

波浪貫通型高速双胴船の実海域運動特性

学正員 福永 恵太* 正員 二瓶 泰範*
正員 池田 良穂*

An Experimental Study on Seakeeping Characteristics of a Fast Wave-Piercing Catamaran in Real Seas

by Keita Fukunaga, *Student Member* Yasunori Nihei, *Member*
Yoshiho Ikeda, *Member*

Summary

A wave-piercing catamaran was developed in Australia, and has been increasing in size for these twenty years. The first largest wave-piercing car ferry, "Natchan Rera" was built in Australia and introduced in the Hokkaido-Aomori route in September 2007. The seakeeping performance of this ship has been investigated by model experiments and revealed the superiority compared with conventional mono-hull ship. However, the seakeeping performance in real sea where irregular and combined waves are outstanding has not been revealed yet. In the present study, measurements of motions using real ship during winter season were carried out. From measured motion data, seakeeping performance of this ship in real seas is revealed. From comparison of measured motions between real ship with a ride control system and its scale model without it, the effectiveness of the ride control system is also discussed.

1. 緒言

現在では、世界各地の短距離フェリー航路に、多くの高速双胴船が導入されている。これらの高速双胴船は、船体を細長くして造波抵抗を減らして高速化を実現し、更にデッキスペースを広く取れるため旅客船には適している。一方、高速故に、波浪中においては激しい船体運動を起こし、乗り心地が悪くなるという短所がある。

この短所を克服するためにオーストラリアで開発された波浪貫通型双胴船は、船首部をナイフ状に尖らせて、更に水面の予備浮力も削減することにより、比較的波長の短い波を貫くように航行し、波浪中における船体運動を軽減することを基本コンセプトとしている。

波浪貫通型双胴船は、単胴船と比べ極めて特徴的な形状をしており、本船の波浪中船体運動応答を明らかにすることは非常に重要である。これまで著者らはインキャット・タスマニア社製の波浪貫通型高速双胴カーフェリーの模型船を用いた水槽試験などによって同船の波浪中運動特性を明らかにすると共に、在来型フェリーに対する優位性を示してきた¹⁾²⁾³⁾。

しかしながら、これまでは模型実験のみで、荒天時を含む実海域における運動性能を検証するまでには到っていない。そこで本研究では、2007年9月1日、青函航路に就航した

INCAT112m 波浪貫通型高速双胴カーフェリー「ナッチャン Rera」を供試船として実船計測を行った。2007年9月24日から2008年3月18日までの冬季を含む期間に、本船に6自由度運動計測装置を搭載し、この計測記録より同船の実海域における運動特性を明らかにすることを目的とした。またこれまでに行われた模型実験結果との比較により、ライドコントロールシステムの効果を明らかにした。

2. 実船計測

実船計測を行った供試船、(INCAT112m 波浪貫通型高速双胴船)の、実船と模型船の主要目を Table 1 に示す。また、同船の運航海域である青函航路の概略を Fig.1 に示す。青函航路は青森-函館間 113km を結び、航路は陸奥湾および津軽海峡を横切る形で設定されている。冬場の津軽海峡の海象は荒く、波高 4~5m を超える日も珍しくない。特に津軽海峡付近では日本海から入ってくる東向きのおねりおよび風波と、地形的な要因が絡み、高野崎から仏ヶ浦にかけては三角波が発生する。また、本航路は横波を受けやすい航路であるが、横波を受けながらの航行は著しく乗り心地を損なうと同時に危険をも伴うため従来から、荒天時には Fig. 1 中の破線で示すように、上述の海象の荒い水域では横波を受けないような針路を選んでの運航が行われている。

実船計測に用いた計測装置では、直線運動（前後揺れ・左

右揺れ・上下揺れ)については加速度を, 回転運動(横揺れ・縦揺れ・船首揺れ)については角速度を計測し, 6自由度の船体運動に変換をしている. また, 本計測装置には GPS 機能が搭載されており, その結果から船速も計測している. 同計測装置はブリッジ後方側面, Fig. 2 に示す位置に設置した.

また計測中, 本船船員の目視観測によって, 航路上の数点において, 出会い波の向き, 波高及び風速を記録した. なお, これらの観測情報は観測時刻と共に記録することで, 計測された船体運動との対応をとることが可能である.

Table 1 Principle particulars

	Real Ship	Model (1/80)
Loa	112.63 m	1408 mm
Lpp	105.60 m	1320 mm
Beam (molded)	30.30 m	379 mm
Beam (demihull)	5.80 m	73 mm
Draft	3.30 m approx.	41mm approx.
Service speed	36 knot	
T _{roll}	4.1 s	0.46 s

