

カッターの動特性に関する実験的研究—Ⅲ*

静水中における動揺特性について

高島 末夫・貞包 弘之・橋本 市雄・本間辰太郎

Some Experimental Studies on Dynamic Characteristics of a Cutter—III.
Rolling Characteristics of a Cutter in Still Water

By

Sueo TAKASHIMA, Hiroyuki SADAKANE, Ichio HASHIMOTO,
and Tatsutaro HONMA

This paper presents the results of free rolling trials carried out to clarify some rolling characteristics of a cutter in still water. In these trials used a length 9 m type actual cutter, the boat was given an initial heel angle, about 10~12 deg., by method of the application of small moments synchronized with the boat's period of roll, and thereafter it was permitted to roll freely.

Heeling angles has been detected by using a free gyro and recorded on oscillograph. Classification of these rolling trials and boat's conditions are shown in Table 1.

The results obtained are summarised as follows:

(1) In the case of all the crews landed on shore, the virtual radius r of gyration about longitudinal axis through the center of gravity and the natural period T_s of roll of a cutter, can be obtained as

$$r = 0.39B \text{ and } T_s = 1.9/\sqrt{GM}.$$

(2) When all the crews embarked on a boat, if the crews squat down on the bottom board of the boat, the metacentric height \overline{GM} increases about 7% as compared with \overline{GM} when the crews landed on shore. But if the crews keep on other posture, i.e., remain sitting or standing on thwart, etc., the metacentric height decreases 7~38% as compared with one of the crews landed on shore.

(3) The approximate values of the W.FROUDE's extinction coefficient a and b of a cutter under all the crews landed on shore, were obtained from rolling trial as $a=0.1305$

* 水産大学校研究業績 第749号, 1975年7月17日 受理.

Contribution from the Shimonoseki University of Fisheries, No.749.

Received July 17, 1975.

and $b = 0.0239$. And these values are nearly twice larger than the values of other general ship types. Moreover, that value of the extinction coefficient of a cutter under the crews embarked on it, varies in accordance with the crews posture as showed in Table 3.

(4) On the freely rolling motion in still water of a cutter under the crews embarked on it, the crews action keeping one's balance has an effect on roll damping. And the effect when the crews remain standing is larger than when the crews sit down.

(5) The boat's oars, held out and put in water with all the blades levelled, have a clear effect on the increase not only of the metacentric height but of the extinction coefficient of roll.

(6) If the values of a , b were obtained from general rolling trials with various conditions of a cutter, rolling motion of the boat in still water can be obtained by formula 1 with sufficient accuracy.

1. 緒 言

船体の運動を検討する場合には、3軸の座標に関する合計六つのモードの運動について考えねばならないが、一般的には他のモードの運動と連成することが少ないことや、船体中心線面に対し対称運動であるかあるいは反対称運動であるかによって、いくつかの組の連成運動に分離して扱われるのが普通である¹⁾。したがってここでは、横動揺のみを分離した形で検討する。云うまでもなく横揺れは、船の安全性、乗心地に直接的に影響する重要な運動で、一般船舶を対象とした横動揺に関する研究の歴史は古く、最近における成果も目覚ましいものがある²⁾。

カッターに関する限りでは、その使用目的と航行水域から、大角度傾斜時の復原性とか甚だしい荒天中の動揺性能より、通常ブーリング可能な海況における動揺性能を知ることが適切であると考えられる。

ここでは、このような考えのもとに静水中でカッターの動揺試験を実施し、これに種々の検討を加えた結果を報告する。

2. 実験・計測方法

ブーリングができる状態に装備した艇体及び計測器具の重量と乗艇員の合計体重を実験開始前に測定し、排水量を決定した。

動揺角度は直流24Vフリージャイロ動揺計を用い、ロール角、ピッチ角を検出、別に設置した艇速を計るための流速計の出力をそれぞれオッシログラフに記録した。計測水域は湾内で、ほぼ完全な無風、静水状態で実験を行ない、動揺に対する浅水影響はその考慮の必要がない水深のところで行った。

また空船時の重心査定及び動揺試験を実施し、重心位置 $\bar{K}G$ と環動半径 r を測定した。ボートの動揺は、乗艇員の人為的な加速によって片舷振巾が約10~12度になれば動揺加速は停止、その後艇員は艇内で静止させ、動揺の減衰状況を計測した。

艇の動揺試験は、カッターの状態、プーリング中の状態等を考慮して、第1表に示した種類について実施した。

Table 1. Classification of rolling trials and boat's conditions.

