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

学生員 前 川 和 也* 正員 桃 木 勉**
 学生員 山 本 直 人*** 正員 池 田 良 穂***

An Experimental Study on Seakeeping Characteristics of a Fast Wave-Piercing Catamaran in Heavy Waves

by Kazuya Maekawa, *Student Member* Tsutomu Momoki, *Member*
 Naoto Yamamoto, *Student 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 112m wave-piercing car-ferry was built in Australia, and introduced in Hakodate-Aomori route in September 2007. The ship is made of Aluminum alloy and much lighter than a conventional mono-hull ferry. The ratio of gross tonnage to displacement of the ship is about four times of the conventional one. This means that the ship has small displacement, shallow draft and large superstructure. This may cause different seakeeping characteristics of the ship from conventional mono-hull ships.

In the present paper, the seakeeping performance of a 112m wave-piercing catamaran in heavy waves are experimentally investigated for all wave directions. The experimental results are compared with calculated results for conventional mono-hull ferries. The comparisons reveal that the ship motion performance of the wave-piercing catamaran in heavy waves is better than those of conventional mono-hulls, particularly in pitch and roll motions. The contribution of the unique center-bow of the catamaran to the seakeeping performance is also discussed.

1. 結 言

現在では、世界各地の短距離フェリー航路に、多くの双胴型高速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、さら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、船首部を尖らせて、さらに水面上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て、ある程度の波高までの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に開発された。しかし、大波高時に没水し予備浮力を発生させるセンターバウを設けるなど、大波高時の安全性を確保するための特有の船体形状を有しているため、大波高中においては中小波高時とは全く異なる運動特性を示すことが予想される。だが、大波高中

におけるスラミングに関する研究はいくつかあるものの¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、その運動特性については、あまり詳しくは調べられていない⁵⁾。

そこで本研究では、2007年に青函航路に導入されたオーストラリア製の112m型波浪貫通型双胴船について、大波高中での運動特性を実験的に把握すると共に、同じ航路に就航する在来型単胴フェリーの運動との比較を行うことによって、大型波浪貫通型双胴船の耐航性能の特性を明らかにすることを目的とした。

2. 模型実験

2.1 模型船

実験では、オーストラリアのインキャット・タスマニア社で開発された112m型波浪貫通型双胴船の縮尺1/80の小型模型船を用いた。実船と模型船の主要目をTable 1に、模型船の写真をFig.1に示す。なお、実船に搭載されているTフォイル及びトリムタブからなるライドコントロールシステムは、模型船には取り付けられていない。

2.2 実験方法

実験は、大阪府立大学の曳航水槽(長さ:70m, 幅:3m, 水深:1.6m)において、向い波及び追い波中での実験を行い、さらに水産工学研究所の角水槽(長さ:60m, 幅:25m, 水深:

* 大阪府立大学工学部

** (独)水産総合研究センター水産工学研究所

*** 大阪府立大学大学院工学研究科

Table 1 Principal particulars of the ship and its model

	Ship	Model
L_{OA}	112.63m	1408mm
L (demihull)	105.60m	1320mm
B_{MAX}	30.30m	379mm
B (demihull)	5.80m	73mm
Draft d	3.3m	41mm
κ_{xx}	16.85m	211mm
κ_{yy}	45.26m	566mm
T_{roll}	4.1s	0.46s

κ_{xx} : radius of inertia for roll

κ_{yy} : radius of inertia for pitch

T_{roll} : natural roll period

Fig.1 Model ship.