T_{roll} : roll natural period

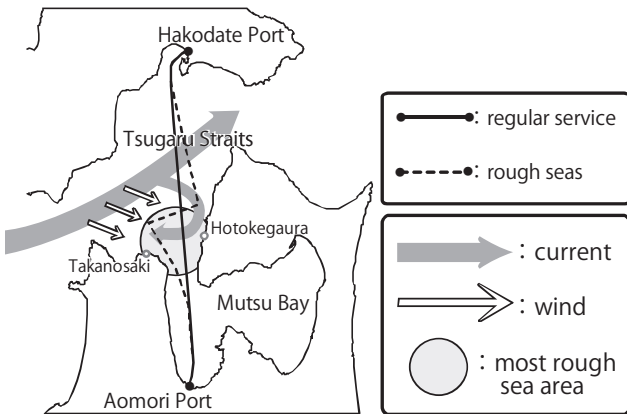


Fig.1 Outline of the operating route of the ship

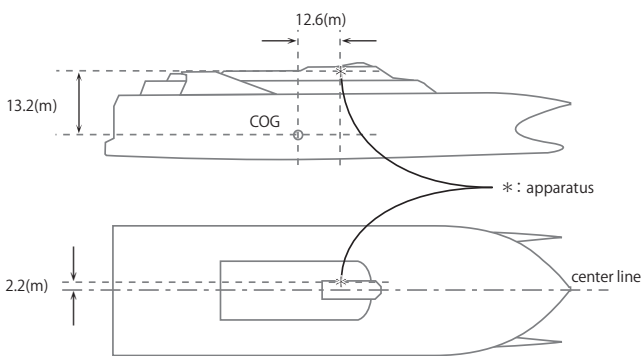


Fig.2 Arrangement of ship-motion measurement apparatus

3. 解析方法

計測された加速度及び角速度のパワースペクトラム分布の一例を Fig.3 に示す. 船首揺れには, 上下揺れや横揺れに見られない低周波の運動が含まれていることが分かる. この原因として, オートパイロットの影響などが考えられるが, これらはより短周期の波浪に基づく船体運動には影響しないと考えられる. 従って得られた計測データをフーリエ級数展開し, 0.067Hz 以下の低周波(周期 15 秒以上)を除去した後, (1)式を用いて加速度は 2 回, 角速度は 1 回積分することで 6 自由度の変位を得る. ここに $a(t)$, $v(t)$ 及び $x(t)$ はそれぞれ運動モードの加速度, 速度(角速度), 変位(角度)を表し, A_k , B_k は各周波数の成分の振幅を表す.

こうして得た一航海に亘る 6 自由度船体運動(約 2 時間 15 分)を 5 分毎に区切り, 各区間について最大振幅, 有義振幅及び有義周期を算出した.

$$a(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(\omega_k t) + B_k \sin(\omega_k t)$$

$$v(t) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{\omega_k} \sin(\omega_k t) + \frac{-B_k}{\omega_k} \cos(\omega_k t) \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{k=1}^n \frac{-A_k}{\omega_k^2} \cos(\omega_k t) + \frac{-B_k}{\omega_k^2} \sin(\omega_k t)$$

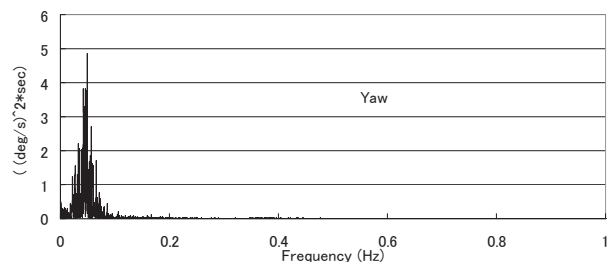
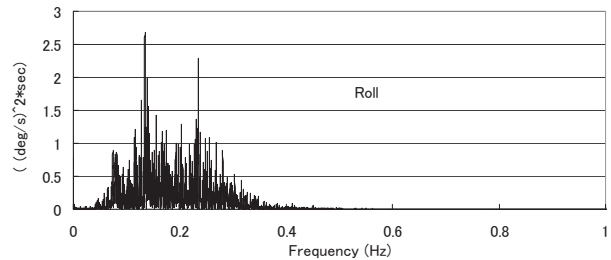
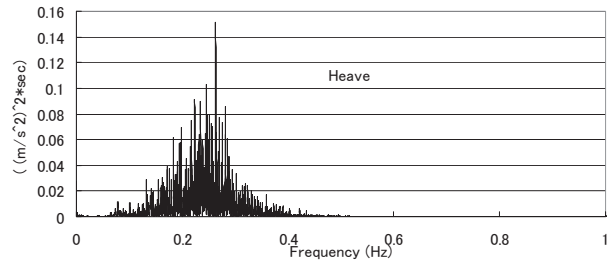


Fig.3 Power spectrums of measured ship motions

4. 解析結果と考察

記号

Z_{max}, Z_{sign}	: 上下揺れ最大振幅, 5分間ごとの有義振幅 (m)
ϕ_{max}, ϕ_{sign}	: 横揺れ最大振幅, 5分間ごとの有義振幅 (deg)
$\theta_{max}, \theta_{sign}$: 縦揺れ最大振幅, 5分間ごとの有義振幅 (deg)
T_s	: 5分間ごとの有義周期 (sec)
ζ_w	: 波振幅 (m) (=H _W /2)
H _W	: 波高 (m)
k	: 波数

