

(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

船体運動に対する附加質量および附加慣性 モーメントについて

—その 4 縦揺れに対する附加慣性モーメント—

正員 元 良 誠 三*

On the Measurement of Added Mass and Added Moment of Inertia for ship Motions
(Part 4. Pitching motion)

By Seizo Matora, *Member*

Abstract

In this paper, the author states about the results of measurement of added moment of inertia and damping coefficient about y axis, i. e. for pitching motion.

A forced oscillation method same as was used by Golovato was employed for measuring device, and 14 series models varying C_b and L/B are used.

As the added moment of inertia and the damping of pitching motion vary with the frequency of the motion, values of them corresponding to the natural pitching frequency are chosen as the typical values when discussing the effect of ship forms.

A chart from which additional moment of inertia and damping coefficient of ships having arbitrary C_b , L/B and d/B can be obtained is proposed in this paper.

§1 測定方法

縦揺れに対する附加慣性モーメントは当然周期運動に対するもの $-J_y'$ であり、周期によつて変化する。縦揺れは減衰が大きく横揺れの場合のように自由動揺の周期から附加慣性モーメントを求めるのは困難なので強制動揺法を採用した。すなわち Fig. 1 のごとく模型の重心点をボールベアリングでささえ、船首に検力計を固着し、検力計を介して一定振幅で上下に正弦運動をするロッドにより船を縦揺せしめ、船の運動、強制力および相互の位相差を測る。

検力計により測られた強制モーメントを M

強制モーメントと船の運動の位相差を ε

縦揺れの角変位を ϕ

見掛けの慣性モーメントを $I_y + J_y'$

減衰係数を N_p

縦の GM を GM_t

強制外力の円周波数を ω

とすると運動方程式は

$$(I_y + J_y')\ddot{\phi} + N_p\dot{\phi} + WGN_t\phi = M \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (1)$$

となるから、船の運動を

$$\phi \cos \omega t$$

$$(2)$$

とすると (1) および (2) 式より

原稿受付 昭和 35 年 1 月 10 日

* 東京大学工学部

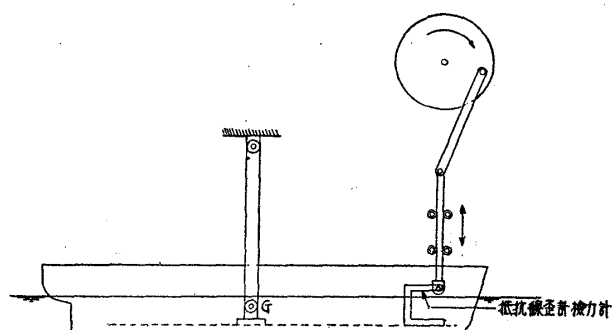


Fig. 1

$$\left. \begin{aligned} I_y + J_{y'} &= \frac{1}{\omega^2} \left(WGM_t - \frac{M \cos \varepsilon}{\phi} \right) \\ N_p &= \frac{M \sin \varepsilon}{\phi \cdot \omega} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

として見掛けの慣性モーメントおよび減衰係数を求めることができる。

一方船自体の慣性モーメント I_y は、船を剛性の判つているピアノ線で縦に吊り、振動周期を測ることにより求めることができるから附加慣性モーメント $J_{y'}$ を求めることができるわけである。

§2 装置および記録

上述の方法で測定を行なうため、広範囲の周期で強制動揺を与え得る装置を作成し、Fig. 2 のごとく set した。特に留意した点は、一定周期を保つためモーターを大馬力にしたことおよびメカニズムの遊びを極力少なくしたことである。周波数範囲は 0.1~20 の間にとることができる。検力計としては Canti-lever に貼付した抵抗線歪計を用い、陸上の Oscillograph で記録した。