3.2m)において、全方位波浪中での実験を行った。

実験では、縦揺れ、上下揺れ、横揺れのみを自由にした状態で、規則波中を一定速度で模型船を曳航し、それぞれの運動をポテンシオメータで計測した。左右揺れを拘束していることから、その連成影響によって横揺れが異なる可能性があるが、それについては後述する。

また、小型模型船を使用したので、排水量を実船での標準載貨状態に合わせることができなかったため、Fig.2に示すカウンターウェイトを用いた計測システムを使用した。このカウンターウェイトは、上下揺れの慣性力の増加として働くため、上下揺れが変化することが予想される。これらの影響について実験結果を修正する方法を模索したものの、全方位の波に対して合理的に修正する方法を導くことができなかった。このため、上下揺れの実験結果については、本論文には載せていない。さらに、上下揺れの影響が縦揺れにも及ぶ可能性がある。これについては、Appendixに示すように、模型船を大改造して軽量化して、本論文の一部の実験結果と比較したところ、10%以内の誤差に収まることがわかったので、縦揺れについては実験結果をそのまま掲載している。

また、実験では、船首揺れを固定していることから、高速船の耐航性上重要な、追い波中での針路不安定性やブロー

チング等の現象については計測されていないことにも注意が必要である。

Fig.2 Experimental apparatus with counter weight

2.3 実験条件

本研究では大波高を想定しているため、波高は実船ベースで4.8mとした。これは模型船では60mmとなり、Table 2に示す波向き、波周期、フルード数において、それぞれの場合の縦揺れ、上下揺れ、横揺れと入射波を計測した。なお、波向き $\chi=0^\circ$ が追い波で、 $\chi=180^\circ$ が向い波である。

Table 2 Experimental conditions in model scale

Wave height(mm)	60
Wave period(s)	0.67, 1.00
Wave direction(deg)	0, 30, 45, 60, 75, 90, 95, 100, 105, 110, 120, 135, 150, 180
$Fn(=U/\sqrt{gL_{OA}})$	0.24, 0.32, 0.40, 0.48, 0.56, 0.64

3. 左右揺れ固定による影響

前述したように、左右揺れを固定した状態で模型船を曳航したため、横揺れ振幅に影響を与えている可能性があるため、その考察を行う。

横揺れに与える影響を調べるために、前進速度がない状態で、模型船に $\chi=90^\circ$ の横波を当て、左右揺れが自由と固定のそれぞれの場合の横揺れ振幅を比較した。その結果をFig.3に示す。

この結果から、両者はよく一致することが確認できたので、本論文における解析では、左右揺れ固定による横揺れ振幅への影響修正はしないこととした。

Fig.3 Measured roll amplitude in cases when sway motion is free and fixed

4. 運動に及ぼす波高の影響

大波高中で行った本実験の考察を行う前に、波高が船体運動に与える影響について、以前に筆者らが行った実験結果⁹⁾を用いて示すこととする。なお、この実験では満載状態(排水量 3000 トン)を想定したため、Fig.2 に示すカウンターウェイトを用いた計測システムを使用していない。そのため、縦揺れ、上下揺れ共に、得られた結果は十分な信頼性を有していると考えられる。

実験は、大阪府立大学の曳航水槽において行い、同じ模型船を用い、向い波中で曳航した。なお、 λ/L は 0.58, 1.43 の 2 種類で、 H_w/d を 0.48~1.45 の間で変化させた。その結果を Fig.4~7 に示す。

まず Fig.4,5 に示す $\lambda/L=0.58$ の短波長波中での縦揺れ及び上下揺れの結果では、波高が高くなると運動が大きくなる傾向があることが分かる。これは、波高が高くなるとセンターバウが没水して浮力を発生させ、船首を持ち上げる力として作用するためだと考えられる。

次に Fig.6,7 に示す $\lambda/L=1.43$ の波浪中での結果では、 $\lambda/L=0.58$ の波浪中に比べ、かなり運動振幅が大きくなっているが、波高が高くなっても運動振幅は増加せず、逆に若干減少している。これは、センターバウが没水することによる減衰力の増加、双胴間をつなぐデッキ下面でのパンチングなどが影響しているものと思われるが、詳細は不明である。

これらの結果から、向い波中において、波浪貫通型双胴船の運動は短波長波中において波高影響が顕著であり、大波高での運動は微小波高の運動とは全く特性が異なることが予想される。