ここで、5分間有義振幅・有義周期とは、5分間の船体運動の時系列を対象として、振幅の大きな方から3分の1の波の平均振幅・平均周期を取ったものである。

4.1 計測結果

一般航海における有義振幅及び有義周期の推移の一例として、青森発函館行の便における上下揺れと横揺れの時系列変化を Fig.4 に示す。これより運動が大きくなるのは、比較的激しい海象となる高野崎～仏ヶ浦の限られた海域であることが読み取れ、大きな揺れの続く時間は約 20 分程度であることも分かる。この傾向は他の航海の計測データについても同様であることを確認した。周期に関して、青森出港後、高野崎までの陸奥湾内では比較的短いのにに対し、高野崎と仏ヶ浦の間を抜け津軽海峡に出るとうねりの影響を受け、船体動揺周期が大きくなるのが分かる。つまり、高野崎～仏ヶ浦では長周期のうねりと短周期の風波が複合した海域であることが確認できる。Fig.5 には、特に船体運動が大きくなった高野崎～仏ヶ浦付近で、顕著な横揺れを記録した時の、横揺れ及び上下揺れの時系列を示す。この時系列からも短周期の横揺れが続く中で、時々若干周期の長い大きな横揺れが発生していることが分かる。この周期は、同時刻の上下揺れ周期と重なっているため、比較的周期の長いうねりの影響であると考えられる。(非線形影響などが考えられるが、この時刻の入射波の条件が不明であるため、原因特定には到っていない。) また、このような大振幅横揺れは約 2, 3 波程度であり、長時間は継続しないことも読み取れる。

Fig.6 に、全計測期間中に亘る船体運動(上下揺れ、横揺れ、縦揺れ)について、626 航海の各航海中の最大値、最大有義値及び最大有義値発現時の平均周期の推移を示す。これより、海象の影響を受けて船体運動の最大振幅や周期が推移していることが分かる。また、Fig.7 に、各モードの運動振幅、周期の頻度分布を示す。全計測期間における船体運動の最大振幅は、上下揺れ 2.8m、横揺れ 7.5deg、縦揺れ 3.3deg

であるが、大振幅の運動は頻繁には起こらないことがわかる。また、本船の横揺れ固有周期が約 4.1 秒であることを考えると、Fig.7 の横揺れ周期の頻度分布より、大振幅同調横揺れは発生していないことが確認できた。これは先に前川等³⁾が行った同船の模型実験結果とも符合している。

Fig.8 はこの期間のうち、波高の記録のある約 420 航海について、各航海における船員の目視波高と各運動モードの最大振幅、最大有義振幅の関係を示している。実線は最大振幅、破線は最大有義振幅の包絡線である。最大振幅は最大有義振幅の約 1.5~2 倍になっており、目視波高が高くなるにつれ、振幅も大きくなっている。上下揺れ、縦揺れについては概ね波高に比例しているが、包絡線には山と谷がある。これは操船者が海象の荒れた場合にライドコントロールシステムを 작동させることによる影響かもしれない。特に横揺れについて、波高が高いときに振幅が頭打ちになる。この非線形性の傾向の要因として、ライドコントロールシステムによる非線形横揺れ減衰力の影響や、実際の運航において激しい横波を回避するなどの操船技術が影響している可能性がある。

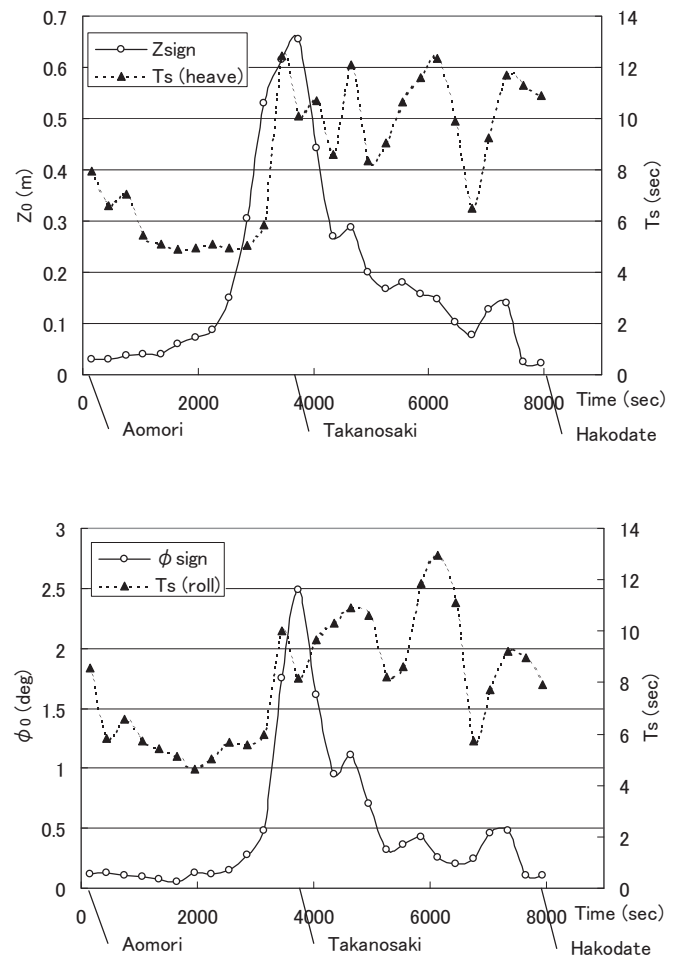


Fig.4 Time history of significant amplitude and significant period of heave and roll in a voyage

