高速多胴船の横揺れ減衰力に関する基礎的研究

正員 片 山 徹* 学生員 谷

谷口友基*

A Study on Viscous Effects of Roll Damping for Multi-Hull High-Speed Craft

by Toru Katayama, Member Tomoki Taniguchi, Student Member

Summary

The roll damping plays a very important part of amplitude of roll motion in resonance and trigger of parametric rolling of a ship. Since the viscous damping components are usually dominant in the roll damping, the theoretical calculation is difficult for predicting it. A method of predicting roll damping of a conventional cargo ship proposed by Ikeda, et al. is widely used and it has been also applied to high speed slender vessels, small hard-chine vessels, barge vessels etc..

In this paper, the characteristics of roll damping of two types of multi-hull vessel, high speed catamaran and trimaran, whose vessel is different from above mentioned is investigated experimentally. A forced roll motion test is carried out with and without forward speed, and their characteristics are investigated. Moreover, a simplified prediction method of roll damping of multi-hull vessel is proposed.

1. 緒 言

あらゆる船舶にとって、設計段階において同調横揺れ時の 振幅やパラメトリック横揺れの発生等の横揺れ特性を把握 する上で、横揺れ減衰力を実用上十分な精度で推定すること は重要である。しかしながら、たとえ一般的排水量型船型で あっても、横揺れ減衰力に及ぼす粘性流体力の影響は大きく、 そのためにポテンシャル理論に基づく造波成分のみの計算 では不十分であり、粘性成分を別途推定する方法や、NS方 程式を数値計算手法により計算する方法が開発されている が、近年開発される多様な船型に対する適用は必ずしも簡単 ではない。横揺れ減衰力の粘性成分を推定する方法の一つと して池田らの方法が知られている¹⁾。この推定法は、一般排 水量型船型に対する推定法の開発にはじまり、小型ハードチ ャイン船型、高速痩せ型船型、バージ船型などにも適用でき るように拡張され、実用的にも十分な精度を有している。

本研究では、高速多胴船として波浪貫通型双胴船(以下、 双胴船と呼ぶ)と高速三胴船(以下、三胴船と呼ぶ)を対象 とし、停止時及び航走時の横揺れ減衰力を水槽実験により計

* 大阪府立大学大学院工学研究科
 原稿受理 平成 20 年 9 月 16 日

測するとともにその特性を調査し、さらに池田らの推定法を 基に、これらの船型での横揺れ減衰力の推定法について検討 した結果について報告する。

2. 供試模型

本研究で対象とする船型は、全長 110[m]を超える波浪貫 通型高速双胴船の縮尺模型及び、140[m]を超える高速三胴船 の主要な数値を参考にして設計した模型である。それぞれの 主要目を Table 1 および 2 に示す。なお、実船の横揺れ固有 周期を参考にすれば、これら模型船の横揺れ固有周期はそれ ぞれ 0.55~0.67[sec]、0.98~1.31[sec]程度となる。

Table 1 Principal particulars of the wave piercing catamaran model.

overall length : L_{OA} [m]	1.41
length between perpendiculars : L_{PP} [m]	1.32
breadth : B [m]	0.38
breadth between hulls : B_d [m]	0.265
depth : D [m]	0.07
draft of catamaran : <i>d</i> [m]	0.04
displacement : W [N]	41.8
height of the center of gravity : KG [m]	0.144

日本船舶海洋工学会論文集 第8号

 Table 2
 Principal particulars of the trimaran model.

	trimaran	
	main hull	side hull
	<i>L/B</i> =12	<i>L/B</i> =10.2
overall length: L_{OA} [m]	1.500	0.888
length between perpendiculars: L_{pp} [m]	1.420	0.774
breadth: <i>B</i> [m]	0.125	0.044
breadth between main and side hulls:	0.089	
B_t [m]		
depth: D [m]	0.1	0.0709
draft: d [m]	0.037	0.012
displacement: W[N]	29.2	0.78×2
height of the center of gravity: KG[m]	0.156	

