

高速艇の横不安定性に関する基礎的実験

正員 坂口 健* 正員 鈴木 勝雄* 正員 日比 茂幸*

An experimental study on roll instability of high-speed boats

by Ken Sakaguchi, Member Katuo Suzuki, Member Shigeyuki Hibi, Member

Summary

Using two hard chine boat models, a torpedo boat with broad span and a passenger ferry with narrow span, fundamental data related to roll instability is obtained from static and dynamic inclining tests and roll tests in waves. The value of GM is confirmed to decrease when transversely inclined by hydrostatic calculation and inclining experiments in calm water and in steady flow. The broad spanned boat is obtained to be more advantageous at high speed. The wave analysis is conducted to get wave spectrum and wave pattern resistance for inclined hulls. At the same time wave pattern transverse force is calculated by Kotchin's formula. Furthermore wavelet transform is adapted to the wave analysis and the positions at which wave resistance and transverse force act are presumed.

Wave test for inclined hull is conducted in order to simulate turning in wave. Roll amplitude increases in proportion to mean inclining angle. With respect to roll at high speed the broad spanned boat is also more advantageous.

1. 序 論

高速艇において横揺による不安定性を改善するためには、GM 値を上げればよいと言われている。通常の排水量型船舶ではヒール角により GM はほとんど変化せず¹⁾、安定性と快適性を満足するような GM 値になるように決めるのが普通であるが、高速艇については横傾斜することによりメタセンタ高さが減少することが知られており、余裕を取って高めに設定している。

例えば、横揺については、波浪中で横復原力が減少したり、横傾斜したまま航走したり、ついには chain walking と称する運動を起こす場合がある。縦揺については、船首を水中に突っ込んだり、ついには縦揺と上下揺が連成したポーポイズを起こす場合がある。また進路不安定となる broaching を起こしたり、corkscrew と称する縦揺、船首揺と横揺の連成した操縦不可能になる現象もある²⁾。

本研究では、このような高速艇の不安定現象のうち、特に横揺の不安定性に注目し、ハードチャインを有する小型高速艇の模型を用いた実験を行い、静止時及び平水中航走時の横復原力の減少、ヒールさせた状態での波形計測により求めた波形抵抗や横力とそれらの着力点、波浪中の姿勢及び抵抗、横力の変化に関する基礎的なデータを取得することを目的としている。

2. 高速艇の GM 変化

2.1 GM 変化の計算

ハードチャインを有する艇については、横傾斜させたとき、排水量型の通常の船舶と異なる船底形状のため、GM の値が大きく変化することが予想される。そこで、まずオフセットをもとに排水量等曲線を求めた。

今回使用した滑走艇はハードチャインを有する 2 艇 (P; 魚雷艇型、O; 旅客フェリー型) で、主要目、正面線図を各々 Table 1、Fig.1 に示す。なお本論では排水量の単位は質量とした。

ヒール角 $\theta = 0^\circ$ における P の排水量等曲線を Fig.2 に示す。TKM 曲線を見ると計画喫水付近で変化が激しいことが判る。O 艇も同様である。

次にヒール角を付した場合の排水量等曲線を求めるため水平線を傾けたときのオフセットを作成した。このオフセットより求めたヒール角 10° のときの排水量等曲線を Fig.3 に示す。このときのメタセンタ高さ TKM の計算はヒール角 0° のときと異なり、浮心位置 (図中では底からの距離 KB (一点鎖線)、中心線からの距離 TCB (二点鎖線) と記している) から鉛直上方の艇体中心線と交わる点の高さとしている。本来のメタセンタと異なるので見掛メタセンタ (False or Shifting Metacenter) と呼ばれる点である¹⁾。以下これを「見掛」は省略して単にメタセンタと呼ぶ。

$\theta = 0^\circ$ における GM 値の差を Fig.4 に示す。通常の排水量型船舶と異なり、小傾斜角でも GM 値が大きく変化することがわかる。艇型の違いにより GM 減少の曲線が異なる。

2.2 GM 変化の測定試験

前節の計算結果を確かめるために、傾斜 (重心査定) 試験を行った。方法は、甲板上の重量物 (重量 w) を横方向 (距離 l) に移動し、そのときの傾斜角 θ を測定することにより重心高さを査定するものである。

* 防衛大学校

Table 1 Principal dimensions

Model	Lpp	B	d	Disp.	KB	KM ₀
P	0.690m	0.197m	0.027m	1.345kg	0.017m	0.145m
O	0.750m	0.168m	0.028m	1.545kg	0.019m	0.134m

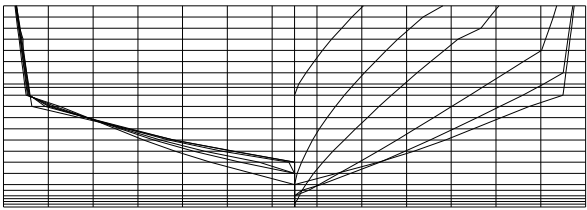
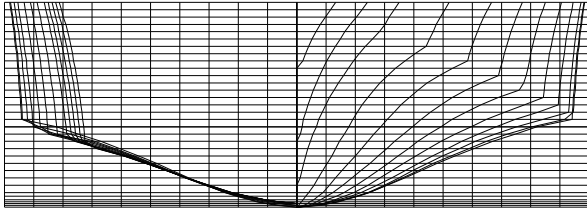


Fig. 1 Body plans for Boats P (above) and O (below)

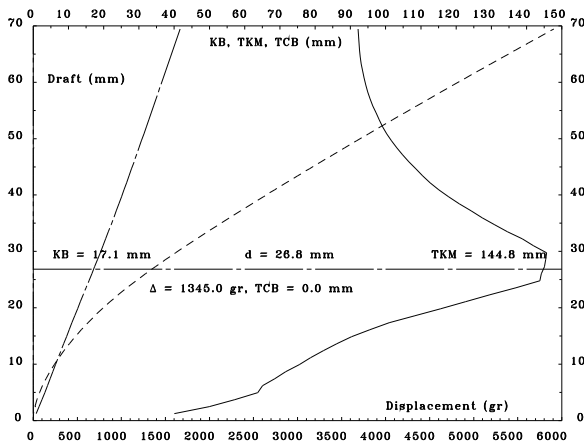


Fig. 2 Hydrostatic curves for Boat P at $\theta = 0^\circ$

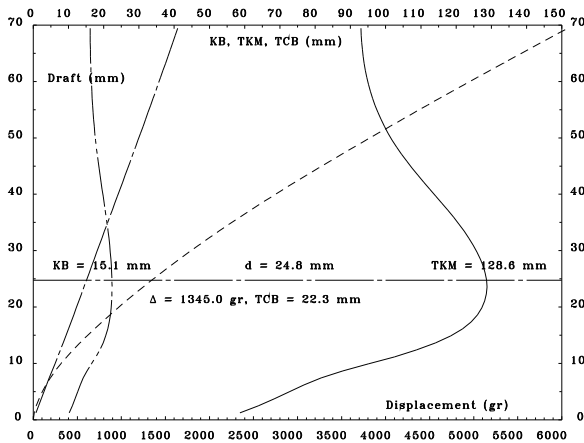


Fig. 3 Hydrostatic curves for Boat P inclined by $\theta = 10^\circ$

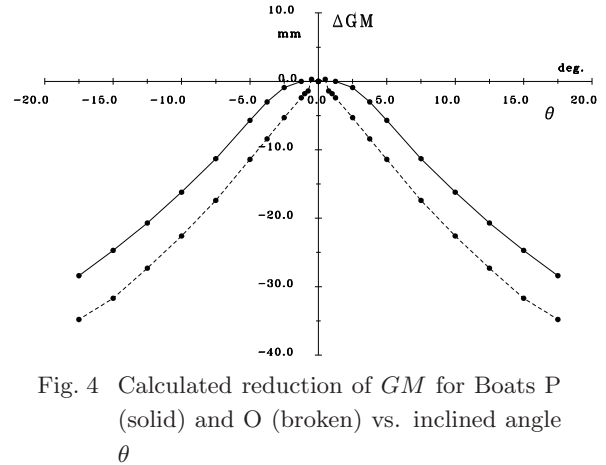


Fig. 4 Calculated reduction of GM for Boats P (solid) and O (broken) vs. inclined angle θ