Fig.4 Pitch amplitude in regular head waves with $\lambda/L=0.58$

Fig.5 Heave amplitude in regular head waves with $\lambda/L=0.58$

Fig.6 Pitch amplitude in regular head waves with $\lambda/L=1.43$

Fig.7 Heave amplitude in regular head waves with $\lambda/L=1.43$

5. 実験結果の考察

波浪貫通型双胴船(以下 WP と記す)の実験結果を Fig.8~10 に示す。なお各図にはストリップ法(OSM)を用いて計算した 2 隻の在来型単胴フェリーの波浪中船体運動の結果も示しており、これと比較することにより、WP の運動特性の特徴がはっきりと現れるものと思われる。

Table 3 Principal particulars of conventional ferries and INCAT112m wave piercer in full scale

	2200GT・CF	5110GT・CF	WP
Lpp	90m	115m	105.6m
B	17.2m	20m	30.3m
D	4.45m	5.4m	3.3m
Displacement	3200ton	7300ton	2350ton
Bilge Keel	0.6mx0.15Lpp	0.375mx0.14Lpp	None
GM	1.19m	1.56m	68m

CF : conventional ferry , WP : INCAT112m wave piercer

比較に用いた在来型単胴フェリーは、Table 3 に示すように 2200 総トンと 5110 総トン型の単胴船で、いずれもビルジキールが取り付けられている状態での計算結果である。なお、

これら2隻については、模型実験も行ってストリップ法での結果が十分な精度を有することを確認している。

5.1 同じ船速での比較

実船ベースで波高 4.8m、波長 56m と 124.8m のそれぞれの規則波中で、船速が 15kn と 20kn の比較的低速航行時での縦揺れ、横揺れの計測値が Fig.8,9 である。波長 56m と 124.8m は、青函航路において筆者らによって計測された荒天時の三角波とうねりの代表的な値である⁹⁾。

なお、大きさの異なる3隻の船で比較したため、図中の船速、波長及び波高は有次元値で表している。また、図中の左半円には波長 56m、右半円には波長 124.8m での結果を示している。

まず、Fig.8,9 の左半円に示す短波長($\lambda=56\text{m}$)の波浪中の運動では、いずれの運動についても、在来型単胴フェリーがある波向きにおいて大きな振幅となるところがあるのに対して、WP はどの波向きに対しても大きなピークは持たず、在来型単胴フェリーに比べて非常に運動が小さいことが分かる。

各運動モードについて詳しく見ると、まず縦揺れは、在来型単胴フェリーでは斜め波中($\chi=60^\circ$ および 120°)で大きくなっているが、これは、船首と船尾がちょうど波の山と谷に位置するためだと考えられる。ほぼ船長が等しい WP も同様に、この付近の波向きにおいて船首と船尾が波の山と谷になるが、双胴で船幅が広く、左右のデミハルに働く波浪強制力に位相差が生じるために、それほど大きな振幅にならないと考えられる。

横揺れについては、在来型単胴フェリーが斜め追い波中で大きな同調横揺れを起こしているのに対し、WP には同調横揺れは見られない。これは、WP の横復原力が非常に大きいために横揺れ固有周期が短く、追い波中では同調しないことと、同調を起こす斜め向い波中においても、左右のデミハルが横揺れによって上下に動揺することにより、大きな造波減衰力を生むためだと考えられる。

このように WP は、低速航行時において、短波長の波浪中で、向い波と追い波中では在来型単胴フェリーと同程度の運動になっているものの、全体的に運動性能が非常に良いと言える。向い波と追い波中で同程度になっているのは、左右のデミハルに働く波浪強制力に位相差が生じず、かつ、センターバウが没水するためだと思われる。

次に、Fig.8,9 の右半円に示す長波長($\lambda=124.8\text{m}$)の波浪中の運動では、短波長の時にみられた WP の運動性能の良さは薄れ、在来型単胴フェリーに近い運動となっている。

各運動モードについて詳しく見ると、まず縦揺れは、斜め波中で在来型単胴フェリーに比べて小さいが、向い波と追い波中においては 5110 総トンの在来型単胴フェリーと同程