Exp. No.	Boat	Crew	Oar
1	Crews on boat	Sit on thwart	Hold out and keep level
2	"	"	Hold out and put in water with keeping the blade level
3	"	"	Hold out and put in water with keep the blade vertical
4	"	"	Lay aside on thwart
5	"	Stand on thwart	"
6	"	Stand on bottom board	"
7	"	Squat on bottom board	"
8	Crews on shore		"

3. カッターの復原性等の基礎資料

海事教育においては非常に古い歴史をもち、最も広範囲に使用されている長さ9m型のカッターではあるが、その排水量等曲線図、復原力曲線図等の資料は見当らず、今回カッターの運動性能を調査する基礎資料として、これらを計算した。その結果からここで必要な排水量及び \overline{KB} , \overline{KM} 曲線図を第1図、復原力交さ曲線図を第2図に示す。

一般船舶では、空船状態・満載状態がほぼ明確に示されるが、カッターではこの状態の定義が明らかでない。ここでは艇本体に舵、敷板、ストレッチャーを装備し、オール12本をスワート上に両舷に分けて積込んだ状態を空船状態とし、体重70kgの艇員12名が通常のプーリング状態に着席し、その他に2名が艇尾腰掛に着席した状態を満載状態とした。カッターを空船状態として、陸上にて重量計測すると1266.7kgであったが、その後、進水浮上したときの前後喫水を読みとり、排水量曲線から排水量を求めると1265kgであった。

空船状態の重心査定を行ない、その結果を基礎として復原力曲線を得たものを第3図に示す。海水流入角については勿論考慮が必要であるが、第3図によってカッターの復原性能の一部を推定することができる。

また重心査定直後、初期傾斜角5～6度を与えて動揺試験を実施し、フリージャイロで動揺角を検出し、オッシログラフの記録から空船状態の環動半径 r を求めた。その結果は、 $r/B=0.3864$ となり、これは勿論付加水影響を含んだ値である。

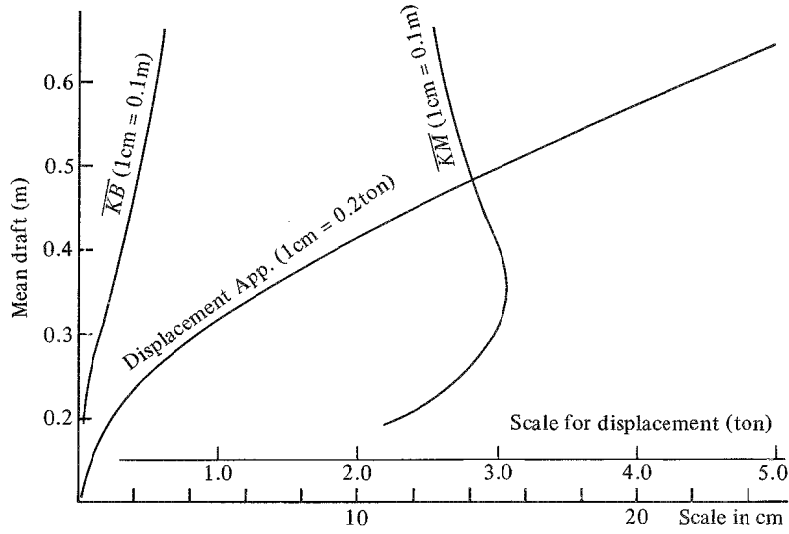


Fig. 1. Curves of \overline{KB} , \overline{KM} and Displacement.

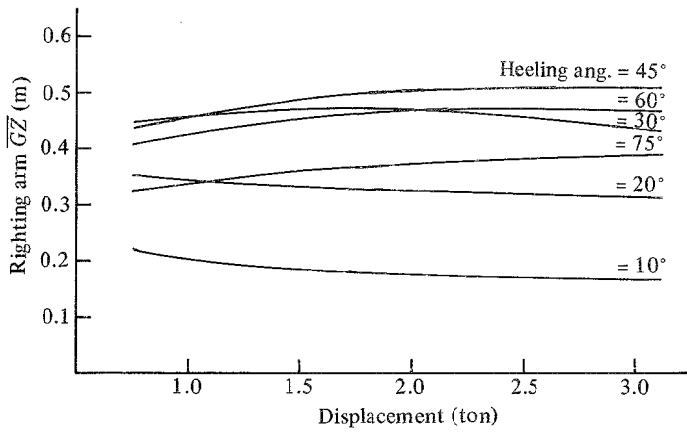


Fig. 2. Cross curves of stability.

Note: All curves are for an assumed \overline{KG} (above base line) of 0.40m.