船の運動と強制力の位相差は強制装置の回転 disc につ

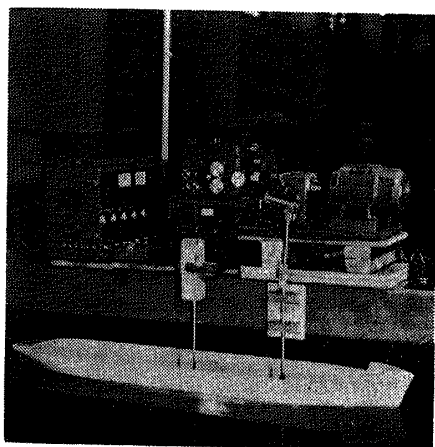


Fig. 2

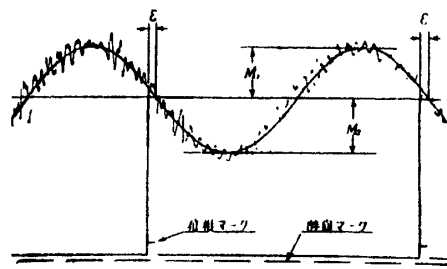


Fig. 3

けた接点装置により Oscillogram の中にマークを入れることにより求めた。

Fig. 3 は記録の一例である。記録中の短周期の振動は主として装置を支えるガーダーの振動である。

測定は主として静止中について行なつたが、前進速度の影響を調べるために数ケースについては装置全体を電車の上に乗せて航走中の実験を行なつた。

§3 記録の解析および表示

測定は各船型につき周波数 2~10 の間で約 10 点宛行ない、得られた強制モーメントの振幅 M 、位相差 ε を Fig. 4 のごとく周波数 base に plot して大体異常な値の無いことを確かめた後附加慣性モーメント $J_{y'}$ および減衰係数 N_p を求めた。Fig. 4 および Fig. 5 は B_0 模型船で喫水を 5.4 cm にしたときの例である。

このようにして得られた附加慣性モーメントおよび減衰係数はその儘では船の大きさが入って来て比較し難いので次のごとく無次元表示を行なうことにした。

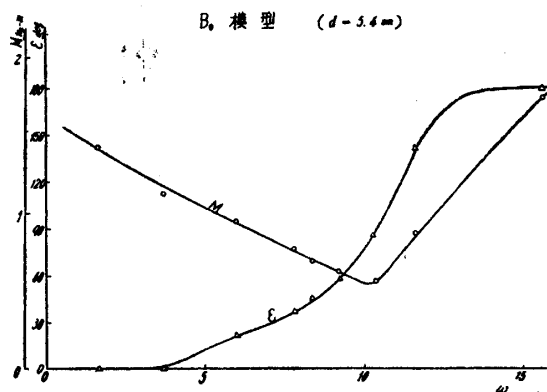


Fig. 4

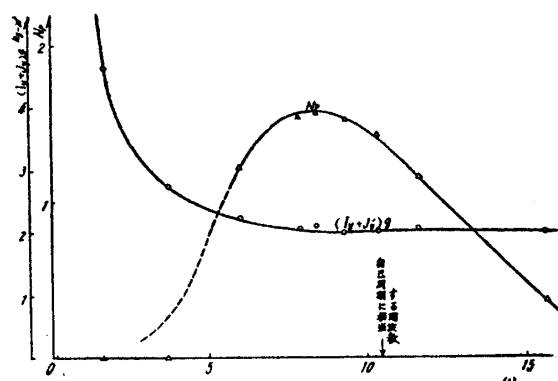


Fig. 5

$$\text{附加環動半径 } (K_y'/L \text{ で表示}) \quad K_y' = \sqrt{\frac{I_y' g}{W}} \quad (4)$$

$$\text{無次元減衰係数} \quad N_p' = \frac{N_p \sqrt{g \cdot L}}{W L^2} \quad (5)$$

$$\text{無次元周波数} \quad \omega' = \omega \sqrt{\frac{B}{g}} \quad (6)$$

Fig. 5 の例を上記のごとく無次元表示すると Fig. 6 のごとくなる。 K_y'/L および N_p' はともに周波数により変化しその傾向はいずれの船型についても Fig. 6 と大同小異であり、唯最大または最小を生ずる周波数、あるいは最大、最小の値が異なっている。各船型に対するこれらの曲線を全部掲げることは紙数が許さないので代表

