船体運動と沿岸波浪に基づくフェリー欠航 の判断基準に関する検討

笹 健児*・寺田 大介*・永井 紀彦**・河合 弘泰**

A Study on Criterion of Judge of Ferry Cancel due to Ship Motions and Coastal Waves

Kenji SASA, Daisuke TERADA, Toshihiko NAGAI and Hiroyasu KAWAI

Abstract

From viewpoint of a ship safety and a cargo management, the examination of a criterion of judge of ferry cancel is carried out, based on both observed ship motions when the ship encounters a typhoon and coastal wave data at that time. Ship motions are observed by using 5,000GT type ferry boat. And as the wave data, coastal waves that recorded with NOWOHAAS instead of the encounter wave which can not be measured, are used. These data are analyzed by Spectral Analysis and the characteristics are analyzed in detail. Moreover, numerical reproductions of ship motions based on observed coastal waves are carried out, and a couple of future problems with respect to the decision of the criterion of judge of ferry cancel are considered.

Keywords : Ship motions, Judge of Criterion of cancel, Coastal waves, Cargo management

キーワード: 船体運動、欠航判断、沿岸波浪、貨物管理

1. 研究の目的

近年、原油価格の高騰や輸送環境の著しい変化に伴い、海上輸送においても旅客・貨物の安全性および効率性の確保がこれまで以上に厳しく要求されるようになった。しかし、輸送中の安全性と効率性はトレード・オフの関係にあり、多くの船舶運航者は両者のバランスを取った運航管理に苦慮している。その背景には荒天時における運航基準が今なお波高のみで規定され、欠航を判断する詳細なデータが不足する中で経験と勘に依存した対応をせざるを得ないことがある。船舶が係留中や入出港中における運用限界を検討する局面においても、波高ではなく船体運動にて評価しなければならないことが過去に実証された⁽¹⁾⁽²⁾。これと同様に航海中においても運航限界は波高ではなく、波浪の出会い角、出会い周期が反映された船体運動にて評価すべきと考えられる。

しかし、時々刻々に航行海域や航海条件が変化していく状況において、これらを総合的に網羅できるデータが十分とはいえない。上記背景より、本研究では外洋を航行する定期フェリーを検討対象とし、台風接近時に運航した時の船体運動を現地観測および分析した。この結果から航行中における船体運動の特性を整理分析し、現場関係者にヒアリングした内容との検証も行った。一方、全国規模で整備・運用されている沿岸波浪情報網のデータベースについても整理・分析し、沿岸波浪と船体運動の関係について周波数特性の観点から主に比較検討した。さらに沿岸波浪および船体運動のデータをもとに船体運動を数値シミュレーションによって検証し、その再現精度を検討した。これらの結果より、船体運動と沿岸波浪データに基づくフェリー欠航の新たな判断基準を提案するための基礎的検討を行った。

* 正会員 広島商船高等専門学校商船学科 (〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町東野 4272-1)

sasa@hiroshima-cmt.ac.jp, terada@hiroshima-cmt.ac.jp

** 非会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 nagai@pari.go.jp, kawai@pari.go.jp

2. 現状での欠航判断について

海上輸送は前述したとおり、気象海象の影響を陸上輸送よりも強く受けるため、船舶運航者は常に気象変化を考慮した航海計画を考慮しなければならない。特に外洋を航行するフェリーの場合、旅客や車両貨物を積載している関係から大きな船体動揺や波浪による衝撃力が発生しないような運航が要求される。過去にフェリー輸送における車両貨物の運航実態を調査した事例⁽³⁾によると、縦揺れまたは横揺れが大きくなった時に貨物への衝撃作用や荷崩れが発生しやすくなる。現状では航海中に荒天が予想される場合、ワイヤー等によるラッシングが行われているが、船体運動が大きくなった場合には貨物管理の限界があることが明らかとなった。このため、現場では天気図や波浪予報図など毎日の気象予報と運航者の経験をもとに欠航判断を行っている。本研究で対象としたフェリーの場合、概ね Table 1 のような欠航基準および船体運動の状況をもとに判断しているとのことであった。