結果を Fig.5に示す。横軸は右傾時を正としたヒールモーメントであり、縦軸は同様に右傾時を正とした傾斜角である。 $\theta = 0$ 付近の測定値の傾斜から正立時の GM の値が求まり、重心の高さが求められる。ハードチェーンを有する高速艇については、前述のように、傾斜時のメタセンタ位置が大きく変化する。

Fig.5の実測値から θ だけ横傾斜させたときの GM の変化量を求めることができる。それを Fig.6に計算値と共に示す。横軸は無次元化した横傾斜モーメント $C_m = wl/WB$ であり、縦軸は幅で無次元化したメタセンタの変化量 $\Delta GM/B$ を示す。計算値との一致は $|\theta| \geq 3^\circ$ で良好である。 θ が小さいときのばらつきは、計測誤差と、水面の表面張力の影響が大きいことなどが考えられる。

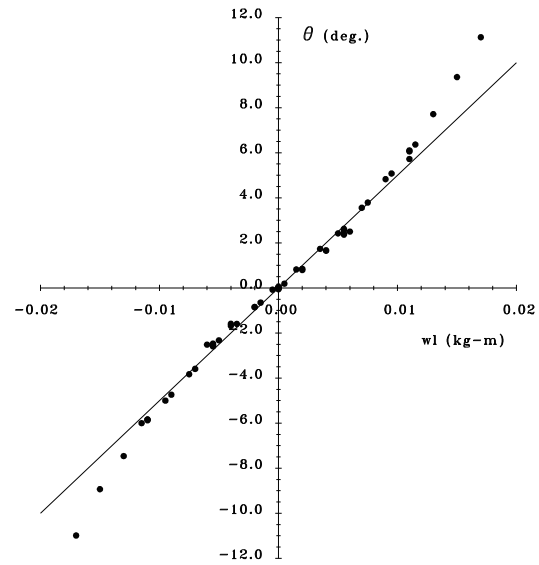


Fig. 5 Heel angle vs. heel moment for Boat P obtained by inclining tests

2.3 動的 GM

高速艇の航走時の横不安定性に関しても前節と同様な試験が行われることがあり、これを動的傾斜試験 (dynamic inclining test) と称しているようである³⁾。この試験の重要性を指摘したのは Grote⁴⁾ であり、初期ヒール角が大きいとき、あるフルード数でヒール角が急激に増大し、このとき GM の値は 0 となると

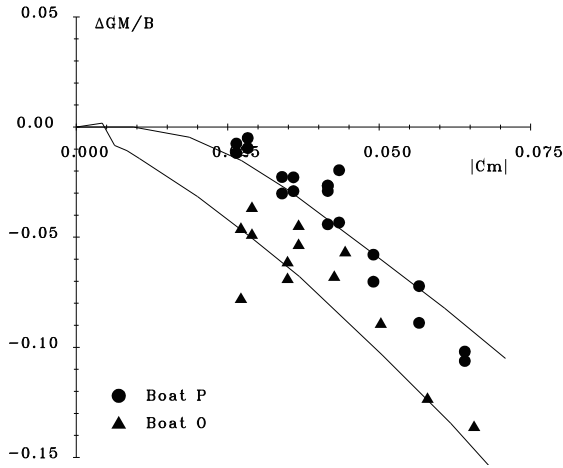


Fig. 6 Comparison of measured and calculated reduction of GM for Boats P and O

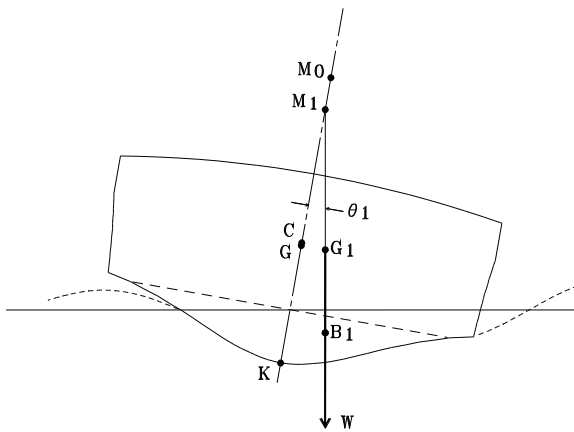


Fig. 7 Dynamic inclining test

述べている。

のちに Blount ら³⁾ は重心高さを変えた実験を行い、フルード数増加とともに GM が減少すること及び静水中の GM 値が低い場合には GM の値が 0 となる場合もあることを示している。田中ら⁵⁾ は横揺同調周期の測定で航走時の GM の減少を求め、船側波形の測定結果よりその原因を示し、田宮ら⁶⁾ は排水量型船について自由横揺試験から GM 値を求め航走時の GM 変化の挙動について論じている。片山ら⁷⁾ は横復原力曲線 (GZ) から横不安定性について論じており、基本的で有益な結果を得ているが、設計者の立場からすると、高速航行時の GM の余裕をいかにすれば良いかといった観点が望まれるのではないかと考えている。

航走時の GM の減少という立場から動的 GM 或いは動的メタセンタ高さというものについて考えてみる。航走時(平水中)艇内の重りを横に移動したとき、重心 G は G_1 に移動し (Fig.7)、ヒール角は θ_1 になったとしよう。このとき艇が水から受ける力は(横傾斜に関連する力のみを考える)静止水面に直角な方向にはたらく静的及び動的浮力(当然、艇の排水量 W に

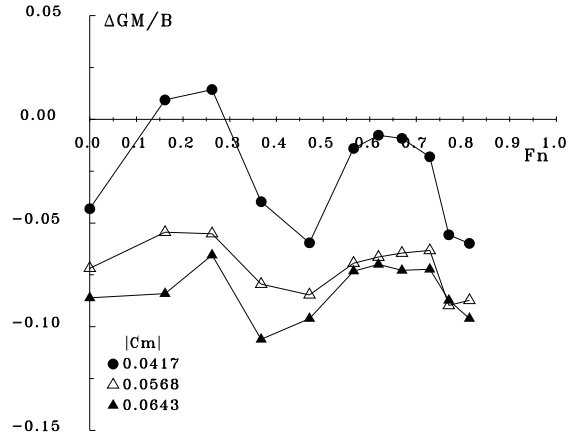


Fig. 8 $\Delta GM/B$ vs. F_n (Boat P)