一般船舶の動揺周期，メタセンター高さ m と船巾の関係が $T_s = 0.804B/\sqrt{GM}$ であるのに対し，カッターでは $T_s = 0.777B/\sqrt{GM}$ となり，特に9m型カッターでは， $T_s = 1.903/\sqrt{GM}$ で近似できる。この関係は空船状態における初期復原力の推定だけでなく，環動半径が大きく変化しないと云う仮定のもとで，動揺周期を知れば簡単にメタセンター高さを推定することができる。

カッターやライフボートでは，艇内で常時移動可能な艇員の合計重量の，満載排水量に対する割合は大きく，今回の実験では約43.7%を占めていた。しかも艇の進水浮上，艇員の乗艇，艇内の移動，プーリング等と操艇の各段階における艇内重量分布は変化し，それに伴ない重心の移動が起こり，結果的にカッターの復原力に影響を及ぼす。このことは，ライフボートの場合には特に重要な意味をもつものと考えられる。

今回使用した9 m型カッターについて、艇員の艇内における状態がメタセンター高さに与える影響を、前述した動揺試験から固有周期を求めて推定すると第2表のようになった。即ち艇員がカッターの底に座った

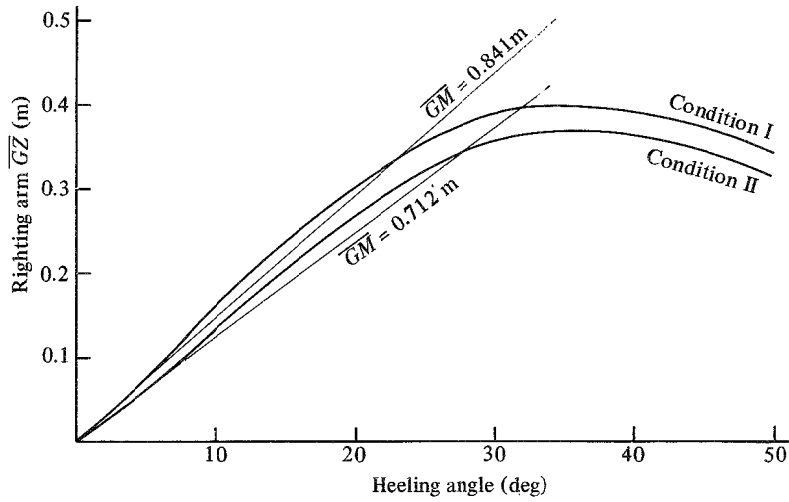


Fig. 3. Curves of statical stability.

Note Condition I : The boat equipped with sufficient fittings for pulling and crews on shore

Condition II : Total crew's weight adds to the condition I.

Table 2. Relation between boat's conditions and metacentric height.

Exp. No.	$\overline{GM}(m)$	The ratios to Exp. No. 8 \overline{GM}	The ratios to Exp. No. 4 \overline{GM}
1	0.5247	0.641	0.751
2	0.7198	0.879	1.030
3	0.7198	0.879	1.030
4	0.6991	0.854	1.000
5	0.5103	0.623	0.730
6	0.7641	0.933	1.093
7	0.8727	1.066	1.248
8	0.8188	1.000	

場合を除き、艇員が乗艇すると空船状態に比べてメタセンター高さは減少し、艇の安定を考える経験則がこの表により定量的に説明できる。

実験 No. 4 を基準にして考えれば、オールをローロックに入れて舷外空中で支持すると、オールの重量上昇だけカッターの重心は上昇し、メタセンター高さは $\overline{GM}_{No.4} - \overline{GM}_{No.1} = 0.1744(m)$ だけ減少する。一方オール先端のブレードを水面につけると、 $\overline{GM}_{No.2} - \overline{GM}_{No.1} = 0.1951(m)$ だけメタセンター高さは増加する。この増加の原因は、水面のブレードによりカッターの横動揺中心線まわりの慣性モーメント I が ΔI だけ増加し、結果的にメタセンター M 点が上昇したもので、オールの形状・状態を仮定すると ΔI は理論的に推定できる。

このように、乗艇後オールを水面につけることは、カッターの安定性の増加に効果があり、今回の実験では \overline{GM} で約 3% の増加となった。

4. 横動揺試験結果とその検討

4・1 運動方程式

船体の横動揺の運動方程式における慣性項、減衰項は一定の値ではなく、運動の速さ即ち横動揺の周波数 ω_o ($\omega_o = 2\pi / T_s$) によって変化するが³⁾、ここでは簡単にするため一定値と考える。また次のような仮定を設ける。即ち、