Table 1 Present Criterion of Ferry Operation

	Comments of Operators
Criterion of ferry service	When the significant wave height exceeds 4m, we define the general criterion of ferry service. However, it is necessary to consider the cancellation in detail if typhoons approach.
Situation of ship motions	Pitch motion becomes remarkable in head sea during the navigation. When ferries enter the harbour, roll and yaw motions become larger near the breakwaters.
Damage of cargos	Cargos are sometimes damaged by the shock due to large ship motions.

表に示すとおり、船体運動が増大することで貨物損傷も時折発生しているにもかかわらず、現場では港外の有義波高のみを指標に欠航を依然として判断していることが分かる。

3. 航海中に増大する船体運動の観測

3.1 現地観測の詳細

前章にて船体運動による貨物損傷などが問題と認識されているが、有義波高のみで欠航判断している状況の背景には現地での船体運動および波浪等のデータが十分に整理・検討されていないことが挙げ

られる。そこでまず太平洋を航行する中型フェリーを対象に台風接近時での船体運動を連続観測した。観測は2003年および2004年の台風接近時でフェリーが運航した時に実施し、対象としたのは大阪と高知を結ぶ 5,000DWT 型のカーフェリー（垂線間長 109m、幅 21m、喫水 4.5m、排水量 6,032t、メタセンタ高さ 1.4m）である。Fig.1 に対象海域（波浪観測点を含む）およびフェリーの航海ルートを示す。

Fig. 1 Navigation route and wave observation points

図に示すとおり、大阪湾、紀伊水道および太平洋を航行し、室戸岬の沖で大きく変針するのが特徴である。船体運動の観測は過去にいくつかの船型にて計測精度が実証されている船体運動測定装置⁽⁴⁾をフェリーの船橋に設置した。本装置は GPS、光ジャイロ、ジャイロコンパスの 3 系統により構成され、時々刻々の位置、方位、船体動揺量、船体速度、船体加速度を連続観測した。

3.2 船体運動の解析結果

Fig. 1 に示すとおり、航海ルート中における対象海域を 3 海域に分類した。観測データを航海、海域ごとに整理・分類し、まず時系列ベースで船体運動の特性把握を行った。洋上を航行中の船体運動を考える場合、船首方位および波向（それぞれ絶対方位）の関係から求められる相対波向が重要となる。Fig.2 に本研究にて定義した相対波向の測り方を示す。出会い周波数を計算する符号に合わせるため、船尾からの追波を 0° 、船首からの向波を 180° と定義している。Fig. 3 は 2003 年 9 月 21 日から 22 日にかけての深夜に室戸沖を大阪に向かって航行中に発生した縦揺れ、船速および船首方位の時系列を示す。

図より、縦揺れ角は最大で片振幅 5° 近く発生しており、Table 1 に示す状況に近いことが分かる。船

速は室戸岬付近で 18 ノットから 12 ノット程度まで減速しており、船首方位は 90° から 45° へと変針している様子が確認できる。

Fig.2 Definition of relative wave direction

Fig. 3 Observed time series of pitch motion, ship speed and gyro course around Cape Muroto (September 21-22, 2003)

一方、Fig. 4 は 2004 年 7 月 29 日から 30 日にかけての深夜に同じく室戸岬の沖で観測された縦揺れ、船速、船首方位の時系列を示す。このケースにおいても、片振幅で最大 4° 近くの縦揺れが発生しているが、全体的に見ると Fig. 2 の縦揺れよりは幾分小さい。船速は Fig. 3 のケースよりもやや大きい 16 ノット前後で航行しているが、船首方位の変化はほぼ同じであった。これら船体運動データより、室戸