等しい)と水面に平行な方向にはたらく横力 F_Y である。しかし横力の計測値は今回の実験範囲では排水量の 3% を越えることはなかった。従って、流体力は静止水面にほぼ直角にはたらく、また、重心点 G_1 を通るとしても大きな誤差は生じないと仮定できる。このことは、静止時に見掛メタセンタを求めた方法と同じ方法で流体力の艇体中心線と交わる点を求めればよいことを示している。この位置を動的メタセンタ位置とし、重心との距離を動的 GM と称することにする。

2.4 航走中の GM 測定試験

2.4.1 試験方法

航走中の GM 減少を確認するため、前述の模型船を用いて平水中の抵抗及び動的 GM 測定試験を行った。小重錘を移動させ、右傾時を正として最大ヒール角 $\pm 12^\circ$ 程度の範囲で左右 4 種ずつの横傾斜モーメントを与え、そのつど、全抵抗 R_T 、横力 F_Y 、沈下量 ζ 、トリム角 τ 、ヒール角 θ を計測した。

実験は防大回流水槽で行った。模型支持装置としては前述のように縦揺、上下揺及び横揺が自由となるものを設計製作して用いた。

2.4.2 試験結果

全抵抗 R_T を排水量で無次元化した値がフルード数と共に増加する傾向や値はこれまでの公表値^{9, 10)}と一致している。注目すべきはヒール角がついても抵抗値はほとんど変わらないことである。

航走中のヒール角 θ については、左右舷側のデータの平均値を取り、Fig.6と同様に GM の減少量としてまとめた結果を Fig.8,9に示す。 GM 減少量はフルード数に依存して複雑に波打つ。これは航走時は喫水や姿勢が複雑に変化することや滑走のために浸水面が変化すること、動的浮力(揚力)の影響があることなどのためであると思われる。また、艇型により異なり、P艇のように滑走に適した艇型では滑走開始後 ($F_n > 0.5$) に GM の減少が少なくヒールの安定性は良くなっている。一方 O艇のように幅の狭い艇型は高速で GM の減少は大きくなっている。

3. 波分解析

次に波分解析を行い、波形抵抗と波形横力を求めた。波分解析により求めた横力を波形抵抗にならって波形横力 (wave pattern transverse force) と称することにする。また、波分解析にウェー

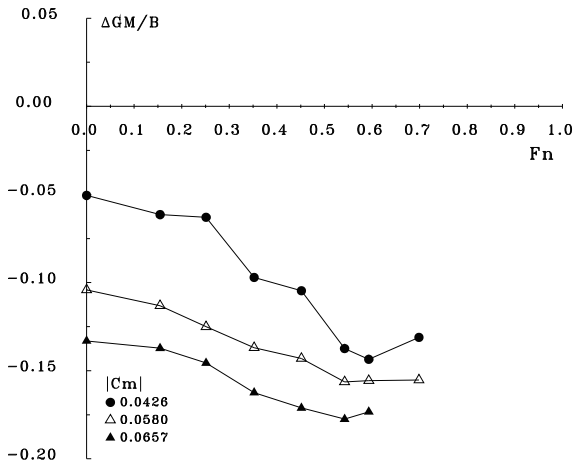


Fig. 9 ΔGM/B vs. F_n (Boat O)

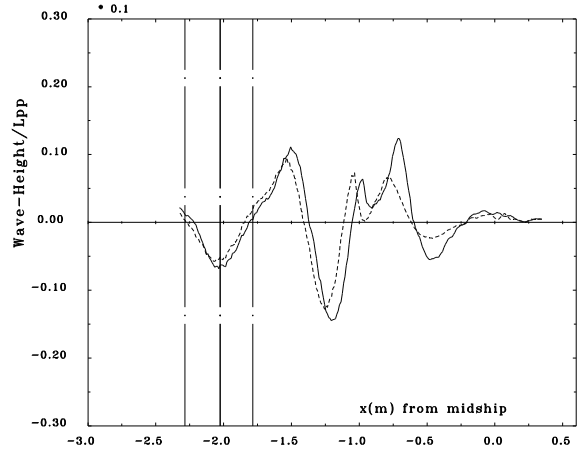


Fig. 10 Wave profile for longitudinal cut method ($F_n=0.47$)

フレッド変換を適用¹¹⁾することも試みた。この方法により、艇体のどの位置から発生する波が波形抵抗に大きく寄与しているかを見積もることができる。

横力を波形解析から求めるための解析的表示は古くから知られてはいたが¹²⁾、実際に適用されたことはないと思われる。波形抵抗と同様にウェーブレット変換を施すと、艇体のどの位置から発生する波が横力に大きく寄与しているかを求められる可能性がある。

波高 $\zeta(x, y)$ を艇体から離れた位置で計測すれば、素波の組み合わせで書け¹³⁾、逆フーリエ変換すれば振巾関数 $P(\theta), Q(\theta)$ を求めることができる。

今回の実験ではヒールした艇の作る波動に関して波形解析を行う必要があるので左右にヒールさせた艇の作る波動について各々の波形、振巾関数を 1, 2 という添字で表現することにする。波動のエネルギーを示す波スペクトラムは以下で与えられる。

$$A_{X_{1,2}}(\theta) = \frac{1}{4\pi} |P_{1,2}(\theta) + iQ_{1,2}(\theta)|^2 \sec^3 \theta \quad (1)$$

このとき波形抵抗 R_{WP} はヒールした艇の左右に作られる波動に関するエネルギーの和で書けるから以下の表示を得る。

$$\begin{aligned} \frac{R_{WP}}{1/2\rho U^2 L^2} &= \int_0^{\pi/2} A_X(\theta) d\theta \\ &= \int_0^{\pi/2} [A_{X_1}(\theta) + A_{X_2}(\theta)] d\theta \end{aligned} \quad (2)$$

波形横力に関する波スペクトラムは以下で表示できる¹²⁾。

$$A_{Y_{1,2}}(\theta) = \frac{1}{4\pi} |P_{1,2}(\theta) + iQ_{1,2}(\theta)|^2 \sec^4 \theta \sin \theta \quad (3)$$

このとき波形横力 F_{YP} は以下となる。

$$\begin{aligned} \frac{F_{YP}}{1/2\rho U^2 L^2} &= \int_0^{\pi/2} A_Y(\theta) d\theta \\ &= \int_0^{\pi/2} [A_{Y_1}(\theta) - A_{Y_2}(\theta)] d\theta \end{aligned} \quad (4)$$

3.1 波形抵抗

模型としては P 艇のみを用いた。艇体の作る波を計測するため艇体中心線と平行に 0.512 船長の右舷側の位置に波高計を設置

してトラバースさせた(いわゆる縦切り法)。フルード数 0.47 のときの計測例を Fig.10 に示す。図中実線は船体を右傾斜させたとき右側で計測した波形で、破線は左傾斜させたときのものである。中立時の波形は上の 2 波のほぼ平均的な形となっている。船体中央から 2m 後方位置付近の 1 点鎖線はいわゆる打ち切り点で、両側の 2 本の 1 点鎖線で囲まれた領域で横波を解析解とフィッティングさせ、中央の 1 点鎖線の位置で接続させている。