3. 横揺れ減衰力計測実験

3.1 実験方法および解析法

強制動揺試験により、停止時および航走時の横揺れ減衰力 を計測した。模型船の設定重心周りに、正弦的な横揺れを強 制的に与え、その時の強制横揺れモーメントおよび横揺れを 計測するとともにビデオによって船体まわりの波の状況を 撮影した。特に、停止時の実験では船底まわりの流れを可視 化するために、細いパイプを用いて船体近傍に染料を注入し、 水中からのビデオ撮影を行った。

横揺れ角を¢とすると、等価線形化された横揺れ運動方程 式は、

$$(I_{44} + a_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + C_{44}\phi = M_R \tag{1}$$

で表される。(1)式中の I_{44} 、 a_{44} は、それぞれ横揺れ軸周りの 慣性モーメント、付加慣性モーメントであり、 B_{44} 、 C_{44} はそ れぞれ横揺れ減衰力係数、復原力係数、 M_R は横揺れ強制モ ーメントを示す。横揺れ振幅角を ϕ_a とし、 $\phi = \phi_a \sin \omega t$ で表 わされる強制横揺れを船体に与えた時に得られる M_R をフー リエ級数展開し、横揺れ角速度に比例する項 $M_{Ra} \sin \varepsilon$ を求め ると、横揺れ減衰力係数 B_{44} は、

$$B_{44} = \frac{M_{Ra} \sin \varepsilon}{\phi_a \omega} \tag{2}$$

で与えられる。ここで、(2)式中の M_{Ra} は強制横揺れモーメントの振幅、 ϵ は強制横揺れモーメントと横揺れとの位相差を示す。

3.2 停止時の横揺れ減衰力の特性

双胴船および三胴船の横揺れ減衰力計測結果を、それぞれ Fig.1, Fig.2 に示す。同図横軸には横揺れ振幅角、縦軸には横 揺れ減衰力係数 B₄₄を示している。また、同図中には異なる 横揺れ周期での結果を同時に示している。Fig.1 に示す双胴 船の結果は、横揺れ周期によりその値および横揺れ角に対す る変化の傾向が不規則に変化するように見える。詳細にみる と、周期の短い T=0.4, 0.46[sec]では原点付近から横揺れ振幅 角の増加に伴って急激に増加し、それに比べて少し周期の長 い T=0.7, 0.9[sec]では微小横揺れ振幅角での値は比較的大き な値を示すが、横揺れ振幅角の増加に伴う変化は緩やかであ る。さらに周期の長い T=1.5, 2.6[sec]では原点付近から横揺 れ振幅角の増加に伴い緩やかに増加する傾向が見られ、横揺 れ周期の増加に伴いその傾向が次第に変化する。一方、Fig.2 に示す三胴船の結果は双胴船とは異なり、横揺れ周期が異な る場合でも、横揺れ振幅角の増加に伴う横揺れ減衰力係数の 増加量はほぼ一定であり、微小横揺れ振幅角での横揺れ減衰 力係数は周期が短いほど大きくなる結果が得られた。



Fig.1 Effects of roll amplitude on roll damping coefficient of the catamaran without forward speed.





異なる横揺れ周期に対して横揺れ振幅角の増加に伴う横 揺れ減衰力係数の増加量が変化するのは主として渦放出に 伴う粘性成分によるものであり、異なる横揺れ周期に対して 横揺れ振幅角が小さい領域での値が大きく異なるのは主と してビルジキール等による大規模な渦放出による粘性成分 (運動周波数の増加に伴い単調に変化する傾向が強い)や造 波成分(運動周波数の変化に対し非線形に変化する傾向が強 い)の特性が表れた可能性がある。そこで、両船型について 横揺れする模型船まわりの波の様子を船尾側からビデオ撮