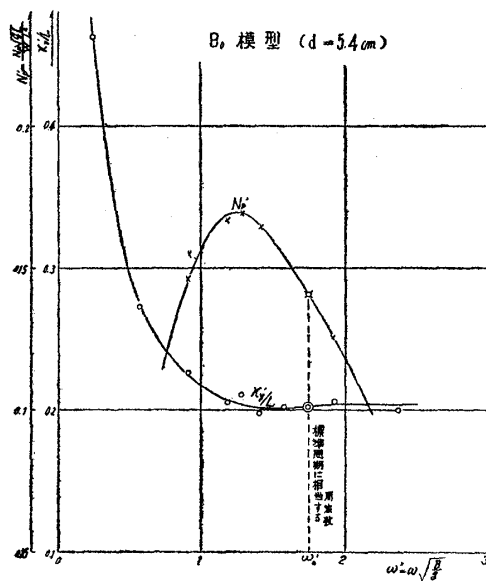


Fig. 6

的な値を取って船型の影響を論じること考える。

Fig. 7 は船 B_0 型に対する K_y'/L および N_p' の値を $L=145\text{m}$ に対する周波数を base として plot したものであるが、今この船の縦揺に対する magnification factor を次の 4 つの場合について求めて見る。

- (1) 附加質量を全然算入しない場合。
- (2) K_y'/L および N_p' を ω の函数とした場合。
- (3) 自己周期に対する K_y'/L および N_p' の値を用いた場合。
- (4) N_p' のみ ω の函数とし、 K_y'/L は自己周期に対する値を用いた場合。

計算結果を周波数 base に plot すると Fig. 8 のごとくなり、附加質量を全然算入しない (1) だけは非常に異なった値になっているが、(2), (3), (4), 特に (2) と (4) とはほとんど差が無いと云つてよく、したがって自己周期に対する附加慣性モーメントあるいは減衰係数を代表的な値として差支え無いことを示している。

また (1)~(4) の magnification factor を有する 145m の船に、風速 40km の風による完全発達した Neumann Spectrum を有する波が正面から当たつたとしてそのときの平均縦揺角を求めて見ると次表のごとくなる。

	(1)	(2)	(3)	(4)
平均縦揺角	1.297°	1.066°	1.092°	1.102°

これより見ても自己周期に対する附加慣性モーメントおよび減衰の値を代表値として取ることが妥当であると考えられる。

以上の考えから、得られた K_y'/L および N_p' の値は一応 ω' base に plot した後、自己周期に相当する ω' に対する値を読み取って代表値として採用した。なお自己周期は船自体の環動半径を $L/4$ と仮定して算出した