岬の沖で縦揺れが非常に大きくなる点を中心に分析を進める。

Fig. 4 Observed time series of pitch motion, ship speed and gyro course around Cape Muroto (July 29-30, 2004)

4. 沿岸波浪データと船体運動の関係

4.1 沿岸波浪データの分析結果

欠航を判断するにあたり、波浪データも船体運動と共に重要となる。ただし、時々刻々の船体位置における波浪データを得ることは非常に困難であり、何らかの実用的な方法によって波浪特性を把握する必要がある。我が国には全国規模で港外および沿岸域における波浪を観測し、観測データをネットワーク処理した全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS、ナウファス）が構築・稼動している⁽⁵⁾。当該システムは港湾工事や沿岸防災などへの情報提供およびデータベース化を目的に構築されたが、著者らは港内係留船や入出港する船舶の船体運動を検討する際にも活用してきた。本研究にて対象とする海域にも Fig.1 に示すとおり高知、室津、潮岬と 3 点ほど観測ポイントがあり、さらに室津から数キロ離れた室戸沖には津波検知を目的に GPS ブイによる波浪観測が 2004 年より開始された。これら波浪データを用い、船体運動との関係を検討する。Fig. 5 は Fig. 3 の船体運動が発生した 2003 年 9 月 21 日 22:00 に室津で観測された 20 分間の波浪時系列を示す。この

ときの有義波高は 1.01m、有義周期は 9.3s であった。

Fig. 5 Variations of significant waves in Sept. 21, 2003

Fig. 6 は Fig. 4 の船体運動が発生した 2004 年 7 月 30 日 0:00 に観測された室津と室戸 GPS ブイで観測された 20 分間の時系列を示す。

Fig. 6 Time series of observed waves in July 29-30, 2004

この時の波浪条件は室津で波高 0.85m、周期 12.0s であるのに対し、沖合では波高 2.97m、周期 11.8s であった。図からも明らかであるが、沖合の観測波が室津の観測地点では約 3.5 分の 1 に低減していることが分かる。これは観測位置の地理的な関係より、室戸岬の東側から来襲する波浪成分が岬によって遮へいされるなどの影響が強く出ているものと思われる。周波数特性は両者ともほぼ同じであった。このように台風接近・通過に伴ううねりの伝播中を船速や針路を変更しながら航行している様子が分かる。

4.2 波浪データと船体運動データの関係

ここでは沿岸で観測された波浪データをもとに現地観測にて得られた船体運動のデータとの関係を調べた。両者の関係を比較するため、それぞれの時系列データをスペクトル解析し、周波数領域でのエネルギー特性を求めた。スペクトルは自己回帰モデルによって求めた AR 係数をもとに次式で算定した⁽⁶⁾。

$$S(f) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^m a_j \exp(-i2\pi f_j) \right|^2} \quad (1)$$

ここで、 $S(f)$ はスペクトル、 a は AR 係数、 f は周波数、 σ は分散を示す。さらに船体運動と波浪の応答関数は次式にて求められる。

$$R(f) = \frac{S_P(f)}{S_W(f)} \quad (2)$$

ここで、 $R(f)$ は船体運動応答関数、 $S_P(f)$ は船体運動のスペクトル、 $S_W(f)$ は波浪のスペクトルを示す。Fig. 7 は Fig. 3 に示す縦揺れと同時刻における室津で観測された波浪のスペクトルと両者から求めた応答関数を示し、Fig. 8 は Fig. 4 に示す縦揺れと室津および室戸沖合で観測された波浪のスペクトルと応答関数をそれぞれ求めたものを示す。

Fig. 7 Spectrums and response function about pitch motion and wave (September 21-22, 2003)

Fig. 8 Spectrums and response function about pitch motion and wave (July 29-30, 2004)