NII-Electronic Library Service

高速多胴船の横揺れ減衰力に関する基礎的研究

影することで観察し、さらに水中から船底周りの流れの可視 化映像をビデオ撮影し横揺れによって船体から放出される 渦の様子を観察した。Fig.3 に示す水面の波の様子を撮影し た写真は、順に T=0.4[sec]、T=0.9[sec]、T=1.5[sec]のもので ある。双胴間の波形は横揺れ周期によって大きく異なり、周 期が最も短い T=0.4[sec]では一波長の波、少し周期が長い T=0.9[sec]では半波長の波がそれぞれ双胴間に閉じ込められ ており、さらに周期が長くなった T=1.5[sec]ではほとんど波 がたたない様子が観察された。特に横揺れ周期が短い時は、 各胴で造られる波の波長が双胴間距離と近い状態となり、双 胴間に波が閉じ込められるので、横揺れ減衰力係数が横揺れ 周期により複雑に変化するのではないかと考えられる。また、 横揺れ周期が短い場合、横揺れ振幅角の増加に伴い、Fig.4 に示す様なクロスデッキへのパンチングが観察され、この結 果横揺れ減衰力係数が急激に増加していると考えられる。一 方、三胴船の場合は、胴間の距離が短いために、胴間に生じ る波形は、周期が変化してもあまり変化せず、Fig.5 に示す 横揺れ周期が最も短い場合のみ胴間に半波長の波が閉じ込 められる現象が見られた。



Fig.3 Observation of wave profile between hulls of the catamaran.



Fig.4 Observed punching phenomenon against the catamaran cross deck at T=0.46, $\phi_a = 4$ deg.



Fig.5 Observation of wave profile between hulls of the trimaran at T=0.6, $\phi_a=5$ deg.

船底周りの流れの可視化は、双胴船では水面下の形状が長 手方向に大きく変化するので、船尾部の四角い断面と船体中 央部の丸い断面付近の2か所で行った。一方、三胴船ではサ イドハルの水面下の形状が長手方向にほとんど変化しない ので船尾部でのみ可視化を行った。可視化写真の一例として、 Fig.6 に三胴船のサイドハルまわりでの渦の様子を示す。観 察結果から、三胴船では横揺れ振幅角および横揺れ周期に関 係なくサイドハル下端、双胴船では四角い断面を持つ船尾部 の外側ビルジ部から渦が放出されていることが確認できた が、双胴船の船体中央部の丸い断面からの渦放出は顕著では なかった。また、双胴船のデミハル及び三胴船のサイドハル は横揺れ回転軸から横方向に離れた位置にあるため、渦放出 の様子は一般排水量型単胴船のものとは異なり、バージ船型 で見られる渦放出とよく似ている⁷⁾。



Fig.6 Observation of vortex shedding around side-hull of the trimaran from aft section of side-hull.

日本船舶海洋工学会論文集 第8号

3.3 航走時の横揺れ減衰力

Figs.7~10 に、航走時の横揺れ減衰力係数を示す。また、 同図中には異なる周期での結果を同時に示している。Fig.7 に示す双胴船の横揺れ減衰力係数は、停止時での結果と異な り横揺れ周期に関わらず横揺れ振幅角の変化に対してほぼ 一定となった。また、横揺れ周期が短いほど大きな値となる 結果が得られた。さらに Fig.8 から、横揺れ周期に関係なく 前進速度(フルード数)が増加すると、横揺れ減衰力係数が 単調に増加する傾向がみられる。



Fig.7 Effects of roll amplitude on roll damping coefficient of the catamaran with forward speed.



Fig.8 Effects of forward speed on roll damping coefficient of the catamaran.

一方、Fig.9 に示す三胴船の結果は、横揺れ振幅角が増加 すると単調に増加する傾向がみられ、前進速度(フルード 数)が増加すると、横揺れ周期に関係なくほぼ同じ値を示す ことがわかる。この傾向は、横軸をフルード数として整理し なおした Fig.10 において明確に見られ、フルード数の増加 に伴い横揺れ減衰力係数が一旦減少した後に、緩やかに増加 しながらほぼ同じ値にまとまることがわかる。



Fig.9 Effects of roll amplitude on roll damping coefficient of the trimaran with forward speed.



Fig.10 Effects of forward speed on roll damping coefficient of the trimaran.