この波形に対応する式 (1) の波スペクトラムを Fig.11 に示す。長い破線が右傾斜したとき、短い破線が左傾斜させたときの波スペクトラムであり、それらの和を実線で示している。実線下の面積が波形抵抗となっている。また、右傾斜させたとき右舷側に発生する波のエネルギーが左傾斜させたときのそれを上回っており、波形の比較とも対応している。

中立時の波スペクトラム(図は省略)を前図と比較すると右傾時、左舷側で波形抵抗は減少し、右舷側で増加し、全体ではヒールさせると波形抵抗は減少している。計測した全抵抗値はほとんど変わらないので、ヒールさせると右舷側の飛沫や、波崩れが激しくなり、結果として波形抵抗が小さく表れるものと思われる。特に目に付くのは 65° 付近の発散波のスペクトラムがヒールさせると大きくなることで、ヒールにより右舷側の艇首付近より大きく急峻な発散波が発生していることを示すものと思われる。この傾向は低速 ($F_n=0.37$) で顕著であるが、高速 ($F_n=0.57$) ではこの角度付近の波はほとんど現れない(図は省略)。これは強い飛沫や波崩れによって波形として検出されないためであろうと思われる。

波形解析により得られた正立時の波形抵抗 R_{WP} を Fig.12 に白三角印にて示す。図中には静止時の浸水面積を用いた Schoenherr の摩擦抵抗 R_f を点線にて示し、それと波形抵抗との和を黒三角印にて示す。全抵抗 R_T と摩擦抵抗、波形抵抗の和との差は船首部分での飛沫や、波崩れなどによるものと考えられる。

3.2 Wavelet 変換の適用

波形解析にウェーブレット変換の適用を試みた¹¹⁾。ヒールなしの状態のウェーブレット変換の 1 例を Fig.13 に示す。最上図が計測された波形であり、左端が艇首位置、横軸はデータのサンプリング数を示している。右端の 250 番あたりで波形が不連続となっているのは、前述した打ち切り点で解析解を差し引いていた

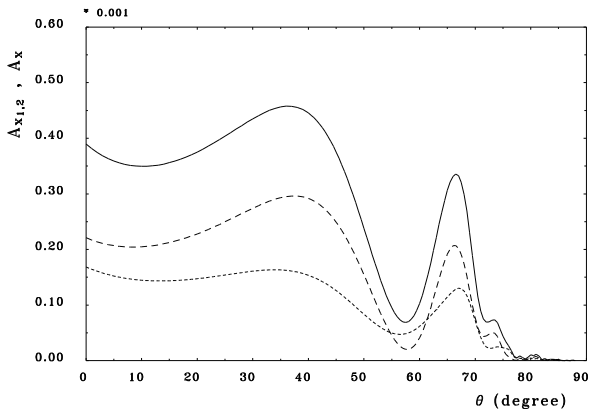


Fig. 11 Wave spectrum for wave resistance ($F_n=0.47$)

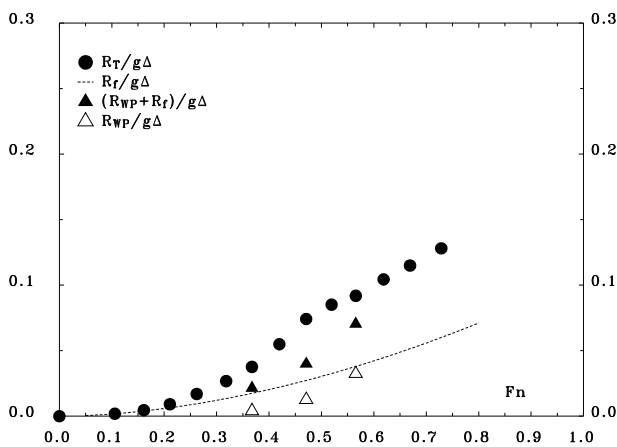


Fig. 12 Comparison of tow resistance and wave pattern resistance at $\theta = 0^\circ$

めである。この波形をレベル-1 から-8 まで分解したものが上から 2 番目以降の波形である。太実線で示した波形はそのレベルでのウェーブレット変換された波形でその強さは離散的なキックで示してあり、細実線で示した波形はまだ変換されずに残った波形である。レベルが浅い場合にはほとんど雑音だけになっており、レベル-4 から-6 あたりで元の波形のほとんどが表現されている。なお、ウェーブレット関数としては 4 次のスプライン関数を用いている。

上で用いたウェーブレット関数についてはそのフーリエ変換が解析的に求められているので、それにウェーブレットの強さを掛けて、上流より順次足し合わせていけば最終的に全波形のフーリエ変換ができたことになるが、その途中過程でその位置までのフーリエ変換値を知ることができ、局所的波形解析が可能となった¹¹⁾。すると波形のうちどの部分が波抵抗に大きく寄与するかわかる。また、線形造波理論の波紋図を用いれば、ある地点のある方向に進む波がどこから発生するかを推定することが可能である。こうした方法により波抵抗に大きく寄与する波が船体のどの位置(ただし船体中心線上の)から発生しているかを判定できるわけである。

正立時に、波スペクトラムがどのように変化するかを示したのが Fig.14 である。縦軸は波の進行方向で Fig.11 の横軸に対応している。左端の縦軸に沿って太実線で描いたものが波スペクトラム

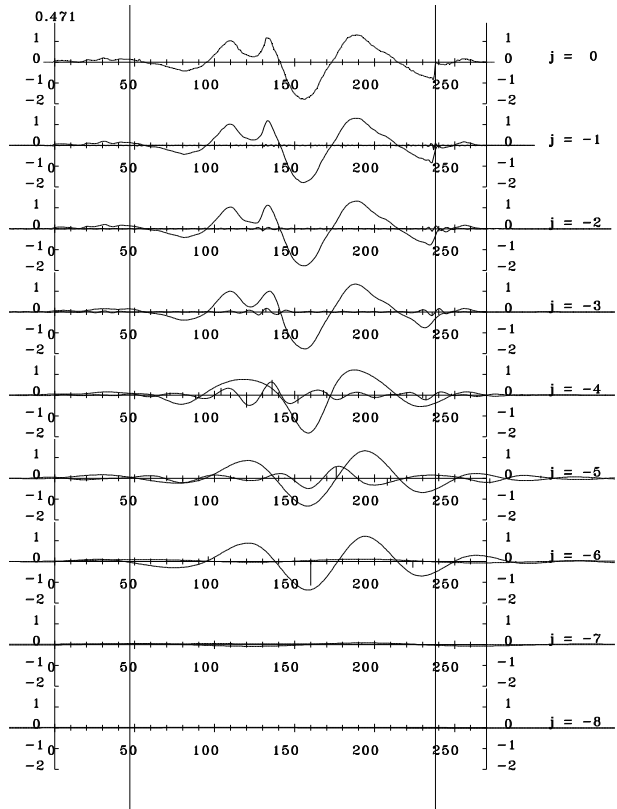


Fig. 13 Wave profile by wavelet transform ($F_n=0.47$)