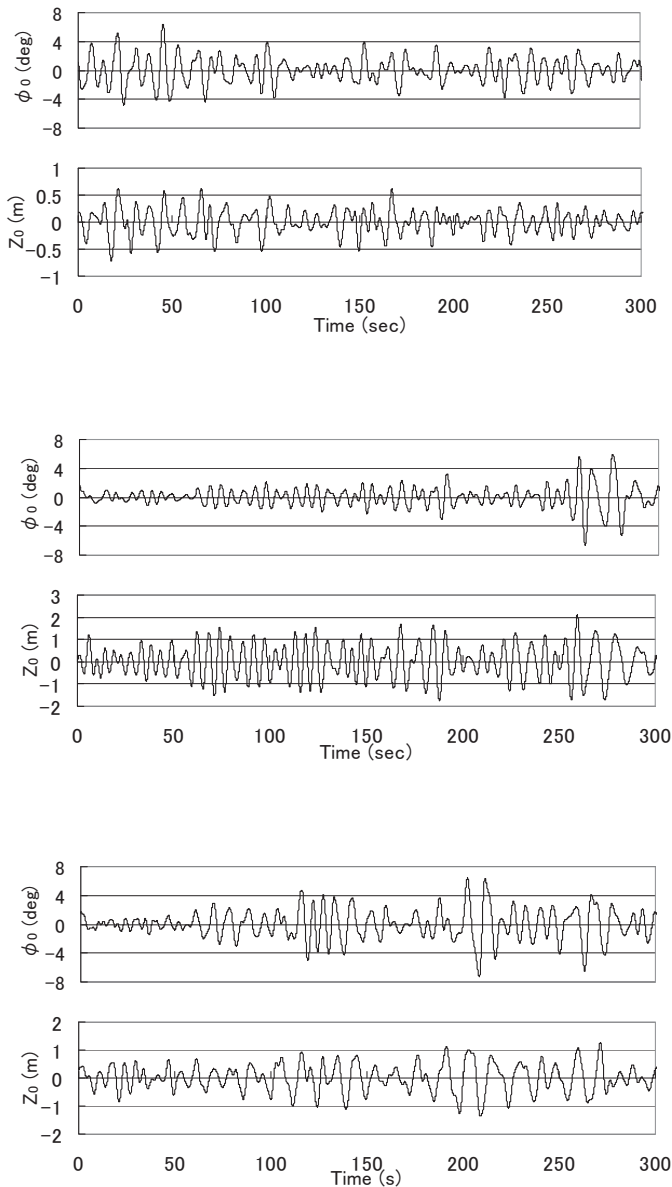


Fig.5 Time histories of large roll motion and heave motion

4.2 横波中での横揺れ運動

これまで筆者らが行った横波中模型実験において、横揺れ運動振幅は完全横波中($\chi=90^\circ$)で極大値をとり、波向きが完全横波から離れるにつれ振幅が急激に小さくなるという特徴を確認した³⁾。この傾向は特に波周期が短いケースで顕著であった。そこで、実海域においてこの傾向を確かめるため、実船計測で得られた横揺れ最大振幅と有義振幅を船員の目視波向きごとにプロットしたものを Fig.9 に示す。図中に示される T_w は計測された上下揺れデータから得られた有義周期である。実線で示すスプライン補間された模型実験結果を見ると、 $T_w=7\text{sec}$ のときに前述した傾向が顕著に現れており、出会い波周期が長くなるとこの傾向は弱まっているこ

とが分かる。模型実験と実船計測の結果を比べると、追波中($\chi=60^\circ$)では $T_w=7\text{sec}$ のときに完全横波中よりも高くなっているが、出会い周期が長くなると両者の一致がよくなっている。また、向波中($\chi=120^\circ$)では完全横波中よりも横揺れが大きく減少しており模型実験結果と同様の傾向が実船実験でも確認された。

$T_w=9\text{sec}$ の図において、追波中($\chi=60^\circ$)で大きく外れた点が現れたが、そのときの時系列は Fig.5 の最上段のものである。この時系列から分かるように瞬間的な非常に大きな横揺れが発現しており、それを無次元化する際に、船員の平均的な目視波高と 5 分間の有義周期を用いたためと考えられるが、詳細は不明である。

4.3 ライドコントロールの効果

共試船は、トリムタブと T フォイルから成るライドコントロールシステム(以降 RCS)を装備している。そこで実船計測と RCS のない模型実験の結果を比較することで、高速船における RCS の実際の有効性を検証する。なお、実船計測期間中にはトリムタブのみを使用しており、T フォイルは使用されなかった。また、トリムタブは横揺れと縦揺れについて制御されている。