度となっている。斜め波中では、左右のデミハルに働く縦揺れ強制力に位相差が生じるために、在来型単胴フェリーに比べて縦揺れが小さくなると考えられる。また、向い波と追い波中で在来型単胴フェリーと同程度になるのは、センターバウが没水することによる効果が大いと考えられる。また、実験時の観察によれば、向い波中では、船首部では大きなスプレーがあがり、激しいパンチングも発生していた。これに対して追い波中では、波がゆっくりと船体を追い越して行くため、ゆっくりとした縦揺れになっているが、船首部が波上に大きく露出し、そのあとセンターバウが深く没水する運動を繰り返している。また、図中の縦揺れが横波中で若干大きくなっているが、これは波浪貫通型船体の特徴である大きな前後非対称性によるものと思われる。

Fig.8 Measured and calculated ship motions
at $V_s=15\text{kn}$ and $H_w=4.8\text{m}$

Fig.9 Measured and calculated ship motions
at $V_s=20\text{kn}$ and $H_w=4.8\text{m}$

横揺れは、前述の短波長の波浪中と同様に、在来型単胴フェリーは斜め追い波中で同調横揺れを起こしているが、WPは大きな同調横揺れを起こさず、全体的に小さな振幅になっている。

このように WP は、低速航行時において、長波長の波浪中で、在来型単胴フェリーよりも優れた運動性能を有していると言える。これは、排水量が 1/3 以下であり、喫水も浅いことを考え合わせると、WP のコンセプトの優秀性を示しているものと思われる。

5.2 航海速力での比較

前節では、WP も在来型単胴フェリーも同じ船速で運動性能の比較を行ったが、実際の航行時の運動性能を評価するためには、それぞれの航海速力での比較が必要となる。

航海速力での比較は、WP が 40kn、在来型単胴フェリーが 18kn として、その他の条件は前節と同じとした。なお、船速が 40kn の時は、曳航台車速度制限から、向い波と追い波に限られた波向きでしか計測できなかったため、計測点が少なくなっている。

結果を Fig.10 に示す。なお、図中には、参考までに、全方位波のデータをとることの出来た事例として、船速 25kn の結果も示している。

Fig.10 Ship motions at each service speed at $H_w=4.8\text{m}$

まず、縦揺れは、長短両波長において、WP は船速が増すと追い波中でやや大きくなり、在来型単胴フェリーとあまり変わらないが、向い波中においては大幅に小さくなっている。

そこで、追い波と向い波中における船速と運動振幅の関係について考察する。

追い波($\chi=0^\circ$)及び向い波($\chi=180^\circ$)中での、船速による

縦揺れ振幅の変化を Fig.11~14 に示す。この結果から、いずれの波長においても追い波中では、船速が増加すると共に運動が大きくなり、一方、向い波中では逆に小さくなることが分かる。この原因として、以下のようなことが考えられる。まず追い波中では、船速が増すと船が波を追い越すようになり、センターバウが前から波を受けて没水して浮力が働き、さらに船首部でスプレーが発生して動的圧力が働くことが、運動を大きくする原因として考えられる。ただし、短波長では波長/船長比が 0.5 程度であるため、それほど大きな運動にはならない。一方長波長では、5110 総トンの在来型単胴フェリーと同程度の大きさになっている。

次に、向い波中の運動については、船速が増して出会い波周期が短くなることが、運動が小さくなる原因として考えられる。出会い波周期が長い場合には、船首部の波の山が後方に移動し、次の波の山が船首部に来るまでに時間がかかり、船首が大きく下がってしまい、次の波の山が来た時にセンターバウが大きく没水してしまうため、運動が大きくなると考えられる。ただし、短波長では波長/船長比が 0.5 程度で、かつ、低速航行時においても出会い波周期が比較的に短いため、それほど大きな運動にはならない。

最後に Fig.10 中の横揺れの結果について考察する。WP は高速航行時においても、在来型単胴フェリーのような大きな同調横揺れを起こしていない。また、Fig.8,9 に示す低、中速時の横揺れとほとんど同じ大きさとなっており、一般的な船舶のように、速力の増加と共に横揺れが減少する傾向は現れない。

Fig.11 Effect of advance speed on pitch amplitudes in following waves of $\lambda=56\text{m}$ and $H_w=4.8\text{m}$