Fig. 7 の場合、縦揺れのピーク周期は 8s、波浪のそれは 11s および 5s 近くに 2 つのピークが存在す

る周波数特性となっている。前者が台風から伝播してきたうねり成分、後者は風波成分と考えられ、両者が共存している。一方、Fig. 8 の場合は縦揺れのピーク周期が 8s に対して波浪のそれは 12s 近くにあり、室戸および室津ともに単一のピークをもった形状で周波数特性は同一と見なせる。両ケースとも応答関数のピーク周期は 8~9s に見られるが、Fig. 7 の方が波浪の縦揺れのピーク周期に近い分、船体運動が多少大きくなっているものと推定される。

5. 沿岸波浪による船体運動の数値予測

前章にて港外の波浪条件が欠航基準よりも小さい場合であっても船体運動が非常に大きくなることが示された。ここで数値シミュレーションにより船体運動を再現し、欠航判断を支配する要因を検証する。

5.1 数値シミュレーションの概要

洋上を航行する船舶が波浪等の外力を受けて動揺する場合の状況について、以下の運動方程式により解析した。

$$\sum_{i=1}^6 (M_{ii} + m_{ij}(\sigma_E)) \ddot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 N_{ij}(\sigma_E) \dot{X}_j(t) + \sum_{i=1}^6 C_{ij} X_j(t) = F_j(t) \quad (ij=1 \sim 6) \quad (3)$$

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 は波浪外力、 t は時刻を示す。付加質量および減衰係数は有義周期から求めた出会い角周波数 σ_E で代表させるものとし、波浪強制力とあわせて NSM(New Strip Method)法にて求めた⁽⁷⁾。出会い角周波数は次式にて計算される。

$$\sigma_E = \sigma_{1/3} - kV \cos \alpha \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_{1/3}$ は有義周期に対応する角周波数、 k は波数、 V は船速、 α は相対波向を示す。式(3)を時間ステップごとにルンゲクッタ法で数値積分することにより時々刻々の船体運動が求められる。波浪強制力の推定にあたっては前章で示した観測データをもとに成分波ごとに計算、重ね合わせた。

5.2 シミュレーションによる再現結果

ここでは Fig. 3 および Fig. 4 に示した室戸岬沖を

東航するときに増大していた縦揺れの再現性について検討した。Table 2 に再現した数値シミュレーションの実施内容を示す。

Table 2 Description of simulated cases

Case	Time	Speed	Wave dire.	
1	Sept. 21, 2003	12.5k't	87deg.	*
2	July 30, 2004	16k't	95deg.	**
3	July 30, 2004	16k't	120deg.	**

(*) Amplification factor 3.5 is considered.

(**) Offshore wave data (Muroto GPS) is used.

室戸岬の沖でフェリーは船首方位を 90° から 45° に変針する局面にて、縦揺れが最も大きかった区間である船首方位 90° で航行している変針直前までの 10 分間を再現対象とした。再現計算にあたり、波浪データの解析結果から室津と室戸沖では波高にかなり差があることが明らかとなったため、室戸 GPS での観測データが存在しないケース 1 については、2004 年 7 月 30 日 0:00 の両者のデータから求めた有義波高比 3.5 を室津で得られた成分波の各振幅に乗じて波浪強制力とした。一方、ケース 1 およびケース 2 は波浪データに記録されていた主波向と船首方位との相対関係から設定したものであるが、後述する出会い周期の側面よりケース 3 として相対波向を 120° と仮定した場合についても再現計算を行った。Fig. 9 および Fig. 10 にケース 1~2 における縦揺れの実測値および計算値の時系列を比較したものを示す。

Fig. 9 Time series of observed and simulated pitch motions (Case 1)

図より両ケースとも実測値よりも計算値の方が小さいことが分かる。特にケース 1 については室津での波振幅を成分波全てに 3.5 倍したにもかかわらず、

縦揺れの有義振幅が実測値は 6.76° に対し計算値は 2.61° と半分以下の値しか発生していない。ケース 2 については実測値の有義振幅 5.14° に対して計算値は 3.31° と約 65% の大きさであった。Fig. 11 にケース 3 の計算結果を示す。