である。横軸 (ξ) は船体中央からの艇長で無次元化した距離であり、1 番下の図は計測波形を示す。波スペクトラムの値が大きく、発散波が顕在する $\theta=35^\circ$ 付近でスペクトラムの変化をしてみる。 35° の横線に沿って右端から見てみると $\xi=-1.75$ 付近で急激に増大し $\xi=-2.25$ でも同様である。発散波成分中 $\theta=65^\circ$ 付近で波スペクトラムが極大となっている。この角度での波スペクトラムの変化をしてみると $\xi=-1.25$ 付近から立ち上がり $\xi=-3.0$ 付近まではなだらかに上昇している。

図中 3 本の曲線は前述の波紋の性質から各 θ 方向に進む波が艇体中心線のどの位置から発生しているかを示す線で左右の 2 本は各々艇尾、艇首を、中央の線は艇体中央を示している。但し、次のことに注意する必要がある。Fig.15 に艇の発生する波の存在する角度を示した。艇首付近から発生する波は艇体により側方に押し出されるので線形理論では艇首よりかなり前方の白丸付近より発生するように見える。艇尾トランサム側端より発生する波は艇体中央より少し後方から発生するように見える。トランサム後方には滑走艇特有の鶏の尾のような盛り上がった波が出来、この部分から発生する波はほぼ同地点から発するよう見えるはずである。

そうした見地から Fig.14 を見ると $\theta=35^\circ$ で $\xi=-1.75$ の波スペクトラムの増大はトランサム側部から発生する波に、 $\xi=-2.25$ の増大はトランサム後方から発する波に由来するであろう事が分かる。 $\theta=65^\circ \sim 70^\circ$ の $\xi=-1.25$ 付近での増大は艇首から発する波による事が分かる。艇首から発する波が意外にエネルギーが小さく見えるのは主として飛沫として消費されてしまうことによるものと考えられる。

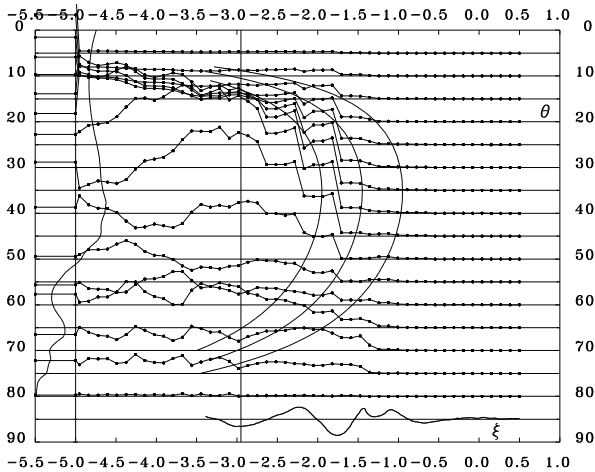


Fig. 14 Wave spectrum for wave resistance by wavelet transform ($F_n=0.47$)

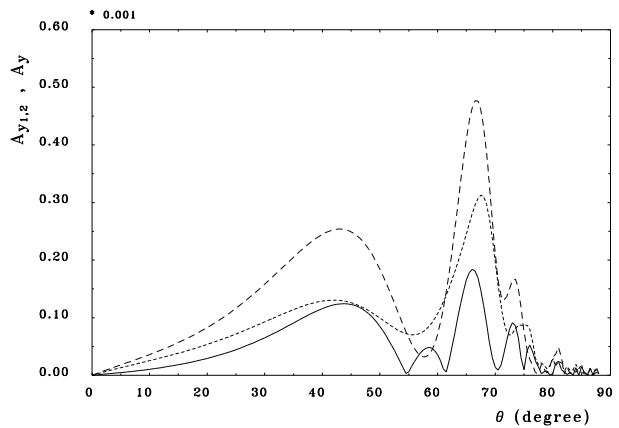


Fig. 16 Wave spectrum for transverse force ($F_n=0.47$)

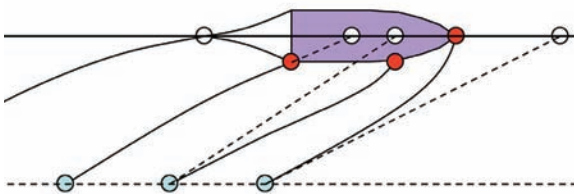


Fig. 15 Propagated waves from a hull

3.3 波形横力

次に波形横力について見てみる。Fig.10に示す波に横力に関する波形解析を行い、波スペクトラムを求めた結果を Fig.16に示す。長い破線が右舷側の波によるもので、短破線が左舷側の波によるものである。両者の差を実線で示し、太実線部分が右舷側に働く力(正)、細実線部分が左舷方向に働く力(負)を示している。 $\theta=45^\circ, 65^\circ$ 付近に極大値がある。

ウェーブレット変換して波スペクトラムの変化を表したものを Fig.17に示す。 $\theta=45^\circ, 65^\circ$ 付近では各々艇尾付近、艇首付近から出る波によるものである事がわかる。艇首で受ける横力が相当大となる事が予想されるが、意外と小さいのはやはり飛沫による波エネルギーの損失が大きいためであろう。高速では艇首の寄与はもっと大きなものとなっているが図は省略する。

最後に波形解析による波形横力 F_y を横力の計測値と比較した結果を Fig.18に示す。白抜き印は分力計による計測値である。中、低速では波形解析による値が分力計による値より低いのは波形抵抗と同じであるが高速では逆転している。精度等の検討を要する。

4. 波浪中動揺試験

高速艇は旋回運動するとき、かなりの角度で横傾斜することが知られており、これが横不安定性の原因となる場合もある。初期舵角を少し取って発進し、すぐに舵角を0に戻した模型実験では、そのままヒール角を増大させながら旋回し続け、ついには沈没に至った場合もある¹⁴⁾。これは平水中での実験であるが、波浪中ではさらに危険となることが予測され、そうしたデータの取得しておく必要があると考えられる。しかしながら本校では波浪中を自由航行させる施設はない。そこで回流水槽で造波し

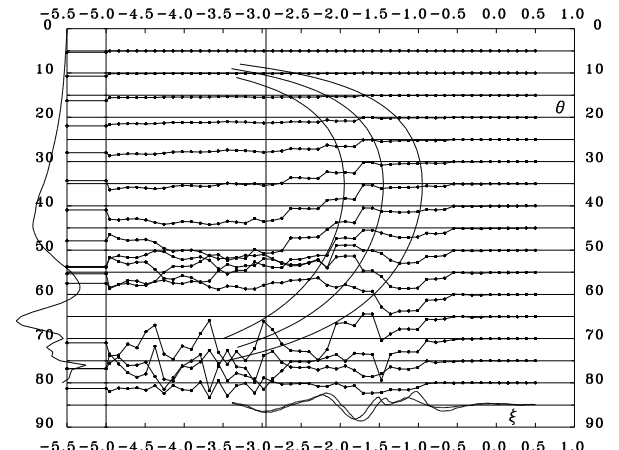


Fig. 17 Wave spectrum for transverse force by wavelet transform ($F_n=0.47$)

8)、模型船をヒールさせた状態で諸量の計測を行い、旋回を準静的に模擬することとした。

曳航装置の構造上、前後揺、左右揺は固定されているので運動は自由航走時と異なる点に留意しておく必要がある。横揺等に関してこの拘束の影響を考慮して横揺回転中心はなるべく重心位置近くとした (Fig.7参照)。