Fig.10 に、本船の 1/80 模型を用いた規則波中曳航試験で得られた運動計測結果(全方位角に対する結果をプロット)とその包絡線を破線で示す。また Fig.5 で示した実船計測結果の最大有義値の包絡線を実線で示す。Fig.10 上段に示す上下揺れについて、山谷はあるものの、概ね良好な一致を示している。これより、RCS は上下揺れに影響を及ぼしていないことが確認できる。Fig.10 中の中段の図に示す横揺れについては、波高約 2m 以下では模型実験と実船計測の値は近いが、波高約 3m 以上の激しい海象では、RCS のない模型実験結果の包絡線が、実船の最大有義値 ϕ_{sign} よりも高い値となる。これは、トリムタブによって横揺れ運動振幅が減少したことを示している。この図から、波高が 4m の時で約 40% の減揺効果があることが確認できる。Fig.10 に示す縦揺れについては、波高 2m 以下においても模型実験結果が実船計測の有義値の約 1.6~3.2 倍にも達している。この結果から、横揺れに対するトリムタブの減揺効果はより低波高から現れ波高 2m の時には約 60%、波高が増加すると次第に減揺率は減少するが、波高 4m で約 50% であることが分かる。以上の比較から、トリムタブによる RCS は縦揺れおよび横揺れに極めて効果的に効いていることが分かる。これは、高速であるために、2つのトリムタブに大きな揚力が働くためであると考えられる。

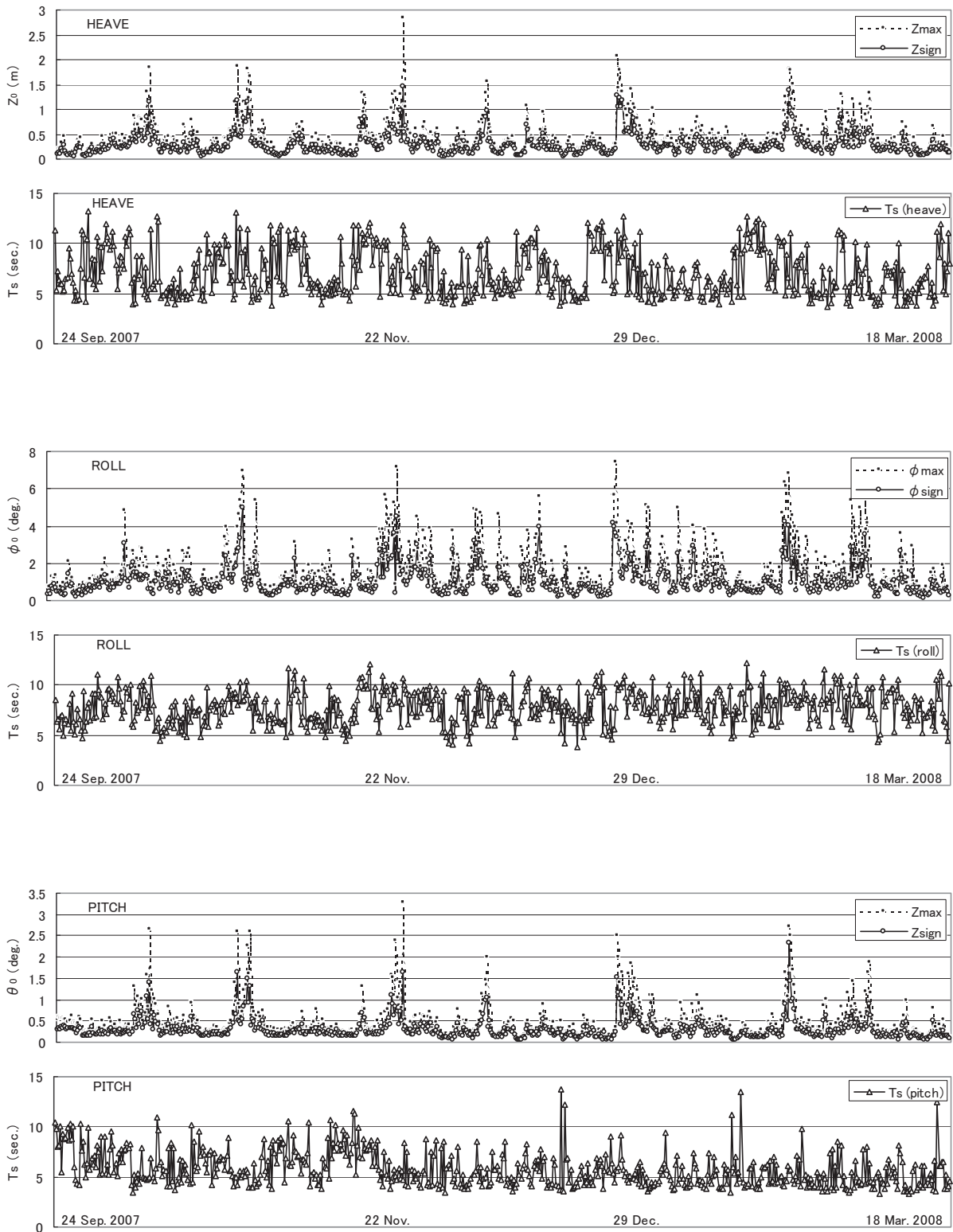


Fig.6 Maximum amplitudes, significant amplitudes and significant period of each voyage during the measurement in winter