Fig.12 Effect of advance speed on pitch amplitudes in following waves of $\lambda=124.8\text{m}$ and $H_w=4.8\text{m}$

Fig.13 Effect of advance speed on pitch amplitudes in head waves of $\lambda=56\text{m}$ and $H_w=4.8\text{m}$

Fig.14 Effect of advance speed on pitch amplitudes in head waves of $\lambda=124.8\text{m}$ and $H_w=4.8\text{m}$

6. 結言

向い波および横波中での運動特性^{6,7)}に続き、全方位の波向きに対する、大波高中($H_w/d=1.45$)における WP の運動性能を実験的に調査し、在来型単胴フェリーの運動性能と比較することにより以下の結論を得た。

まず低速航行時には、

- 1) 波長が船長の半分程度の短波長規則波中の向い波および追い波中においては、WP は、同程度の船長で排水量が約 3 倍ある 5110 総トンの在来型単胴フェリーと同程度の運動性能を有している。
- 2) 短波長規則波中の横波および斜め波中においては、WP は、5110 総トンの在来型単胴フェリーと比べても非常により運動性能を有している。
- 3) 波長が船長程度の長波長規則波中においては、WP は、5110 総トンの在来型単胴フェリーと同程度の運動性能を有している。
- 4) 在来型単胴フェリーに現れる斜め追い波中での大きな同調横揺れは、WP では発生しない。

次に高速航行時には、

- 5) 追い波中では、低速航行時に比べて若干運動が大きくなるが、それでも低速の在来型単胴フェリーと同程度の運動性能を有している。
- 6) 向い波中では、低速航行時に比べて大幅に運動振幅が小さくなり、低速の在来型単胴フェリーに比べて非常に運動性能がよい。

謝 辞

本研究では、インキャット・タスマニア社および東日本シブマネジメント社から技術資料の提供を受けたことを記し、関係各位に御礼申し上げます。また、実験にあたって水産工学研究所の松田秋彦室長に種々ご指導をいただいた。心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) J. Whelan, D. Holloway, T. Roberts, M. Davis : Wetdeck Slamming of High-Speed Catamarans with a Centre Bow, Proc. of FAST2003, pp.33-40
- 2) G. Thomas, M. Davis, D. Holloway, T. Roberts : Transient Dynamic Slam Response of large High Speed Catamarans, Proc. of FAST2003, pp.1-8
- 3) G. Davidson, T. Roberts, G. Thomas : Global & Slam Loads for a Large Wavepiercing Catamaran Design, Proc. of FAST2005
- 4) G. Thomas, M. Davis, D. Holloway, T. Roberts : The Influence of Slamming and Whipping on the Fatigue Life of a High-Speed Catamaran, Proc. of FAST2005
- 5) B. Cartwright, D. McGuckin and P. Groenenboom : A Novel Technique to Predict Non-Steady Loads on Vessels in Severe Seas, Proc. of ISOPE-2004, Toulon, 2004, pp.1-9
- 6) 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
- 7) 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

Appendix

カウンターウェイトが運動に及ぼす影響を調べるために、本実験で用いた模型船を大規模に改造して軽量化して実験を行い、カウンターウェイトを用いた本論文の実験結果と比較した。向い波中 ($\chi=180\text{deg}$) における結果を Fig.A-1~A-4 に示す。この結果より、上下揺れに関しては、カウンターウェイトの影響を最大で 40% 程度受けるが、縦揺れに関しては、その影響がせいぜい 10% 以内に収まり、ほぼ実験誤差内として扱えることが確認できる。

Fig.A-1 Effect of counterweight on pitch amplitudes in head waves of $\lambda=56\text{m}$ and $H_W=4.8\text{m}$

Fig.A-2 Effect of counterweight on heave amplitudes in head waves of $\lambda=56\text{m}$ and $H_W=4.8\text{m}$

Fig.A-3 Effect of counterweight on pitch amplitudes in head waves of $\lambda=124.8\text{m}$ and $H_W=4.8\text{m}$

Fig.A-4 Effect of counterweight on heave amplitudes in head waves of $\lambda=124.8\text{m}$ and $H_W=4.8\text{m}$