両船型に対して、前述のような傾向が見られた原因につい て、横揺れ減衰力の各成分(ここでは、造波、造渦、揚力成 分を対象とする)の特性と合わせて考えてみる。

双胴船では前進速度があることで、横方向への渦放出が前 後方向に遷移し、造渦成分が急激に減少したため Fig.7 のよ うに横揺れ振幅角が変化しても横揺れ減衰力係数は変化せ ず、一方前進速度の増加に伴いて揚力成分が発生したため Fig.8 のように前進速度の増加に伴い横揺れ減衰力係数は単 調に増加しているものと考えられる。また、Fig.7 に見られ る横揺れ周期の違いによって表れる横揺れ減衰力係数の変 化は、主として双胴間の波の干渉影響を含めた造波減衰成分 の特性が表れたと考えられる。

一方、三胴船では前進速度の増加に伴い造渦成分が緩やか に減少するためFig.9のような速度の増加に伴う横揺れ減衰 力係数の横揺れ周期および横揺れ振幅角に対する依存性の 減少が見られたと考えられる。また、前進速度の増加に伴う 揚力成分の発生は、サイドハルの横投影面積が非常に小さい ために顕著ではなく Fig.10 のような前進速度の増加に伴う ゆるやかな増加になっており、さらにサイドハルの排水量が 非常に小さく、胴間の距離も短いので、双胴船に見られるよ うな波の干渉影響を含めた造波成分の影響はほとんど現れ なかったものと考えられる。

4. 横揺れ減衰力推定法

4.1 横揺れ減衰力の構成成分

停止時の船体周りの流場の可視化により、双胴船において は双胴間で顕著な造波干渉が、両船型でともに渦放出現象が 見られた。そこで、減衰力を構成する流体力成分は、双胴船 では造波成分(双胴間干渉を含む)、造渦成分および摩擦成 分、三胴船では主船体の横揺れ減衰力、サイドハルの造波成 分、サイドハルの造渦成分およびサイドハルの摩擦成分が支 配的であると考えた。一方航走時は、両船型とも停止時の減 衰力成分に揚力成分を加え、造渦成分および摩擦成分に対し て前進速度影響を考慮する。以上の考えに基づき、横揺れ減 衰力の成分分離型推定法を構築することとした。

三胴船の主船体による横揺れ減衰力は、一般排水量型単胴 船用の池田らの推定法をそのまま用いて算出することとし、 以下に、双胴船のデミハルまたは三胴船のサイドハルによる 造渦成分、造波成分、揚力成分、摩擦成分の算出方法につい て順に示す。

4.1.1 造渦成分

横揺れに伴う船底周りの流れの可視化から、三胴船ではサ イドハル下端、双胴船では四角い断面を持つ船尾部外側ビル ジ部からの渦放出が顕著であり、その渦の様子はバージ船型 のものと良く似ていた。そこで、バージ船型用の横揺れ減衰 力計算法を援用し、船底に作用する圧力の分布を決定し²⁾、 船底に沿って圧力と回転中心からのレバーを掛け合わせた 値を積分⁸⁾して造渦による横揺れ減衰力モーメントを求め た。なお、剥離点での圧力差を求める時に用いる圧力係数は、 参考文献 2)中の Fig.20 (pp.60)の矩形断面の実験値を参考に、 $C_{p}=1.2$ とした。さらに、造渦成分の前進速度影響は、一般 排水量型船型に用いられている計算方法¹⁾

$$\frac{B_E}{B_{E0}} = \frac{(0.04K)^2}{(0.04K)^2 + 1}, \quad K = \frac{L_{PP}\omega}{U}$$
(3)

をそのまま用いることとした。(式中、*B_{E0}と B_E*はそれぞれ 停止時および航走時の造渦成分。)計算にあたっては、簡単 のために双胴船のデミハル船尾部を矩形断面に近似し、三胴 船のサイドハルを三角形断面に近似した。また、船体の圧力 分布の形状を Fig.11 に示す。



Fig.11 Assumed profile of pressure distribution on demi-hull.

4.1.2 造波成分

多胴船の造波成分の算出法としては、大楠によって示された各胴の間の造波干渉を扱ったポテンシャル理論に基づく計算法⁴⁾がある。しかし、ここでは単純化のために船体中心から離れた船体の運動が上下揺れに近似できるものと考え、それぞれの上下揺れ減衰係数をもとに、モーメントレバーを掛け合わせることで算出する(4)式を用いることとした⁵⁾。なお、式中*B*33は端部影響を考慮したストリップ法で算出した。

$$B_W \dot{\phi} = 2l B_{33} l \phi_a \omega = 2l^2 B_{33} \phi_a \omega \tag{4}$$