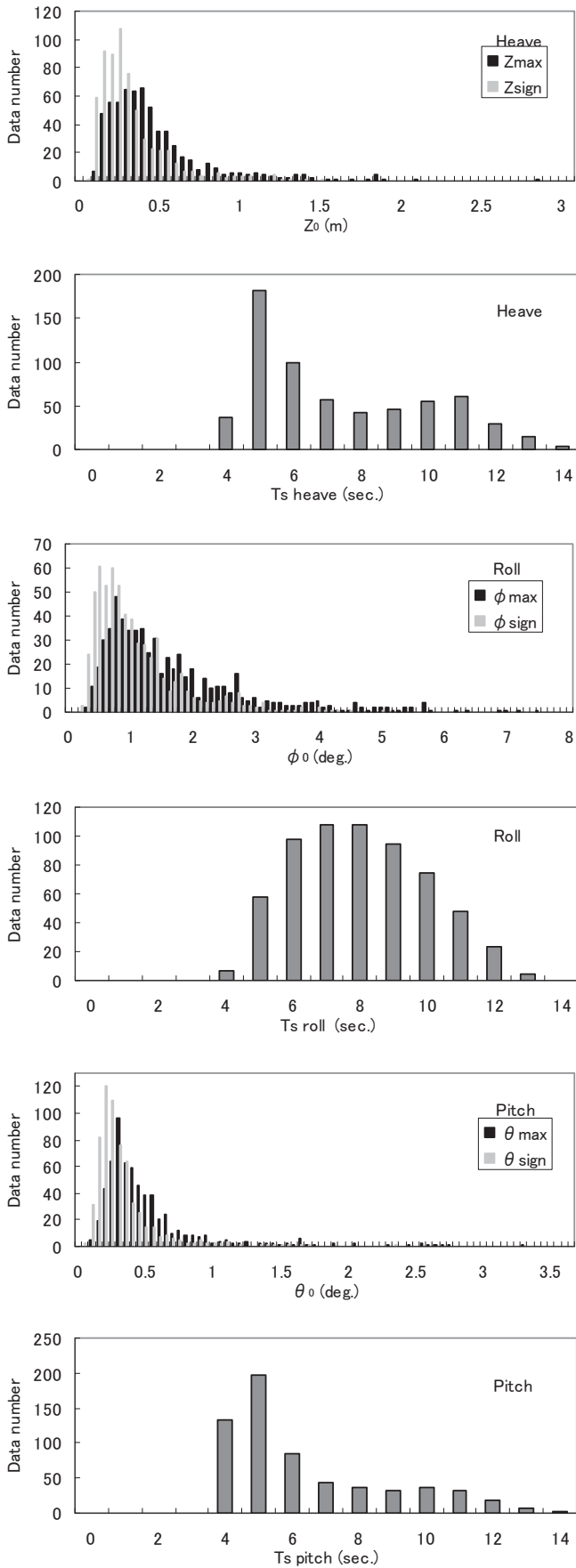


Fig.7 Histogram of the maximum and significant amplitudes and periods of heave, roll and pitch in each voyage