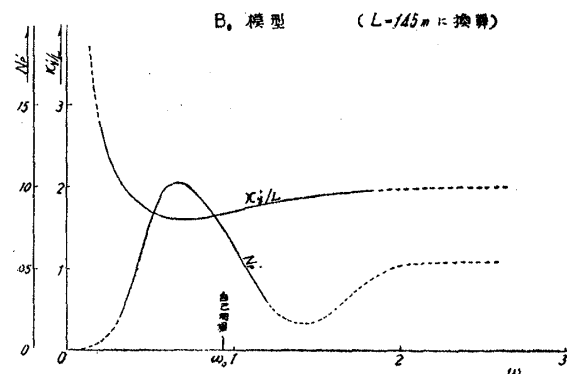


Fig. 7

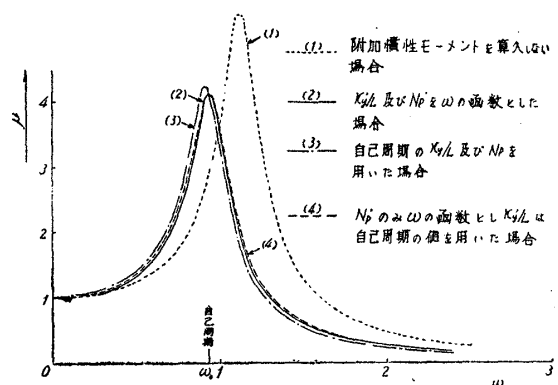


Fig. 8

ものを使用した。

§4 計測結果

各船型につき周波数を変化させて求めた附加慣性モーメントおよび減衰係数から代表値として自己周期に対する値を取つて船型の影響を比較すると次のごとくなる。

(1) C_b の影響

Fig.9 に示すごとく、 C_b が大きくなると附加環動半径は急激に増加し、船自体の環動半径を $L/4$ とすれば、 $L/B=5$, $C_b=0.8$ で大体附加慣性モーメントと船自体の慣性モーメントが等しくなり、それより C_b の小さいものおよび幅の狭いものでは附加慣性モーメントは小さくなる。

減衰係数は Fig.10 に示すごとく C_b により余り変化しない。

(2) B/L の影響

Fig.11 に示すごとく、幅が増すと附加環動半径は略々 B/L に比例して増加する。したがつて幅の広い船は比較的自己周期が短くなるわけである。減衰係数もまた Fig.12 に示すごとく略々 B/L に比例して増加する。

(3) 喫水 (d/B) の影響

喫水を変化させると、 K_y'/L は Fig.13 に示すごとく d/B の増加とともに減少する。また減衰係数も Fig.14 に示すごとく d/B の増加とともに減少する。これは田才助教授が2次元体について理論的に求めた結果⁽¹⁾と同