両艇について、向い波中の動揺試験を行い、横傾斜した状態での横揺れの振幅等の測定を行った。流速は3種 (流速 $V = 1.04, 1.35, 1.61\text{m/s}$ 、フルード数はP艇については各々 $F_n=0.40, 0.52, 0.62$ 、O艇では $F_n=0.38, 0.50, 0.59$) であり、向い波の周波数は5種 ($f = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0\text{Hz}$) とし、波高/波長比は $f = 1.5, 2.0\text{Hz}$ のとき、 $1/160, 1/80$ 、他では $1/80, 1/40$ とした。各々の波浪条件の下に、小重錘を移動させてヒールさせ、沈下量と上下揺、トリムと縦揺、ヒールと横揺及び全抵抗と横力を測定した。測定結果の一例として、フルード数 0.62 、造波 (出会い) 周波数 2.5Hz 、波高波長比 $1/80$ の場合の計測値を Fig.19に示す。以後、本章で諸量の振幅とは特に断らない限りフーリエ級数展開の1次の項の振幅とする。

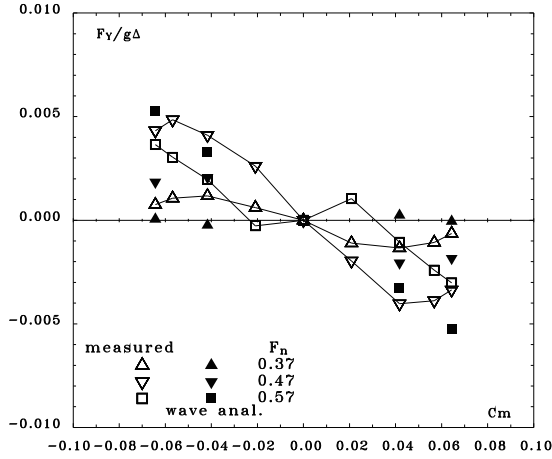


Fig. 18 Comparison of transverse forces by tow test and wave analysis

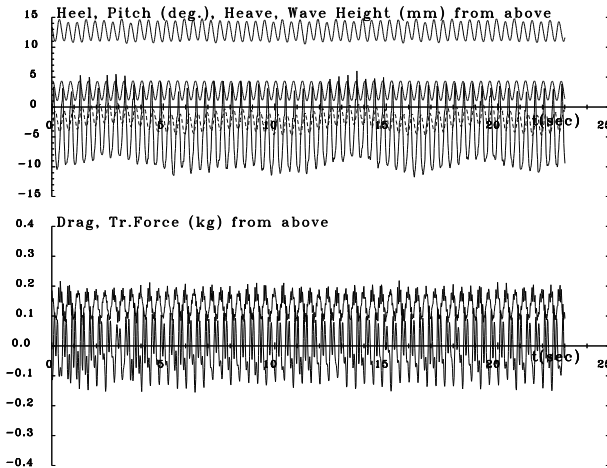


Fig. 19 Wave records for wave height, heave, trim, roll, total resistance and transverse force (Boat P, $F_n=0.62$, $f=2.5\text{Hz}$)

4.1 抵抗増加量および前後力

抵抗増加量および前後力の振幅共にどのヒール角においてもほとんど同一であったので各状態（波の周期、波高/波長比）で平均をとった。抵抗増加量 ΔR を排水量 Δ と波傾斜 κa で無次元化したものを Fig.20~22に示す（P艇のみ）。横軸は入射波の波長/船長比であり、値が増大する程低周波の波を示す。図中の三角印は、波高/船長比が1/160の場合、丸角印は1/80、四角印は1/40の場合を示す。波長が長くなると共に抵抗は増加し、低速では、排水量型船舶と同様入射波高の2乗に比例する（入射波振幅 a で無次元化した値が a に比例する）が、高速では1乗に比例する（入射波の波高/波長比が異なっても同一の値となる）ようであり、高速艇の特徴である⁸⁾。O艇についても値は小さいもののほぼ同様の結果を得ている。

前後力の振幅 R_A を排水量と波傾斜で無次元化した結果を Fig.23に示す。前後力の振幅はほぼ入射波高に比例し⁸⁾、波長が長くなると増大している。前後力の振幅は全抵抗の半分以上となる場合もある。波長が長い領域でO艇の値は若干低めの値をとる。幅/長さ比が小さい場合にはFroude-Krylov力が弱くなるためと思われる。

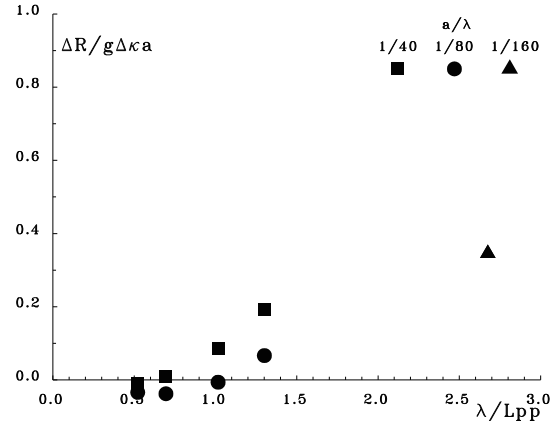


Fig. 20 Mean augmented resistance for Boat P at $F_n=0.40$ in head waves

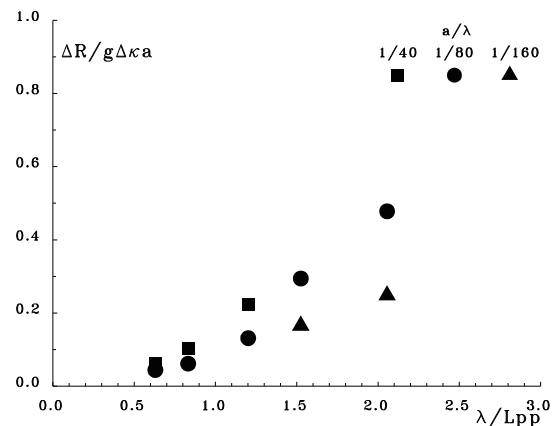


Fig. 21 Mean augmented resistance for Boat P at $F_n=0.52$ in head waves

4.2 沈下量及び上下揺

沈下量の時間平均値はヒールさせても平水中と同様の傾向を示し、ほとんど同一であった。データのまとまりが悪く、入射波の振幅との明確な関係は得られなかったが、P艇では、中、低速では入射波振幅の2~3割程度浮上し、高速域では1割程度浮上している。O艇ではP艇ほどではないが1割程度の浮上が見られ、この差は幅/船長さ比によるものであろう。また、両艇について、波長/船長さ比が小さい時、浮上量が大きくなる傾向が見られる。

上下揺の振幅 ζ_A もヒールさせても変化はほとんどなかったもので、平均値をとり、波高 a で無次元化した結果を Fig.24に示した（P艇のみ）。両艇とも上下揺の振幅は波振幅に比例し、波長が長くなる程大きくなる。