- (1) 復原挺 $\overline{GZ} = f(\theta) \doteq \overline{GM}\theta + \alpha\theta^3$ ただし $\alpha > 0$
- (2) 動揺抵抗 $M_r = f(\dot{\theta}) \doteq k_1\dot{\theta} \pm k_2(\dot{\theta})^2$
- (3) 有効波面傾斜角 $\varphi = \gamma\Phi \sin \omega t$ ただし $\omega = 2\pi / T_w$ とする。このような仮定により、規則波中の横動揺の運動方程式は次のように表わすことができる。

$$\ddot{\theta} + 2x\dot{\theta} \pm \beta(\dot{\theta})^2 + \omega_o^2\theta + k_3\theta^3 = \omega_o^2\gamma\Phi \sin \omega t \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $x = \frac{gk_1}{2Wr^2} = \frac{2}{T_s} a$
 $\beta = \frac{gk_2}{Wr^2} = \frac{3}{4} b$
 $\omega_o^2 = \frac{g\overline{GM}}{r^2} = \frac{4\pi^2}{T_s^2}$
 $k_3 = \frac{g\alpha}{r^2} = \frac{g}{r^2} \frac{1}{2} (\overline{BM} - \frac{\overline{GM}}{3})$

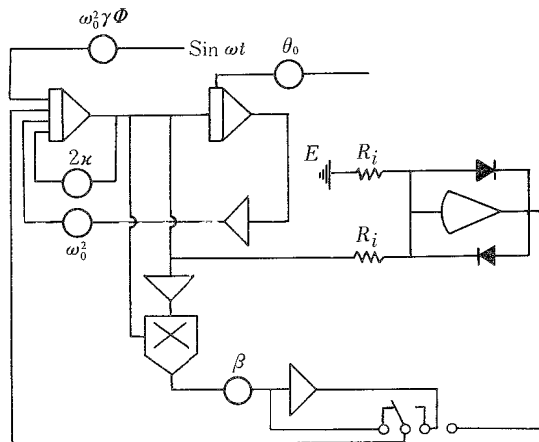


Fig. 4. Block diagram for analogue computer.

ここで a , b は, 船の静水中におけるフリーローリングの減減曲線を W. FROUDE の式, 即ち $\Delta\theta = a\theta_m + b\theta_m^2$ で表わした場合の係数である。

周知のとおりカッターでは, 横傾斜に対する海水流入角が割合小さく, 満載状態で約26度, 空船状態で約29度位であり, また第3図に示した復原力曲線からみて明らかなように, 運動の振巾が小さい範囲では(1)式の k_3 は0とおいても良いと考えられる。(1)式で $k_3 = 0$ の場合の解を, アナログ計算機で求める場合のブロック図を第4図に示す。今回の場合は静水中であるために $\Phi = 0$ とし, 初期条件は $t = 0$ のとき $\dot{\theta} = 0$, $\theta = \theta_0$ で解を求めた。

4・2 動揺角実測値と推定値

海上における船体の動揺特性を知るためには, その復原性能を知るとともに動揺の抵抗特性を知る必要がある。カッターについても全く同じことが云えるわけで, 特に外板の張り方が一般の船と異なり, しかもビ

Table 3. The extinction coefficients a and b of a cutter under various conditions.

Exp. No.	a	b
1	0.1058	0.0375
2	0.3543	0.0357
3	0.3683	0.0045
4	0.2545	0.0141
5	0.4318	0.0052
6	0.3448	0.0023
7	0.2770	0.0304
8	0.1305	0.0239

Table 4. The extinction coefficients a and b of general ship type.

Ship type	a	b
Small passenger boat	0.050	0.0125
Small cargo boat	0.030	0.0155
Small fishing boat	0.100	0.0140
Whaler	0.060	0.0070