この成分は、前進速度の増加に伴い、一般排水量型船型では 主に船首尾での造波干渉によりハンプ・フォローをもち、 Ω(=*ωU/g*)が 0.25 付近でピークを持つことが知られており、 池田らの推定法では、この性質が考慮されている³⁾。しかし ながら、本研究で対象とした高速多胴船の実験結果からは、 複数の胴で生じる波の干渉のためなのか、前述のような前進 速度の増加に伴う造波干渉は顕著に表れなかったため、この 影響は無視することとした。 日本船舶海洋工学会論文集 第8号

4.1.3 揚力成分

場力成分は前進速度の増加に比例して大きくなり、一般排 水量型単胴船においては、フルード数が0.2を超える範囲で 支配的な横揺れ減衰力成分となる。多胴船においても、同様 に航走時の支配的な成分となると考えられる。同成分の推定 は、池田らの推定式のモーメントレバーに修正を施した次式

$$B_{L} = \frac{1}{2} \rho S_{L} U k_{N} l'_{0} l'_{R} \left(1 - 1.4 \frac{OG'}{l'_{R}} + 0.7 \frac{OG'^{2}}{l'_{0} l'_{R}} \right), \quad k_{N} = \frac{2\pi d}{L_{pp}}$$
(5)

を用いた³⁾。なお、デミハルやサイドハルは船体の中心軸から離れているため、(5)式中 l'_0 、 l'_R 、OG'は、Fig.12 に従って 算出し、 S_L は、船体の横投影面積とした。



Fig.12 Coordinate system to calculate l'_0 and l'_R and OG'.

4.1.4 摩擦成分

全長 2m 程度の一般排水量型船型において、この成分は全 横揺れ減衰力の 8~12%程度を占める。ここで対象とする多 胴船は、一般排水量型船型に比べて喫水が浅いため、浸水表 面積が小さく同成分の全横揺れ減衰力に占める割合はさら に小さくなると考えられる。同成分は、船体を垂線間長と喫 水が等しい平板と仮定し、さらに船体中央から左右に離れた 位置にある船体の運動を上下揺れと仮定し、次式

$$B_{F} = \frac{8}{3\pi} \rho S_{f} \phi_{a} \omega l^{3} C_{f} \left(1 + 4.1 \frac{U}{\omega L_{pp}} \right)$$

$$C_{f} = \frac{1.328}{\sqrt{Rn}}, \quad Rn = \frac{4\phi_{a} ld}{Tv}$$
(6)

によって算出した。なお、レイノルズ数算出時の代表速度は、 加藤の式と同様に一揺れ間の平均速度とし、代表長は喫水と した⁶。また、同成分の前進速度影響には田宮の式を用いた。

4.2 推定結果と実験結果の比較

双胴船の横揺れ減衰力の推定結果と実験結果の比較を Figs.13~15 に示す。横揺れ周期が最も長い T=1.5[sec]の Fig.15 では、推定値は実験値の前進速度影響を概ね表現でき ているものの推定値は実験値に比べて前進速度に関係なく 一様に過大評価となっている。さらに、最も周期の短い T=0.46[sec]のFig.13 では、推定値は実験値の複雑な傾向を表 現できず、さらに全般的に過小評価となっている。推定結果 が悪くなる主だった原因としては、造波成分の推定精度に問 題があり、停止時には Fig.3、航走時には Figs.16~18 に見ら れる双胴間の複雑な波の干渉影響を考慮する必要があると 考えられる。

三胴船の横揺れ減衰力の推定結果と実験結果との比較を Figs.19~21 に示す。同図から、周期が最も短い T=0.6[sec] の Fig.19 中低速域を除いては、推定値と実験値は良い一致 を示している。この周期が短く低速の状態は Fig.5 の状態に 一致し、同写真に見られる胴間の波の干渉影響を考慮してい ないためであり、三胴船ではその他の状態では胴間に顕著な 波の干渉は見られなかったため、推定値は実験結果を上手く 表現できたと考えられる。前述したように、対象とした三胴 船の横揺れ固有周期は、模型スケールで 0.98~1.31[sec]程度 であり、このことを考慮すれば、同調横揺れやパラメトリッ ク横揺れの発生の有無についての性能評価においては、本推 定法が有用であると考えている。









NII-Electronic Library Service

高速多胴船の横揺れ減衰力に関する基礎的研究



Fig.15 Roll damping of the catamaran at T=1.5[sec.].