4.3 トリム及び縦揺

トリム角の時間平均値は平水中の値と殆ど変わらない。

縦揺の振幅 τ_A はヒールさせてもほとんど同一であったので各状態の平均をとり、波傾斜で無次元化した値を Fig.25に示す。縦揺の振幅は入射波の波傾斜に比例し、実験した波長範囲では波長が長い程大となる。波長/船長さ比が2以上では排水量型船舶と異なり $\tau_A/\kappa a$ が1.5を越える値となり高速艇の特性のように考えられる^{8, 15)}。

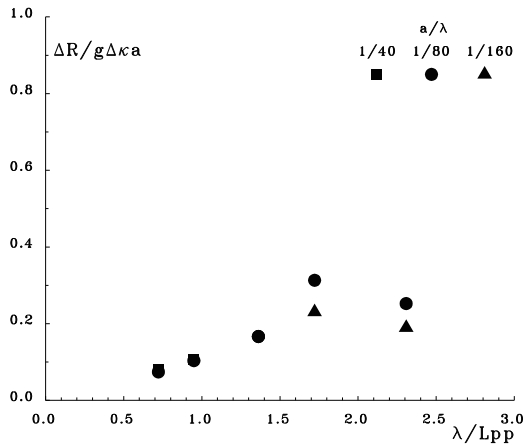


Fig. 22 Mean augmented resistance for Boat P at $F_n=0.62$ in head waves

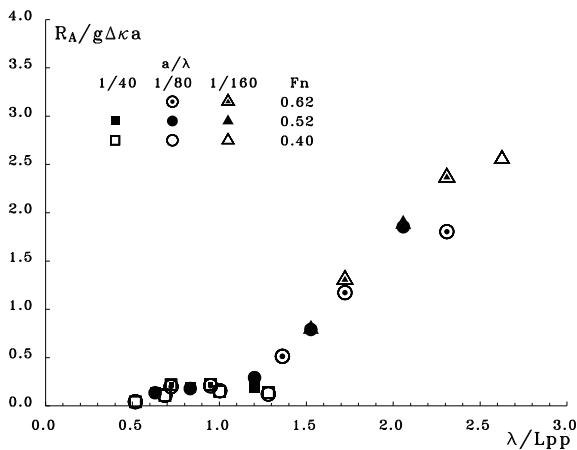


Fig. 23 Amplitude of surge force for Boat P at advanced speed

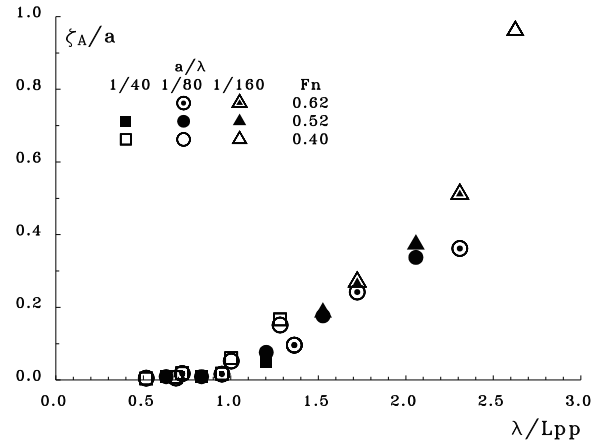


Fig. 24 Amplitude of heave for Boat P at advanced speed

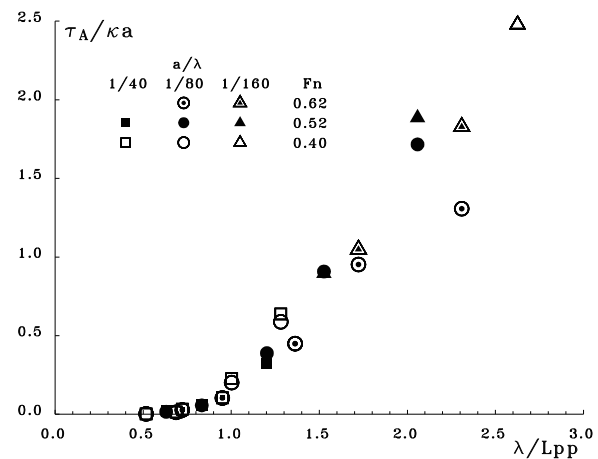


Fig. 25 Amplitude of pitch angle for Boat P at advanced speed

4.4 横傾斜及び横揺

波浪中ではヒール角は平水中とほぼ同一か若干大き目となるが、入射波の波長が長くなると更に大きくなる傾向がある。

横揺の振幅 θ_A をヒール角の時間平均値と波傾斜の積で除した値を Fig.26に示す。横揺の振幅は入射波の波傾斜 κa に比例することは確認しているが、更に時間平均値 θ_M (約2倍異なる) にもほぼ比例しているように見える。振幅が θ_M ないし C_m に比例するという事は注目すべきことであるが理由ははっきりしない。また、高速になるほど、振幅は低下する傾向がある。実験に用いた波長範囲では波長が長くなる程大きくなる。さらに長波長となると極大となり、その後は減少していくと思われる。

ヒール角が大きいとそれに比例して横揺角も大きくなるので、波浪中で旋回してヒールした場合などには危険であり注意が必要である。この点に関する P, O 艇の性能の比較は Fig.26だけでは明瞭でなく、横揺角そのものについて見るべきであろう。例をあげるとフルード数約 0.6、 $\theta_M \approx 12^\circ$ の状態で波高/波長比 1/80、波長/船長比 2.3 の向波中において P 艇が $2\sim 19^\circ$ の横揺角で動揺するのに比し、O 艇ではほぼ同一フルード数、波高/波長比で、波長/船長比が約 1.9 に達すると同程度以上の横揺動揺を起こす。波長が長くなると横揺振幅は急激に大きくなるので、高速時の波浪中性能という面では P 艇の方が優れていると

云えよう。

4.5 横力

横力については P 艇 (流速 1.35, 1.61m/s) のみについて述べる。右にヒールさせると左舷方向に横力がはたらくがわずかな量であり、高々排水量の 1%程度である。

Fig.19の横力の波形をフーリエ級数展開すると他の量と異なり高次の項が大きく現れる。その一例として、フルード数 0.62、向い波の周波数 2.0Hz、波高/波長比 1/80 のときの 1~5 次の項の振幅成分を、時間平均値 (0 次の項) とともに Fig.27に示す。1 次の項が主要であるが、高速、低周波域ではヒール角が大きいとき、全振幅で排水量の 1 割程度にまで達する。高次の項が現れるのは艇首が波浪中に落ち込むときに衝撃的な力が作用することを示している。なお、O 艇との比較では際立った差異は認められなかった。

回頭モーメントの計測を行っておらず Wavelet 変換を適用した波形解析からも判然としないが、横力の着力点は艇首付近であり、右にヒールしているとき艇首を左に回そうとするモーメントが働くものと思われる。横力と回頭モーメントの関係については今後の課題としたい。