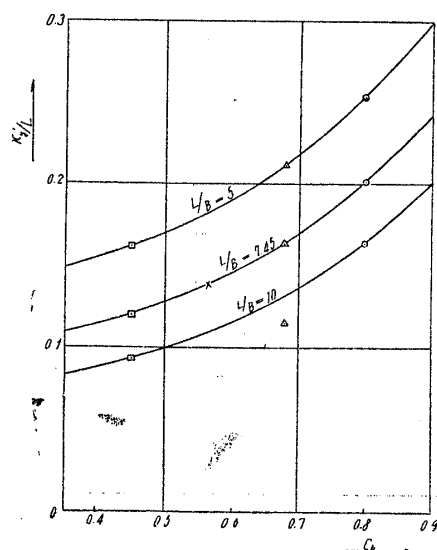


Fig. 9

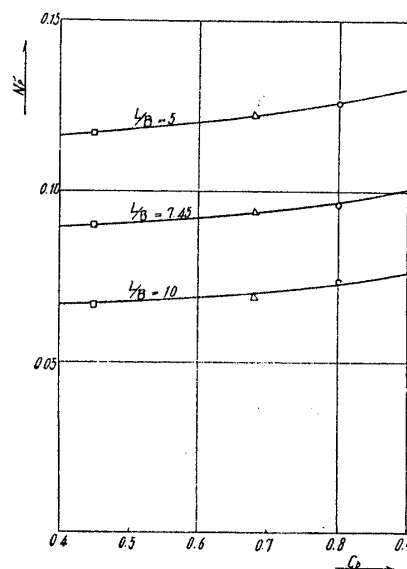


Fig. 10

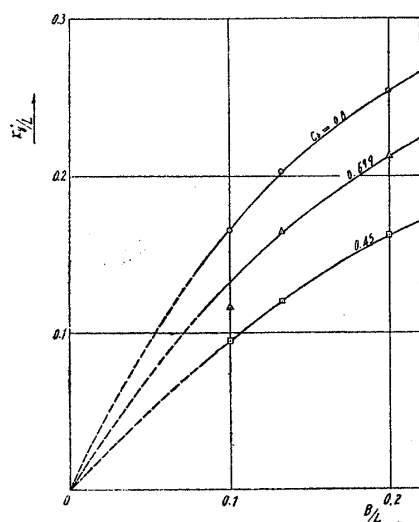


Fig. 11

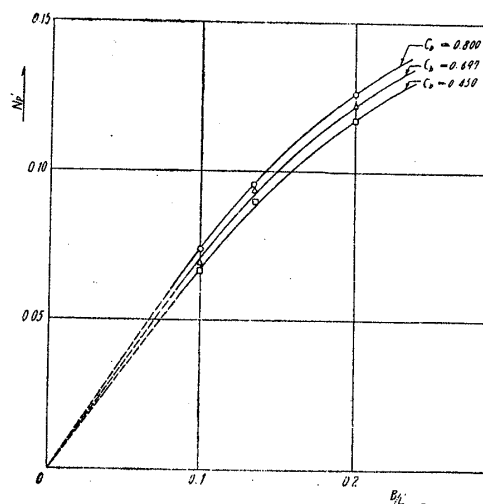


Fig. 12

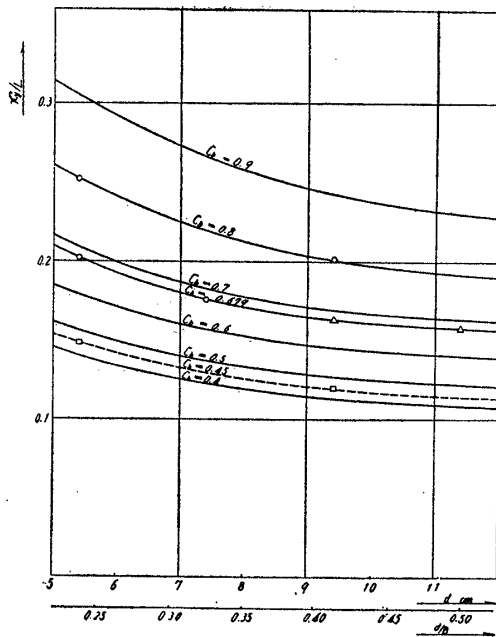


Fig. 13

Pitching の標準周期に対する附加環動半径の値

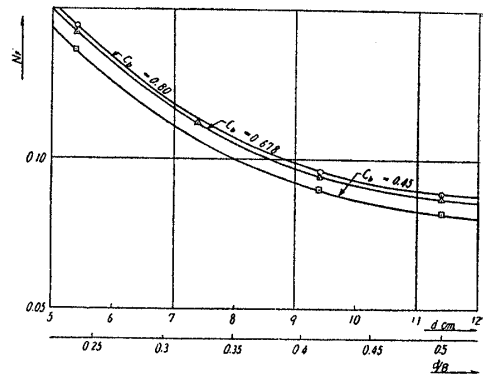