Fig. 10 Time series of observed and simulated pitch motions (Case 2)

Fig. 11 Time series of observed and simulated pitch motions (Case 3)

Table 3 にケース 1 およびケース 2 の 10 分間の縦揺れの実測値に対し、ゼロアップクロス法により有義振幅および周期を計算した結果を示す。

Table 3 Comparison of significant amplitude and period of pitch motion

	Case 1		Case 2		Case 3
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Sim.
$P_{1/3}$	6.8°	2.6°	5.1°	3.3°	5.4°
$PT_{1/3}$	8.0s	10.3s	8.2s	11.2s	9.3s

(Note) $P_{1/3}$ means significant amplitude of pitch

$PT_{1/3}$ means significant period of pitch

ケース 3 の結果より、ケース 2 の相対波向を 25° ほど前方とした場合、縦揺れの有義振幅および周期ともに実測値に非常に近くなる結果となった。これは相対波向が船首方向となったために出会い周期が

11.2s から 9.3s と実測の周期 8.2s に近づき、波浪強制モーメントが増大したためと言える。これより、沿岸波浪データの主波向による 1 方向波とすることは今後検討の余地がある。ケース 1 についても、波向を変更することによって振幅と周期が実測値に近づくと考えられるが、波浪のエネルギーピークが 11s と 5s に複数存在するため、さらに複雑な波向特性となっており、今後の検討にてこれらの情報を船体運動の再現性向上にいかにより改善するかもポイントであると考えられる。

6. 新たな欠航判断システムの検討

これまでの検討にてフェリーの船体運動、沿岸の波浪に関する特性、その両者の関係がある程度明らかにできた。しかし、プロペラレーシングなど航行中の操縦性に関する問題点、スラミングなどによる積荷の損傷や荷崩れなど貨物管理の側面を含めた検討、さらに入港時および係留時の船体運動を含めた全体的な欠航判断の検討までには至っておらず、今後の検討にて Fig. 12 に示す流れが必要である。

Fig. 12 Flow chart of future study as the total evaluation system of ferry operation

図に示すとおり、本研究では沿岸波浪と船体運動のデータベースをもとに、沖合にて発生している船体運動との関係を明らかとし、波浪のスペクトル形状が単峰型の特性を持つ場合についてある程度の精度にて船体運動の推定を可能とした。今後、貨物の安全性を含めた全体的な欠航判断システムを構築す

るにあたり、複数のスペクトルピークを有する波浪特性にも対応した波向特性の情報提供システムの充実がまず必要である。さらに荒天航行中の操縦運動への影響、貨物甲板における衝撃力を船体運動、入港時の船体運動、係留時の長周期船体運動などを推定するモデルを今後の研究にて順次構築することにより、新たな欠航判断システムが期待できる。