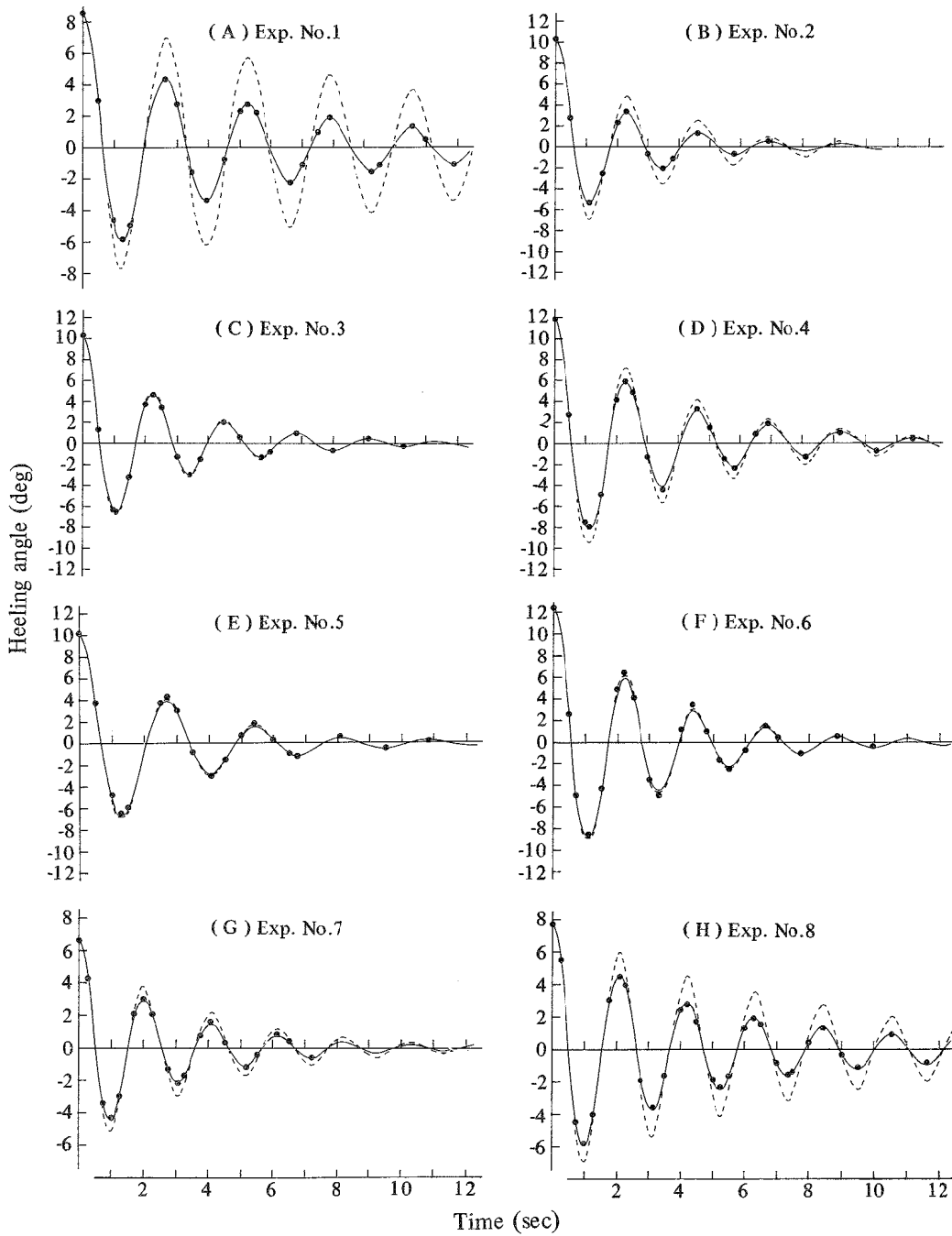


Fig. 5. Comparison of observed and calculated roll decay motion in still water.

Note ● : Observed
 — : Non-linear calculated
 - - - : Linier calculated

ルジキール、バーキールともに船体に比較して割合大きいカッターの動揺抵抗の性質を知ることが重要である。更にオールを水面につけている場合は、興味深い問題と思われる。動揺抵抗は N 係数で表現することが多いが、ここでは動揺の近似計算に便利のために減減係数 a 、 b で代表させる。

今回実施したカッターの、種々の状態における動揺試験から係数 a 、 b を求めると第3表のようになった。この a 、 b は計算によって直接求めることはできないが、他の船型の値と比較のため、一般船型の係数を示すと第4表のようになる⁴⁾。

第3表、第4表を比較して明らかなように、一般の船型に比べてカッターの抵抗係数は大きく、横動揺の減衰は早いようである。特に実験No.1～No.7までは、水面につけたオールの影響や乗艇員の微妙な動きが影響しているとも考えられるが、実験No.8は艇体のみで、一般船舶と同様に考えられる。そのような実験No.8の結果から、カッターの空船状態における動揺減減係数 a 、 b の値は、ごく概略的に云って、どちらも一般船舶の約2倍と想定して良い。

このようにして実験的に求めた係数 a 、 b を用いて、静水中の抵抗動揺を近似計算した結果を第5図A～Hに示す。これらの図は(1)式にて $\beta = k_3 = \Phi = 0$ とした線形近似計算の結果と、 $k_3 = \Phi = 0$ とした非線形近似計算の結果及びオシログラフの記録紙から得た動揺角の実測値を比較したものである。計算は、いずれも本学のMELCOM-EA-7420型アナログ計算機を使用した。

カッターの艇体だけの横動揺特性を示していると考えられる実験No.8について、実測値と計算値を比較すると、第5図-Hに示しているように線形計算では近似は悪いが、非線形計算では極めて良い近似を得ることができる。減減係数 b を省略した線形計算では動揺抵抗を過少に見積り、その結果実測値に比べて計算値の減衰は相当遅い。係数 a は波を発生することに基づき、係数 b は摩擦とビルジキール、船体突出部が水中を運動することに基づいていることを考えれば、係数 a 、 b を考慮した運動方程式が必要である。カッターの場合動揺振巾が特別大きくない限り、ここで用いた程度の非線形運動方程式によって、実用上十分な精度で動揺角を推定できると考えられる。