Fig. 14

Pitching の標準周期に対する減衰係数の値

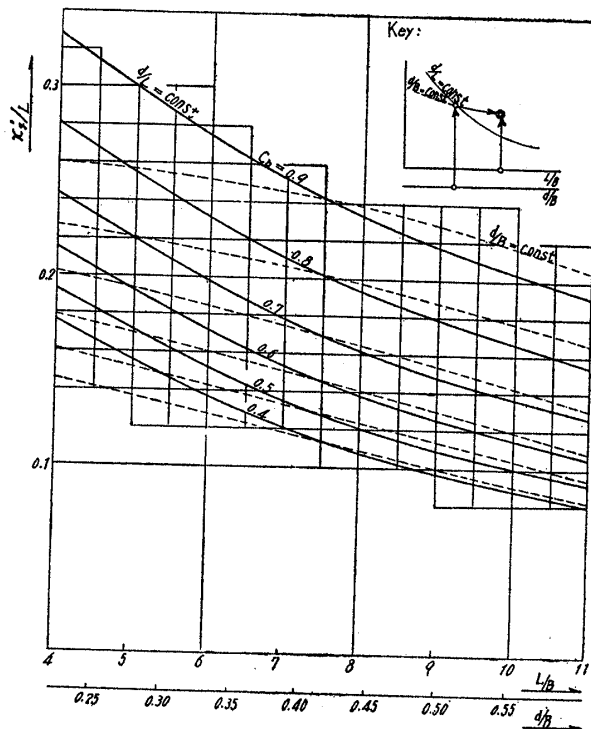


Fig. 15

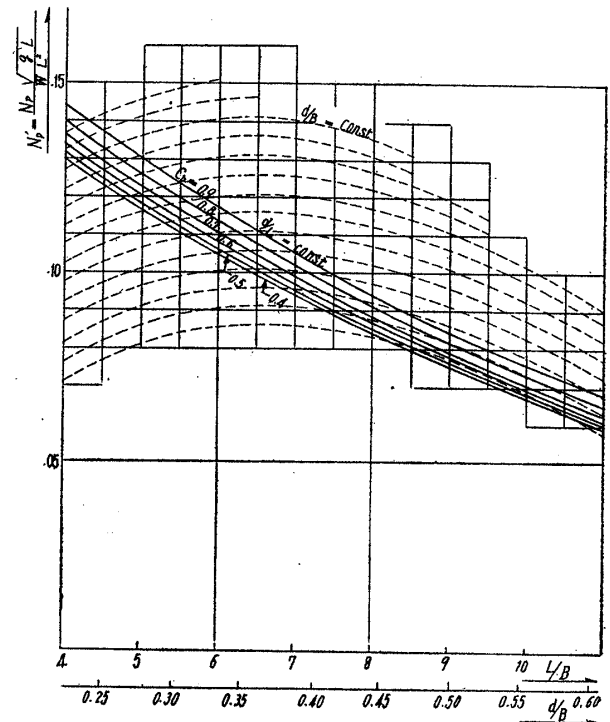


Fig. 16

一傾向である。これより浅喫水の船は比較的自己周期が短く、減衰が大きいことが判る。

(4) 任意の C_b , L/B , d/B に対する値

以上の結果を総合して任意の C_b , L/B , d/B に対する K_y'/L および N_p' の値を求める chart を作ると Fig. 15 および Fig. 16 のごとくなる。図表の使い方は第2, 第3報と同様である。