7. 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) 現場関係者に対する調査より、波浪予報と経験則を頼りに今なお欠航判断をしている。波高が欠航基準よりも低い場合でも船体運動が増大し、貨物損傷に至る事例も少なくない。
- (2) 四国沖を航行するフェリーを対象に台風時の船体運動を観測した結果、縦揺れが顕著となり、特に室戸岬を変針する前後で最大 $\pm 5^\circ$ 程度発生している。これによる貨物の損傷が懸念され、また関係者への聞き取り調査を裏付けるデータが観測できた。
- (3) 観測された船体運動と沿岸波浪データの関係を調べた結果、両者のピーク周波数は一致していないケースが多い。しかしながら、船体運動が大きくなったケースでは船首方位、船速および波向から決定される出会い周期が縦揺れの固有周期と近くなったために共振していると考えられるため、沿岸波浪データの相対波向きの信頼性を検証する必要がある。
- (4) 室津と室戸沖のように沿岸での波高が航海ルート上よりもかなり減衰しているケースもあり、沿岸波浪を用いて船体運動を検討する場合は設置位置の地形と波向による遮へい関係も把握する必要がある。
- (5) 沿岸波浪および船体運動データをもとに数値シミュレーションにて船体運動を再現したところ、縦揺れの実測値をかなり過小評価する結果となった。また動揺周期も観測値よりも長かったため、相対波向を若干変更して計算した結果、縦揺れの振幅および周期とも観測値に非常に近い結果が得られた。沿岸にて観測される波浪の波向が沖ではやや異なっている可能性があり、今後検討する必要がある。
- (5) 船体運動の再現性向上のため、波向に関する情報量の精度向上、特に複数のエネルギーピークを有する波浪に関する波向情報の詳細化などが今後の欠航判断システムを構築する上で必要となる。
- (6) 貨物損傷の観点より、ここで求められる船体運動をもとに甲板衝撃力の推定についても、数値モデルの構築を今後検討していく必要がある。また航行中の操縦運動、入港時および係留時の船体運動による安全性の評価モデルを全体的に改良することにより、

波浪予報値と経験則に依存してきた欠航判断がこれまで以上に正確かつ安全に実現することが期待される。

謝辞

本研究の実施に当たり、現地観測およびヒアリング調査に多大な援助を賜りました高知特急フェリー(株)の方々に深く感謝の意を示します。また現地観測の実施にあたり、広島商船高等専門学校・小林豪准教授ならびに韓国海洋大学・趙翼順氏(当時、神戸大学大学院自然科学研究科・留学生)の助力を得ましたことに謝意を表します。

参考文献

- (1) 白石悟・久保雅義・上田茂・榊原繁樹：係留システムに着目した長周期波に対する動揺抑制対策、海岸工学論文集、第42巻、pp.941-945、1995。
- (2) 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。
- (3) 小林豪、久保雅義、水井真治、笹健児：荒天運航時のフェリー貨物の安全管理に関する基礎的研究、日本航海学会論文集、第110号、pp.135-142、2004。
- (4) 笹健児、久保雅義：船体運動測定装置を活用した全天候型海上輸送システム構築へ向けての基礎的研究、海洋開発論文集、Vol.17、pp.235-240、2001。
- (5) 永井紀彦：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の現況と今後の課題、土木学会論文集(第6部門)、第609号、VI-41、pp.1-14、1998。
- (6) 尾崎統、北川源四郎：時系列解析の方法、朝倉書店、185p.、1998。
- (7) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会：実践・浮体の流体力学(前編)―動揺問題の数値解析法一、成山堂書店、291p.、2003。

質疑応答

小林英一(神戸大学)：

計算結果では実測値との違いが大きいことが示されましたが、精度向上にあたり数値モデルの改良や模型実験による検討は考えておられますか？

笹健児：

ご質問ありがとうございます。本研究では従来から一般的に用いられてきたNSMと周波数一定型の運動方程式にて船体運動を再現しましたが、係留中の長周期運動と同じく共振周波数での流体力

の取り扱いも大きな要素であることが明らかとなったと考えています。本論文中でも述べたとおり、周波数帯ごとの波向情報を含めた波浪データの精度向上とともに、流体力が周波数に依存しないインパルス応答を考慮した運動方程式によっても検討し、その再現精度の違いを今後明らかとしていきたいと考えています。また精度検証を行うデータとしては、極力実船で計測されたものを使用するのが望ましいと考えています。

田丸人意（東京海洋大学）：

この手法を用いると欠航判断のみではなく、航行可能な判断基準としても使用可能になりますか？

笹健児：

ご質問ありがとうございます。欠航判断とは航行可能な限界基準とも言い換えられますので、その意味で使用可能と考えています。今後は欠航判断における重要な要素となる貨物への衝撃力の推定と組み合わせた形での判断ツールとする必要があると考えています。