖れが約3倍に増大する結果が求められた。変針したことにより、横搖れが増大した影響が非常に大きいと推測される。運輸安全委員会の報告書<sup>6)</sup>では「本船にとって高波高の追い波中における危険範囲の状況下を航行していたため、左舷船尾約40°から波高約6.9mの波を受けた際、右舷側に約25°の傾斜が生じ、積載貨物が

横滑りなどの荷崩れを生じたことにより発生したものと考えられる。積載貨物が横滑りをしたのは、車両区域の甲板に自動車渡船構造基準に定められた過度の移動を防止するための措置を講じていなかったことによるものと考えられる。」としている。変針により追波中で横揺れが大きくなかった点は本研究でも検証できたが、6.9mの最大波が当該海域で発生したこと、これによって25°の横揺れが生じたことは著者らが入手したデータからは直接検証できなかった。巨大な三角波の存在が指摘されていたが、事故当時の有義波高がデータより3.5mであり、報告されている6.9mの波が三角波（Freak Wave）の波高と仮定すれば、両者の比は2より小さく、Freak Waveの定義<sup>10)</sup>とされる $H_{max}/H_{1/3} > 2.0$ には該当しない。よってFreak Waveというよりは通常の不規則波の中で十分発生しうる最大波と考えられる。事故当時、ナウファスの観測地点での最大波が5m程度であったことを考えると、地形や波浪の空間的な重ね合わせ、または非線形性で振幅が6.9mに増大した可能性は十分考えられる。ただし、計算結果でも示したとおり、横揺れ角は最大で10°も発生しておらず、この波浪条件で報告された25°の傾斜が発生するには以下の2通りの可能性が推察される。

横揺れが増大した中、高波浪中を航行する過程で針路保持のため当て舵を取る頻度が高い。船舶に舵力が働くと、外方傾斜という横揺れに近い現象が発生する。波浪による横揺れと同位相で操舵による外方傾斜が重なり、25°の横揺れ角が発生した可能性

横揺れを繰り返す中で積載貨物の固縛が緩み、貨物の移動による重心変化が発生しやすくなる。コンテナを甲板上に直接積載し、チェーン等でラッシングしていたため、徐々にラッシングが弱まり、ある時点ではカオス的な荷崩れの挙動が生じた可能性

欧州では車両貨物の積載方法にも詳細な基準があり<sup>11)</sup>、今後は貨物に作用する加速度などの衝撃力、ラッシングワイヤーに作用する張力変動なども把握し、船体運動および波浪との関係を明確にする必要がある。その意味で著者らは大型フェリーを対象に現地観測を開始しており、今後のデータ解析によって貨物損傷の特性を明確にすることが期待される。

## 5. 結論および今後の課題

結論および今後の課題は以下に要約される。

- (1) 運航者の多くは荒天航海中における貨物損傷を経験しているが、経験則による対応を余儀なくされており、船体運動と貨物損傷を動的に推定できるシステム、理論体系が望まれている。
- (2) フェリーの貨物損傷例を検証し、低気圧に起因する荒天でいずれも発生しているが、S丸の場合は横揺れが増大しないように変針を繰り返し、船首および船尾のスペースに積載しない等の対応でわざかの貨物損傷しか発生していない。
- (3) A丸が海難に発展する大きな横揺れが発生した理由としては、変針によって横揺れが増大する相対波向となったことが大きい。波浪外力のみでは25°の横揺れが発生するとは考えにくいが、操舵による当て舵時の外方傾斜と同位相になった場合には横揺れ角が大きく増大する可能性がある。
- (4) 変針後に10°前後の横揺れが2時間ほど継続した影響で、積載貨物の固縛が弱まり、カオス現象等で見られる貨物の荷崩れが突然発生したため、25°の横傾斜につながった可能性の両方が考えられる。
- (5) 今後は欧州での研究事例なども参考としながら、荒天時の貨物損傷と船体運動、波浪の関係を明確にしていく必要がある。

### 謝辞：

本研究の実施にあたり、尾鷲地点の波浪データを提供していただいた国土交通省、港湾空港技術研究所・海洋水工部・海象情報研究チームに深く感謝の意を表する。フェリー会社の関係諸氏には荒天時の貨物管理に関して貴重なコメントを頂くとともに、欧州での海上輸送時の貨物管理の事例に関し、University of Strathclyde（英国）のDr. Osman Turanに多くの助言と資料提供を賜った。ここに深く感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) 笹健児, 寺田大介：観測波を用いた沿岸航行の船体運動の再現性と欠航判断に関する研究，海岸工学論文集，第56巻，pp.856-860，2009.
- 2) 白石悟, 久保雅義, 上田茂, 横原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する船舶の動搖抑制対策，海岸工学論文集，第42巻，pp.941-945，1995.
- 3) 笹健児, 久保雅義, 白石悟, 永井紀彦, 趙翼順, 水井真治, 小林豪：外洋性港湾における入出港時の着離岸作業障害に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.1311-1315，2003.
- 4) 笹健児, Atilla Incecik, 永井紀彦, 清水勝義, 水井真治：荒天時の観測波を用いた港外避泊船の船体運動の再現性に関する研究，海岸工学論文集，第54巻，pp.1321-1325，2007.
- 5) 永井紀彦：ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）による我国沿岸の波浪特性の解明，港湾技研資料，No.863，113p.，1997.
- 6) 運輸安全委員会：船舶事故調査報告書（平成23年2月版），<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/ship/00detail.asp?ID=73>，90p.，2011.
- 7) 毎日新聞：平成21年11月14日朝刊，2009.
- 8) 産経新聞：平成21年11月14日朝刊，2009.
- 9) 元良誠三, 小山健夫, 藤野正隆, 前田久明：船体と海洋構造物の運動学，成山堂書店，362p.，1997.
- 10) 安田孝志, 森信人, 林修市：日本近海におけるFreak Waveの出現特性について，海岸工学論文集，第39巻，pp.131-135，1992.
- 11) Ulin, S., Andersson, H., Dichter, B., Hesselgren, G., Karnell, G., and Skoog, I., "Road Trailer Suitable for Sea Transportation", Research Report of MariTerm AB, 149p., 1984