実験No.1～No.7については、先に述べたように艇体以外に複雑な要素を含んでいる。これらの各実験についても、線形計算で十分実測値に近い値を得ることもあるが、概して実測値より動揺減衰が悪い。しかし、それぞれの状態について動揺試験から得た係数 a 、 b を用い、非線形計算を行なうと第5図A～Gから明らかなように、いずれの場合も極めて実測値に近い近似値を得ることができる。

4・3 乗艇員と動揺減衰

カッターやライフボートのように、満載排水量に対する艇員の重量が比較的大きい場合には、動揺中のカッター内における艇員の微小な動きが、艇の運動に相当影響すると考えられる。

実験No.4～No.7はオールの影響はなく、艇員の艇内における状態の影響のみが現われている。したがって動揺抵抗の大きさを考えると、実験No.8の a 、 b を用い、艇員の状態に応じた重心の移動即ち \overline{GM} の変化のみを考慮すれば良い。この考え方で各実験の運動方程式を解いたものと、4・2で得た各実験の非線形解を比較した結果を第6図A～Dに示す。

これらの図から明らかなように、艇員が乗艇している場合の横動揺は、艇体だけの場合の減減係数 a 、 b の値を用いたのでは実測値の近似は悪く、動揺減衰が非常に遅い。

このことは、艇員が乗ることによって重心移動だけでなく、動揺抵抗も変化し、艇体だけの場合に比べてかなり大きくなると思われる。即ちカッター内にいる人間が、艇の動揺に逆らって鉛直状態を維持しようとする本能的な動作によって、体重の作用点が移動し、しかもその移動位相が動揺位相とほぼ90度ずれているために結果的に動揺抵抗が増加したのと同じような、いわゆるダンピング効果をもつものと考えられる。

しかもこの効果は、これらの図から明らかなように艇員が座っている場合より、船底又はスワートの上に立っている場合が大きい。この効果は係数 a 、 b に含ませるより、むしろ抵抗モーメントとして運動方程式に加えた方が良く、このためには更に実験をすすめる必要がある。

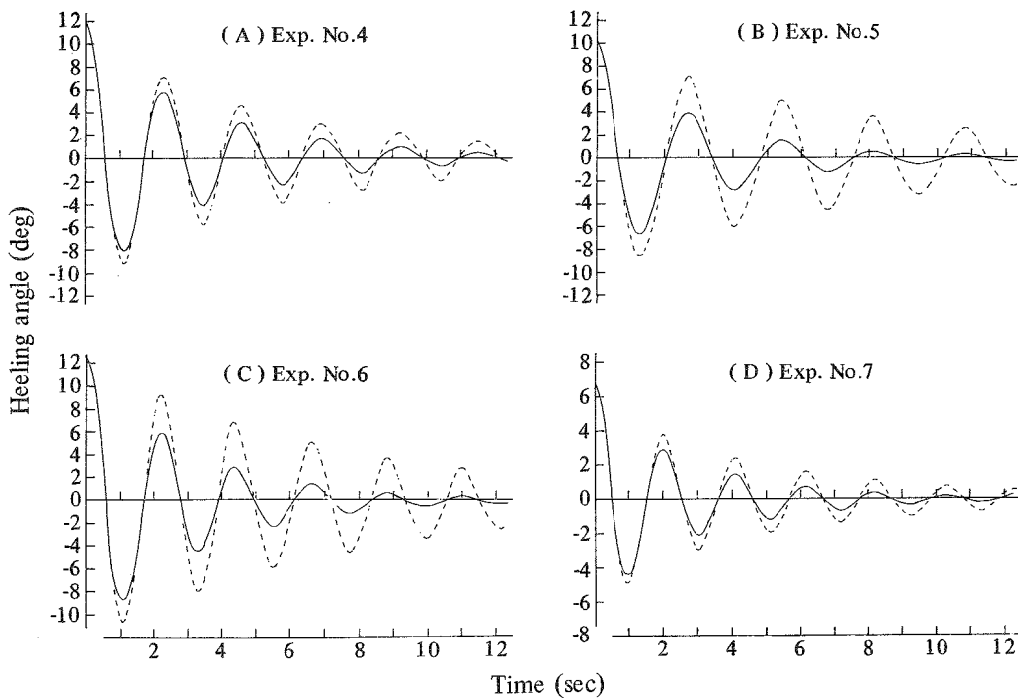


Fig. 6. Influence of crew's damping effect on roll decay motion in still water.