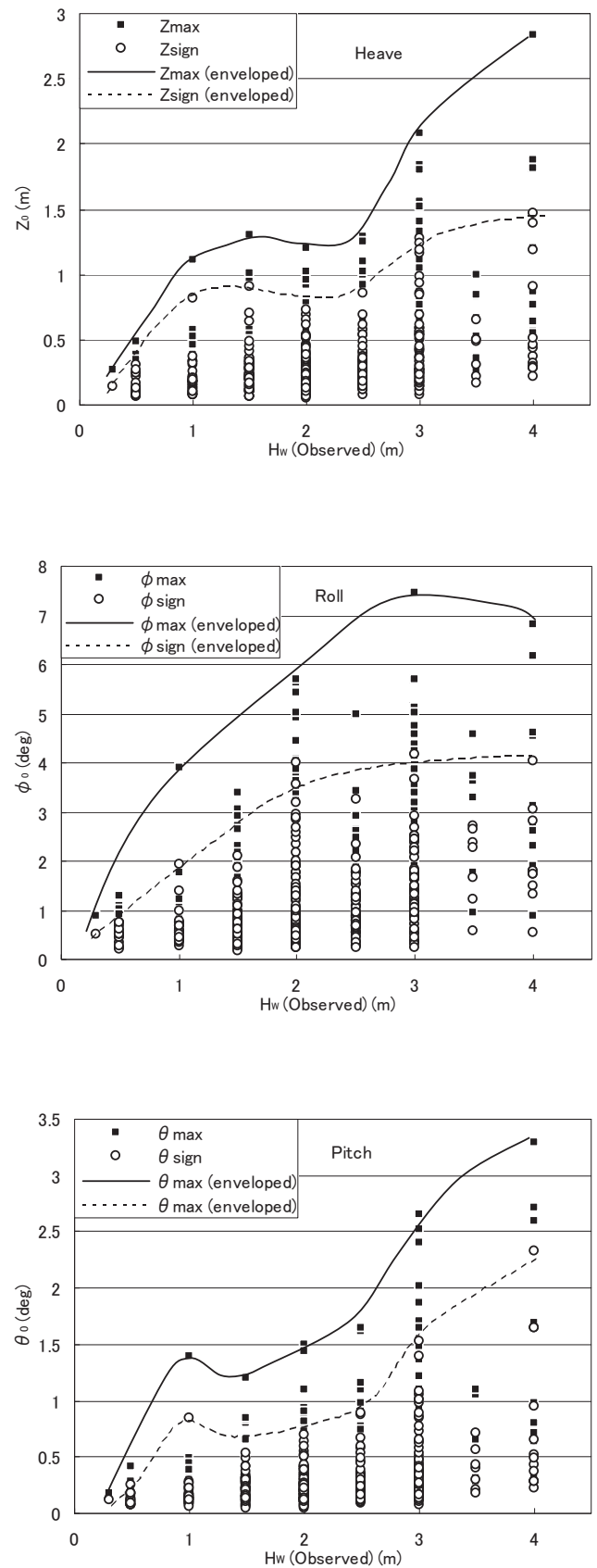


Fig.8 Relation between maximum and significant amplitudes of heave, roll and pitch, and observed wave height in each voyage

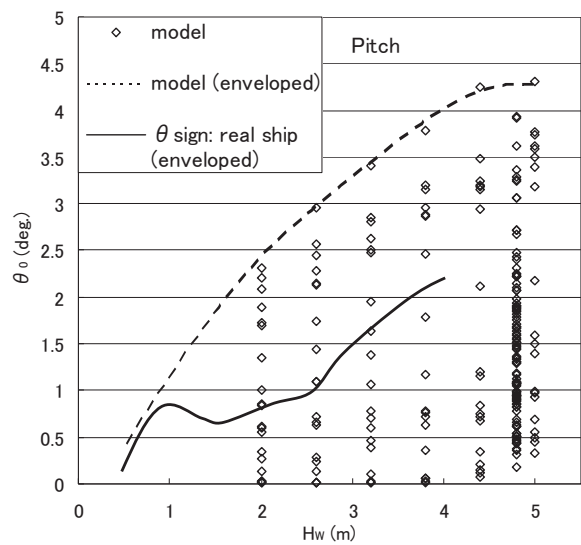
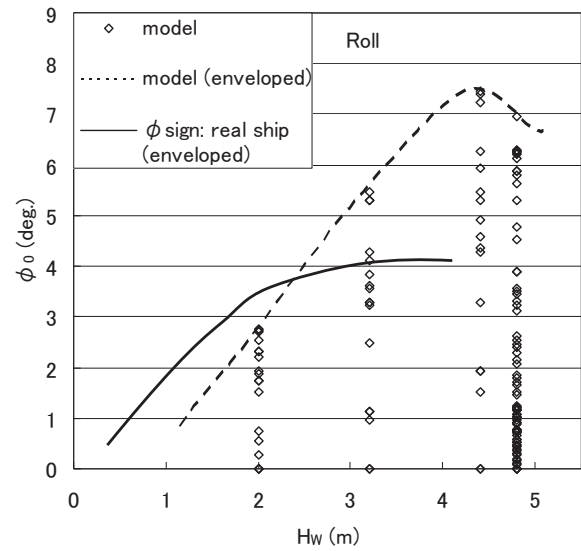
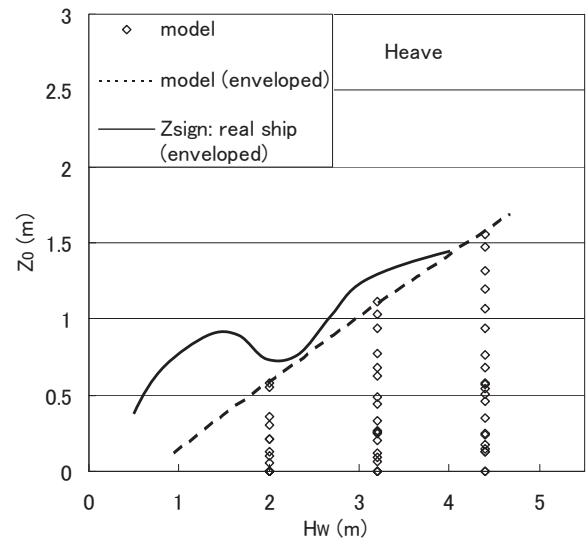
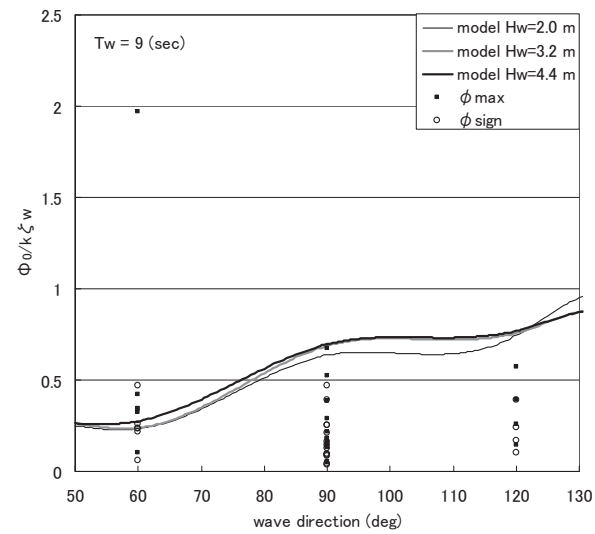
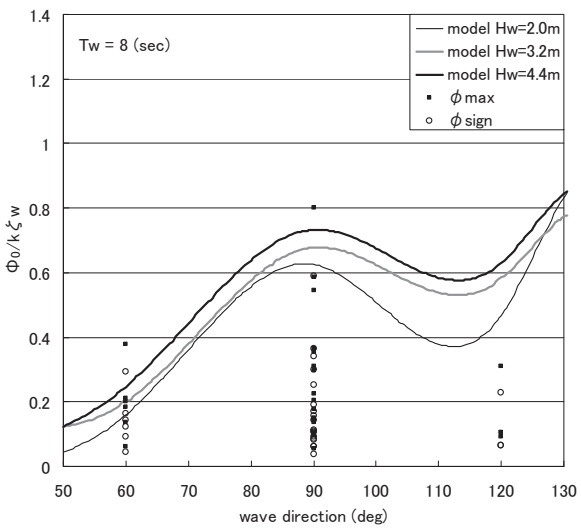
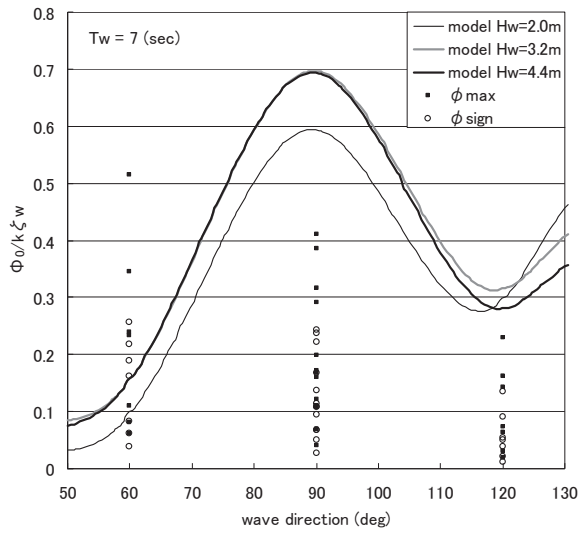