5) frame line の影響

以上の結果は国川丸を母型とする系統模型船に対するもので frame line は U 型と V 型の中間である。

frame line が違つたらどの程度の差を生じるかを見るため, F_0 (前半 V 型, 後半 V 型), $F_1(U, -U)$, F_{11}

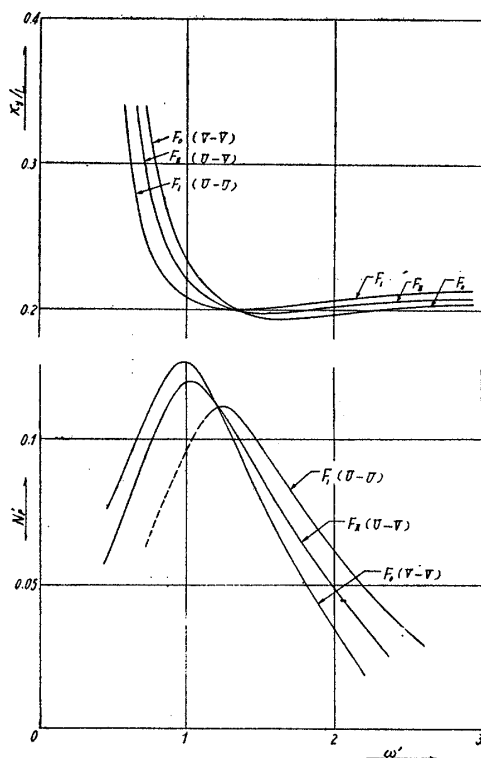


Fig. 17

よりかなり低いのでこの臨界速度附近の変化は実用上さして問題にならない。

Gerritsma⁽⁴⁾ が $C_b=0.6$ の船につき航走中に行なつた実験結果と本論文の結果とを比べて見ると Fig. 18 のごとくなり、本論文の静止中の値は航走中の値よりやや小さ目に出ている。これを自己周期に対する周波数の附

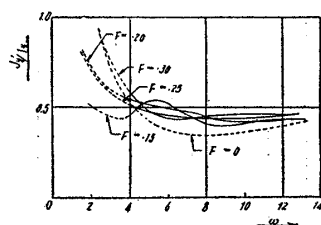


Fig. 18

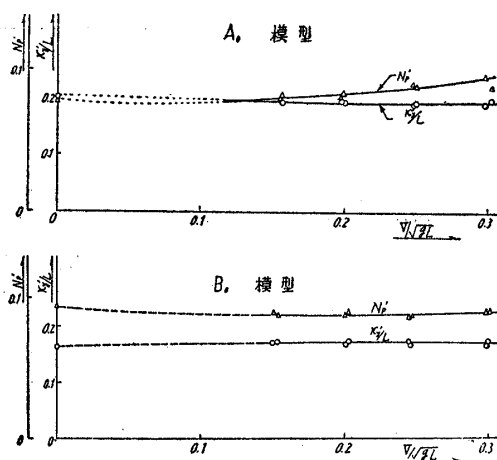


Fig. 20

N_p' を求めると Fig. 20 のごとくなる。Fig. 20 は紙数の関係で A_0 模型の例だけを掲げてあるが、傾向はいずれの船型もほとんど同じで、 K_y/L は速度によりほとんど変化せず、減衰は速度が大きくなるとわずかに増加する。したがって附加慣性モーメントについては速度影響は省略できると考えられる。

($V, -U$) の 3 船型 (何れも $C_b=0.756$) について K_y/L および N_p' を求めて見た。その結果は Fig. 17 のごとく多少の差を生じたがその差は余り大きくなく、系統模型船で求めた値は大体平均的な値と見てよさそうである。

(6) 前進速度の影響

以上の計測は総て船が静止している場合について行われたものであり、船が前進速度を持つと当然変化することが予想される。船が pitching で起こした波を丁度追い越す速度になると附加慣性モーメント、減衰ともに急激な変化をすることが知られて居り、その臨界速度は山本助教授⁽²⁾、Brard⁽³⁾ 等によれば

$$4V\omega = g$$

である。ただし V は前進速度である。

種々の周波数に対する臨界速度を求めて見ると次表のごとくなる。

ω	T sec	V critical (m/sec)	$V/\sqrt{gL}$ ($L=145m$ として)
0.5	12.57	4.90	.130
1	6.28	2.45	.0652
1.5	4.18	1.634	.0433
2	3.14	1.225	.0325
4	1.57	.612	.0162

上表より自己周期に近い周期では、臨界速度は実用の船速より

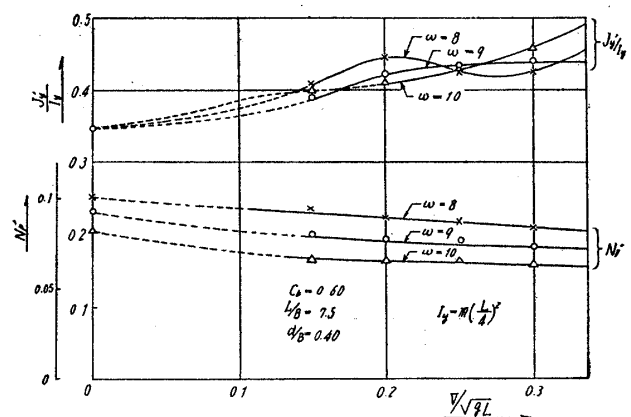


Fig. 19

近、 $\omega=8, 9$ および 10 について速度 base に plot して見ると Fig. 19 のごとくなり附加慣性モーメントは前進速度とともに少しずつ増加し、減衰係数は少しずつ減少するような傾向を示している。しかしながら Gerritsma の用いた模型と本論文で用いた模型では船型が多少異なるので厳密な比較にはならない。