5. 結 論

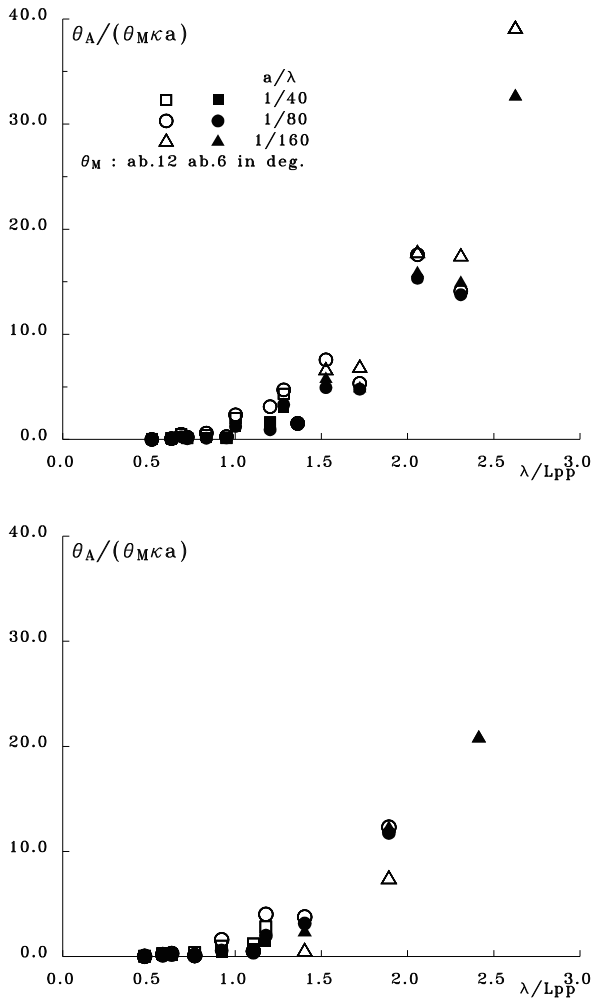


Fig. 26 Amplitude of roll angle for Boats P(above) and O(below)

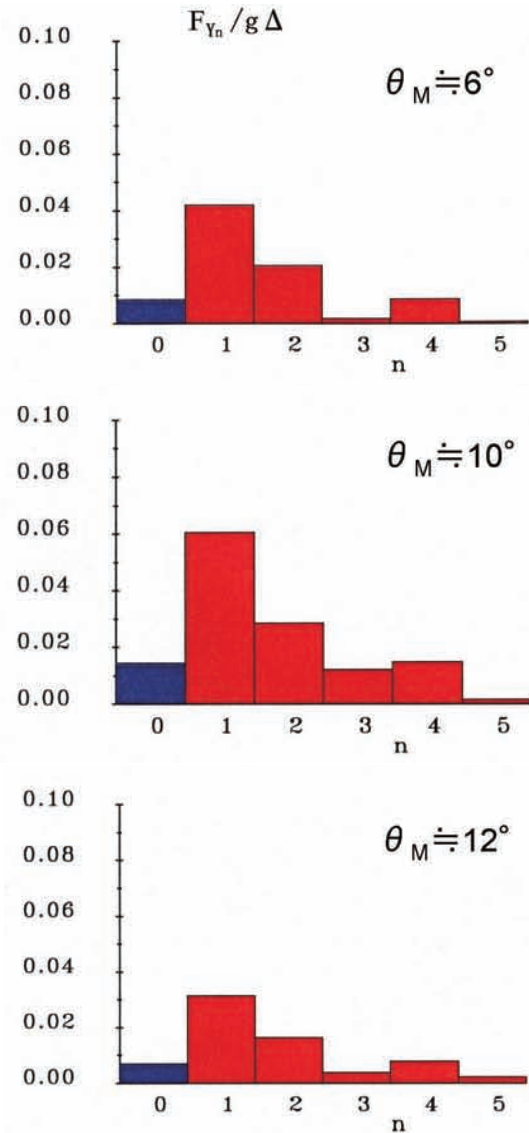


Fig. 27 Amplitudes of transverse force by Fourier analysis for Boat P at $F_n=0.62$

ハードチェーンを有する 2 隻の小型高速艇の模型を用いた実験を行い、静止時及び平水中航走時の横復原力の減少、ヒールさせた状態での波形計測により求めた波形抵抗や横力、及び波浪中の姿勢及び抵抗、横力の変化に関する基礎的なデータを取得し、以下の結論を得た。

1. ヒールした高速艇のメタセンタ高さはヒール角増加に伴い大きく低下する。
2. ヒールによる GM の減少量はフルード数に対して複雑に変化し、高速では、わずかなヒールモーメントで大きく傾斜する。
3. ヒール状態での波形解析により、波形抵抗、横力及びそれらの着点の推定を可能とした。
4. 波浪中でヒールすると横揺振幅はヒール角と入射波高に比例する。
5. 2 隻の優劣については際立った差異はないが、高速及び波浪中では幅広の艇型の方が優れている。

謝 辞

研究実験を共に行った本科 4 年笠水正朗君、山口智剛君、本科卒業生阿蘇翔太君、吉田真琴君に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大串雅信：理論船舶工学 (上巻), 海文堂 (1953)
- 2) O.M.Faltinsen : Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, Cambridge Univ. Press (2005)
- 3) D.L.Blount, L.T.Codega : Dynamic stability of planing boats, Marine Technology, Vol.29, No.1, pp.4-12 (1992)
- 4) G.Grote : Discussion to S.H.Cohen, D.L.Blount : Research plan for the investigation of dynamic instability of small high-speed craft, SNAME Tran., Vol.94, pp.197-214 (1986)
- 5) 田中紀男, 姫野洋司, 小倉雅人, 増山和雄 : 航走中の横揺性能に関する実験, 関西造船協会誌, 第 146 号, pp.63-71 (1972)
- 6) 田宮真, 小村隆士 : 高速航走時の横揺特性, 日本造船学会論文集, 第 132 号, pp.159-168 (1972)

- 7) 片山徹：高速滑走艇の不安定現象に関する基礎的研究，大阪府立大学博士論文，平成10年2月
 - 8) 佐藤信一，鈴木勝雄：回流水槽用造波機による造波実験と高速艇の波浪中試験，日本船舶海洋工学会論文集，Vol.1，pp.127-135 (2005)
 - 9) 川原梅三郎，鈴木勝雄，藪下和樹：トリム固定方式動力計による高速艇の抵抗試験，関西造船協会誌，第220号，pp.71-82 (1993)
 - 10) H.Tanaka, M.Nakato, K.Nakatake, T.Ueda, S.Araki : Cooperative resistance tests with geosim models of a high speed semi-displacement craft, 日本造船学会論文集，第169号，pp.55-64 (1991)
 - 11) 小谷克己，佐々木紀幸，村上恭二，木原一，鈴木勝雄：波形解析結果による船型改良の試み，第3報 Wavellet 変換の応用，関西造船協会誌，第230号，pp.51-57 (1998)
 - 12) N.E.Kochin : On the wave resistance and lift of bodies submerged in fluid, Transactions of Conference on the Theory of Wave Resistance, Moscow (1936), Translated in SNAME Tech. & Res. Bull. No.1-8 (1951)
 - 13) J.N.Newmann : Marine Hydrodynamics, MIT press (1977)
 - 14) E.Baba, S.Asai, N.Toki : A simulation study on sway-roll-yaw coupled instability of semi-displacement type high speed craft, Second conf. on stability of ships and ocean vehicles, Tokyo, pp.79-80, (1982)
 - 15) 別所正利，小松正彦，安生正明：高速艇の規則波中縦運動の研究，日本造船学会論文集，第135号，pp.109-120 (1974)
-