Note ——— : Observed value of each experiment

----- : Non-linear calculated value obtained by using the \overline{GM} of each boat's condition and the extinction coefficient a, b obtained from Exp. No.8

4・4 オールと動揺減衰

カッターの空船状態から艇員が乗艇し、オールを舷外の空中に、あるいは水面につけた場合には、静水中の動揺であっても艇体だけの動揺に比べていろいろな要素が加わっている。ここでは、オールが動揺減衰にどのように影響するかを検討してみる。

艇体だけの動揺試験から得た係数 a, b を用い、 \overline{GM} の変化だけを考慮して非線形計算した結果と、4・2で得た実験No.1～No.3の非線形計算結果を各実験ごとに比較したものを第7図A～Cに示す。また艇員のダンピング効果を考慮している実験No.4の係数 a, b を用い、しかも \overline{GM} の変化を考慮して計算した結果と、4・2で得た非線形計算結果を比較したものを第8図A～Cに示す。

これらの図からオールが空中支持の状態にある場合には、艇員のダンピング効果と重心移動のみを考慮すればほぼ実測値を近似することが可能で、この状態ではオールそのものによるダンピング効果はない。

第7図B, Cと第8図B, Cを比較すると、オールのブレードを水面につけた場合でも艇員のダンピング効果を考慮した方が実測値に近づく。しかし第8図B, Cから明らかなように、実測値と計算値の間にはまだ差が残り、実測値の減衰が早い。

この減衰の早さの差は、水面につけているブレードの動揺抵抗のためと考えられる。第8図Bは水面のブレードを水平にした場合、第8図Cはブレードを垂直にした場合で、動揺抵抗の増加と云う点からみると、ブレードを水面で水平にして保持する方が良く、経験的事実をよく説明している。