Fig.16 Wave profile between hulls for the catamaran at Fn=0.16, T=0.46[sec.].



Fig.17 Wave profile between hulls for the catamaran at Fn=0.31, T=0.46[sec.].



Fig.18 Wave profile between hulls for the catamaran at Fn=0.64, T=0.46[sec.].







Fig.20 Roll damping of the trimaran at T=0.8[sec.].



Fig.21 Roll damping of the trimaran at T=1.2[sec.].

154

2008年12月

5. 結 言

一般排水量型単胴船型と大きく異なる高速多胴船型とし て、波浪貫通型双胴船と高速三胴船を対象に、その横揺れ減 衰力を実験により計測するとともにその特徴を調査し、その 簡易推定法を構築する事で以下の結論を得た。

- 波浪貫通型双胴船の場合、デミハルが造る波の波長と双 胴間距離との関係で、双胴間に波がトラップされる現象 がみられ、造波成分として大きな影響を持つ。
- この造波成分は、停止時に周波数影響として現れるが、 双胴間に一波長の波がトラップされる横揺れ周期域を 除いては前進速度の増加に伴い急激に減少する。
- デミハルからの渦放出が流場観察により確認された。静止時の造渦成分は横揺れ振幅角の影響として表れるが、 前進速度の増加に伴いこの横方向の渦放出は前後方向の渦放出へと急激に遷移し、前進速度に伴う揚力成分として現れる。
- 4. 高速三胴船の場合、その横揺れ固有周期は双胴船に比べて一般に長く、一方胴間の距離が短いため、サイドハルの造る波が胴間で捕らえられる現象は顕著でなく、造波成分による周波数影響は殆ど現れない。
- 5. サイドハルでは大きな渦放出が見られ、静止時の横揺れ 減衰力の振幅影響ならびに周波数影響として現れるが、 前進速度の増加に伴いこの横方向の渦放出は前後方向 の渦放出へと緩やかに遷移する。しかし、サイドハルの 横投影面積が小さいため、前進速度に伴う揚力成分は比 較的小さく、前進速度の増加に伴う横揺れ減衰力の増加 は緩やかである。
- 6. ここで構築した簡易推定法は、三胴船では横揺れ固有周期付近において精度良く横揺れ減衰力を推定することができることを確かめた。一方、双胴船では造波成分の推定には双胴間の干渉影響が重要であること、粘性成分の推定では振幅影響および前進速度影響を定性的に表せることを確認した。

謝 辞

この研究を行うにあたり、横揺れ減衰力推定法¹⁾⁻³⁾に関し て終始貴重なご助言を頂いた大阪府立大学大学院工学研究 科池田良穂教授に心から御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 池田良穂:横揺れ減衰力,運動性能研究委員会・第1回 シンポジウム,1984, pp.241-250.
- 2) 池田良穂, 姫野洋司, 田中紀男: 裸殻の横揺れ造渦減衰 力について, 日本造船学会論文集, 第 142 号, 1977, pp.59-69.
- 池田良穂, 姫野洋司, 田中紀男:前進時の横揺れ減衰力 成分について, 日本造船学会論文集, 第 143 号, 1978, pp.113-125.
- 大楠丹: Multihull Ship の波の中の運動について,西部造 船会々報,第40号,1970,pp.19-47.
- Toru Katayama, Masanori Kotaki, Yoshiho Ikeda: A Study on the Characteristics of Roll Damping of Multi-hull Vessels, Proceedings of the 9th International Ship Stability Workshop, 2007.
- 加藤 弘:船の横搖れに対する摩擦抵抗について,造船 協会論文集,第102号,1958,pp.115-122.
- Y. Ikeda, T. Fujiwara and T. Katayama : Roll Damping of a Sharp-Cornered Barge and Roll Control by New Type Stabilizer, Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering conference, Vol.3, 1993, pp.634-639.
- B. Ali, T. Katayama and Y. Ikeda : Roll Damping Characteristics of Fishing Boats with and without Drift Motion, International Shipbuilding Progress, Vol.51, No. 2/3, 2004, pp.237-250.