そこで各模型について自己周期に対する周波数で pitching をさせつつ種々の速度で航走せしめて K_y/L および

§5 自由動揺により求めた附加慣性モーメントとの比較

縦揺に対する減衰は横揺の場合に比べて非常に大きいから、自由動揺は直ぐに減衰してしまい、減衰曲線から附加慣性モーメントおよび減衰係数を求めることは極めて困難である。しかし揺れ初めから3揺れ位までは角度も周期も精度は悪い乍ら取ることができる。Fig. 21 は B_0 船型に対する減衰曲線の一例で、Fig. 22 は減衰角曲線である。

Fig. 22 より減衰は縦揺角に対し linear でないことが判るが、小角度の部分を取つて対数減衰を求め、それより無次元の減衰係数 N_p' を求めて、強制動揺法による値と比較すると

自由動揺より

$$N_p' = .0825 \sim .1032 \text{ 平均 } .0927$$

強制動揺より $N_p' = .0940$

となり、自由動揺でも数多く行なつて平均を取れば割合によい値を得ることが判る。

つぎに附加慣性モーメントについては運動の非定常部分を考慮して次の3つの case について周期を測り、上記の減衰係数を用いて附加慣性モーメントおよび附加環動半径を求めて見る。

- (1) 最初の半揺れの時間の2倍を周期として取る。
- (2) 最初の1揺れの周期を取る。
- (3) 第2、第3揺れの平均周期を取る。

	自由動揺より求めた K_y'/L	強制法による K_y'/L
(1)	.226	.160
(2)	.174	
(3)	.154	

これより見て初めの半揺れは攪乱されない水中を動くので加速度抵抗が大きく、したがつて附加慣性モーメントは大きい。つぎの半揺れ以降では大体定常運動のときと同程度の附加慣性モーメントが加わる（この場合造波抵抗は負になる）ことが判り、自由動揺でも最初の半揺れを捨てれば割合よい値が得られると考えられる。

参考文献

- (1) 田才福造 船の上下動揺並びに縦動揺における減衰および附加質量について 造船協会論文集 105号
- (2) 山本善之 周期運動を行う没水体について 同上 77号
- (3) Brard, R. Introduction à l'étude theorique du tangage en marche. ATMA, 1948 ((4)参照)
- (4) Gerritsma J. Experimental determination of damping, added mass, and added moment of inertia of a ship model. Int. Ship. Progress. Vol. 4, 1957

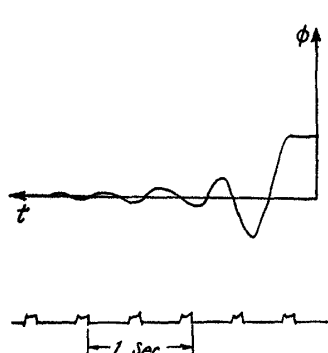


Fig. 21

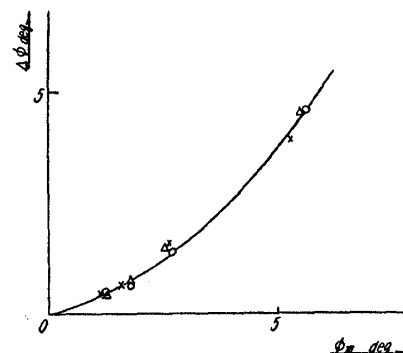


Fig. 22