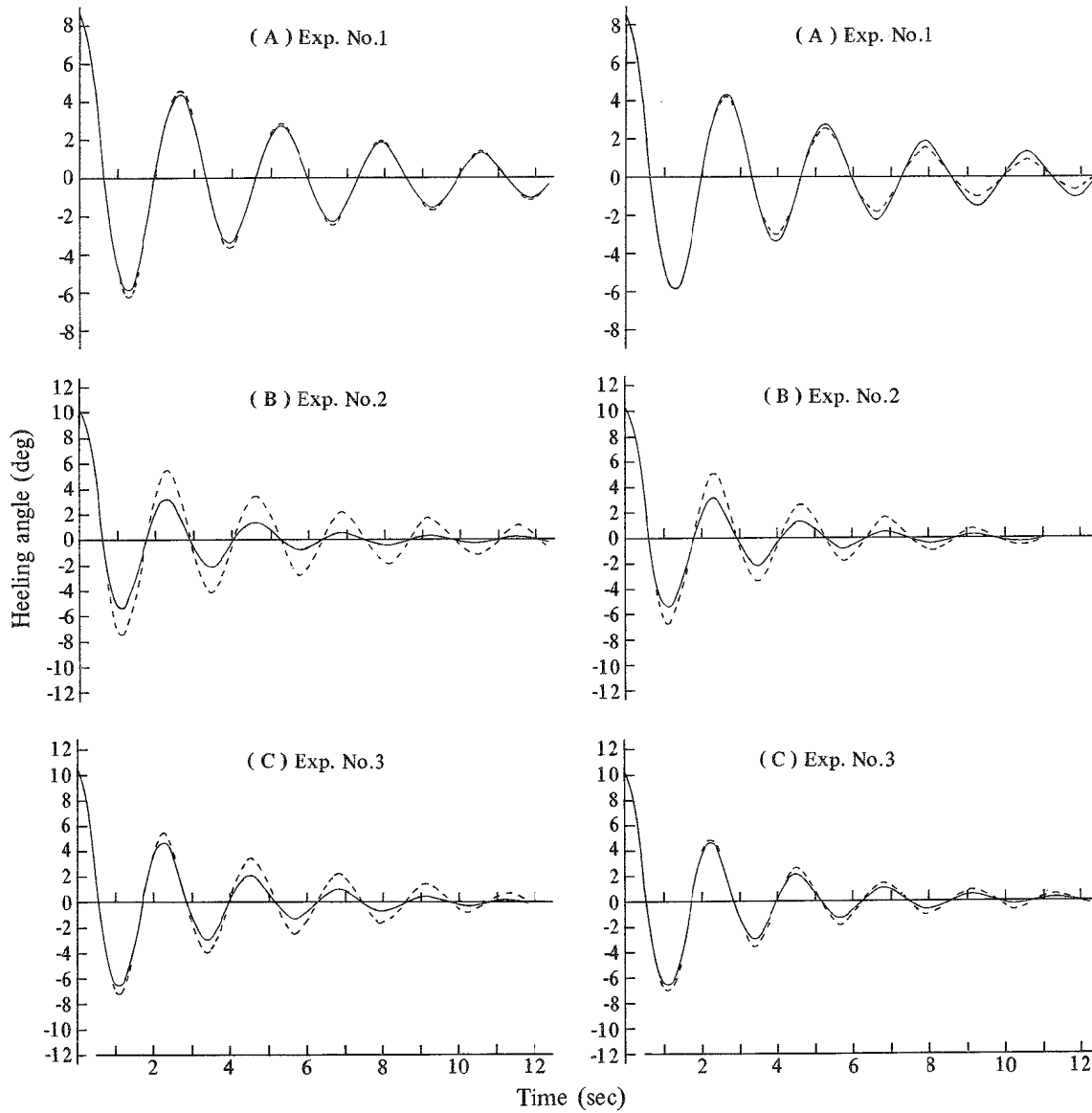


Fig. 7. Influence of oar and crew's damping effect on roll decay motion in still water.
Note is same showed in Fig. 6.

Fig. 8. Influence of oar's damping effect on roll decay motion in still water.
Note —: Observed value of each experiment
---: Non-linear calculated value obtained by using the \overline{GM} of each boat's condition and the extinction coefficient a, b obtained from Exp. No.4.

5. 結 論

この報告では、最も広範囲に使用されている9 m型カッターについて、復原性能の推定と、静水中における横動揺特性について実船実験を行ない検討を加えたが、その結果を要約すると次のようである。なお波浪中の動揺特性については次報にゆずりたい。

(1) カッターの空船状態における横動揺軸まわりの環動半径 r と船巾 B の間には、 $r = 0.39B$ の関係がある。また動揺周期 T_s とメタセンター高さ \overline{GM} の間には、 $T_s = 1.9/\sqrt{\overline{GM}}$ の関係がある。(m, sec 単位)

(2) 空船状態の \overline{GM} を基準にとれば、艇員がカッターの底にしゃがみ込んだ場合には、 \overline{GM} が約7%増加する。しかしそれ以外の姿勢の場合には艇員が乗艇することによって \overline{GM} が7~38%減少する。

(3) 空船状態の動揺減衰係数 a 、 b の値は、ほぼ $a = 0.1305$ 、 $b = 0.0239$ であるが、これらの値は他の一般船型の船の値に比べて約2倍の大きさである。またこれらの値は、艇員、オールの姿勢によって変化する。

(4) 艇員が乗艇している場合には、艇員による動揺ダンピング効果が認められ、この効果は艇員が座っているときより立っている場合の方が大きい。

(5) ブレードを水平にして水面につけているオールは、 \overline{GM} の増加に影響するだけでなく、動揺減衰抵抗として作用し、減衰を早める効果は大きい。

(6) 動揺試験から得た係数 a 、 b を用いると、カッターの静水中における動揺は、(1)式にて十分な精度で近似推定することができる。

文 献

- 1) 日本航海学会, 1973: 船舶の荒天運航に関するシンポジウムテキスト, 1~26.
- 2) 日本造船学会, 1969: 耐航性に関するシンポジウムテキスト, 1~52.
- 3) 山内保文, 1961: 船の波浪中動揺応答の解析法について(その1), 造船協会論文集, 109, 169~183.
- 4) 加藤 弘, 1951: 小型航洋船の復原性について, 造船協会会報, 83, 95~107.

List of symbols

\overline{KB}	:	Hight of the center of buoyancy above the keel
\overline{KM}	:	Hight of the transvers metacenter above the keel
\overline{GM}	:	Metacentric hight
\overline{GZ}	:	Righting arm $\overline{GZ} = f(\theta) \doteq \overline{GM} \theta + a\theta^3$ $a > 0$
W	:	Displacement
B	:	Breadth moulded
r	:	The virtual radius of gyration about longitudinal axis through the center of gravity
$I, \Delta I$:	Virtual moment of inertia and its increased amount
M_r	:	Resisted moment of roll
T_s	:	Natural period of roll
T_w	:	Period of wave

ω_o, ω	: Circular frequency of roll and wave	$\omega_o = 2\pi / T_s,$	$\omega = 2\pi / T_w$
k_1	: Coefficient of resistance proportional to the angular velocity		
k_2	: Coefficient of resistance proportional to the square of the angular velocity		
g	: Acceleration due to gravity		
θ	: Heeling angle		
$\Delta\theta$: The decrements of roll		
θ_m	: Mean amplitude of oscillation		
a, b	: W. FROUDE'S extinction coefficient		
φ	: Surface wave slope		
γ	: Coefficient of effective wave slope		
Φ	: Maximum wave slope		