Fig.9 Variation of measured roll amplitudes of model and real ship for changing wave direction near beam seas

Fig.10 Comparison of heave, roll and pitch amplitudes between model with RCS and real ship without RCS

5. 結言

本研究では大型の波浪貫通型高速双胴船型の荒天時における運動特性を明らかにすることを目的とし、青函航路に就航した INCAT112m 船「ナッチャン Rera」に6自由度運動計測装置を搭載し冬季の船体運動を計測した。その結果、以下の結論を得た。

- ・ 青函航路の冬季間(2007~2008年)における船体運動の最大値(片振幅)は、上下揺れ:2.8m, 横揺れ:7.5deg., 縦揺れ:3.3deg.であった。なお、計測期間内での波高は、船員の目視によると最大4mであった。この運動の最大値は、船体重量の軽さから予測していた値をはるかに下回っていた。
- ・ 発現した大振幅横揺れの周期は固有横揺れ周期よりはるかに長く、同調横揺れは発生せず、入射波の波傾斜にはほぼ基づくものであることが確認された。これは模型実験の結果と符合する。
- ・ 各運動の振幅は、波高の増加に伴い大きくなるが、単調増加ではなく、大波高時には増加率が鈍り、さらにいくつかの山谷がみられる非線形性の強いものであることが分かった。これはライドコントロールシステムが作動したことが大きいと考えられるが、特異な船体形状による非線形性の影響も含まれていると考えられる。
- ・ 完全横波中よりも、若干、向波もしくは追波状態の方が横揺れが小さくなることが確認でき、これは模型実験で得られた傾向と符合する。ただし、短波長域の追波中では、この傾向が確認できなかった。
- ・ 高速航行時にトリムタブが、実海域において縦揺れ及び横揺れの軽減に大きな寄与をすることが確認できた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、東日本シブマネージメント社には実船実験に当たり多大な御協力を、また、大阪府立大学大学院片山准教授には実船計測のご指導を頂いた。心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 山本直人, 長野真二郎, 池田良穂: うねりと風波複合海

象下におけるウェーブピアシング型高速フェリーの運動特性について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第2K号, 2006, pp.41-44

- 2) 山本直人, 池田良穂: ウェーブピアシング型高速フェリーの横波中運動特性と船酔率 (MSI), 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第3号, 2006, pp. 13-16
- 3) 前川和也, 桃木勉, 山本直人, 池田良穂: 大波高中における波浪貫通型双胴高速船の運動特性に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第6号, 2007, pp. 331-337