

船体運動に対する附加質量及び附加慣性

モーメントについて

—其の 1. 旋回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.

By Seizo Motora, Member

Abstract

The Author has been conducting experiments to measure the added mass and added moment of inertia of ship forms for the motions through six kinds of freedom, i. e., translations to x , y , and z direction, and rotations about x , y , and z axis.

In this paper the Author states about the results of measurement of added moment of inertia about z axis, which were obtained by an impact method properly devised for this purpose.

Effect of the free surface upon the added mass and diference between added masses for translation to one direction and for oscillatory motion were also discussed in this paper.

緒 言

船の様に、ある物体が流体の浮力で重力と平衡しつつ運動する際には、見掛質量効果が大きく働いて、空気中の物体の運動とかなり異つた性質をもつ事はよく知られている。

著者は前論文 [1] で見掛質量効果を考慮した一般運動方程式を求めたが、その基礎となる船体に対する見掛質量の値を実際に測定した例は案外少く、船型の影響等は殆ど知られていないと云つても過言ではない。

著者は見掛質量効果の重要性を考えて、系統的模型船について 6 個の自由度に対する附加質量の値を測定することを企劃し、本論文では先ず旋回、即ち z 軸の周りの回転に対する附加質量の値を求めて見た。なお本論文では物体の質量を含めたものを見掛質量、増加分だけを附加質量と呼ぶことにする。

§ 1. 附加質量の定義及び自由表面の影響

船の運動に対する運動方程式を作るに当つては、その 6 つの自由度に対する附加慣性の値と性質を知らねばならない。

著者は先に論文 [1] において附加質量には種々の定義があつて、例えば

空気中* の慣性力 $m\dot{v}$ と水中の慣性力 $(m+m_i)\dot{v}$ の相異より定義される附加質量 m_1 。

” の振動周期 $2\pi\sqrt{m/k}$ と水中の振動周期 $2\pi\sqrt{(m+m')/k}$ の相異より定義される附加質量 m' 。

” の運動量 mv と水中の運動量 $(m+m'')v$ の相異より定義される附加質量 m'' 。

” の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ と水中の運動エネルギー $\frac{1}{2}(m+m''')v^2$ の相異より定義される附加質量 m''' 。

等から夫々附加質量が定義されるが、これらは粘性及び自由表面がある時は必ずしも等しくないこと、及び非定常運動に対する運動方程式の質量の項には慣性力より定義された附加質量 m_1 を用うべきであることを述べた。

今回船型に対する附加質量を測定するに当つて、その方法等に関連してもう一度この定義を検討して見る必要がある。論文 [1] でも述べた様に、これらの定義を異にする附加質量は、自由表面の無い理想流体ではすべて一致する筈であるから、先ず最も影響の大きい自由表面の影響から考えて見る。

1.2

水中にある物体を一方向に加速した時の附加質量に対する自由表面の影響は自由表面に対する物体の逆鏡像の影響に等しいことが知られている。[2], [3] 即ち自由表面の無い時の附加質量を m_0 、自由表面のある時のを m_1 とすれば

原稿受付 昭和 34 年 1 月 10 日

* 東京大学工学部

* 厳密には真空中

$$m_1 - m_0 = \text{逆鏡像効果} = -\text{鏡像効果} \quad (1)$$

であり、物体には $m_1 \ddot{x}$ なる見掛の慣性抵抗を生じる。

この時の自由表面の条件は、速度ポテンシャル ϕ に対して、

$$t=0 \text{ で } \phi=0 \quad (2)$$

となる。(これは任意の速度に対し、近似的に成立する。)

次に物体を今加速したと同じ方向に定常的に振動させたとする、物体には今の $m_1 \ddot{x}$ なる慣性抵抗の外に造波の為の抵抗及び自分の作った波とある位相でぶつかる為の抵抗を生じる。この抵抗を物体の速度と同じ位相を有するものと、変位と同じ位相を有するものとに分けて

$$R = K_1 \dot{x} + K_2 x \quad (3)$$

とすると、運動方程式は

$$(m + m_1) \ddot{x} + K_1 \dot{x} + (k + K_2)x = f \cos \omega t \quad (4)$$

という形になり見掛上剛性が増加したかのような結果となるが、定常運動であるから $\ddot{x} = -\omega^2 x$ の関係で、見掛の剛性の変化は又考えようでは見掛の慣性の変化とも考えられ、質量が

$$m + m_1 - \frac{K_2}{\omega^2} \quad (5)$$

となつたと考えても運動が説明出来る。即ちこの場合、物体の周期を計算するのに $T = 2\pi\sqrt{(m_1 + m)/k}$ としたのでは実験と合わないのであつて

$$T = 2\pi\sqrt{(m + m_1 - K_2/\omega^2)/k} \quad (6)$$

としなければならない。

しかし乍ら、この物体を定常状態から更に非定常的に加速する時の慣性抵抗はやはり $(m + m_1) \ddot{x}$ であつて $(m + m_1 - K_2/\omega^2) \ddot{x}$ ではない点は注意を要する。

$$\text{いま } m_1 - K_2/\omega^2 = m' \quad (7)$$

として、 m_1 と m' との関連を調べて見る。

定常的に振動する物体による速度ポテンシャルの自由表面における条件は、周波数を ω 、鉛直上方を z として

$$\phi = \frac{g}{\omega^2} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (8)$$

であるから、

(1) 周波数が重力の加速度に比して極めて大きい時は

$$\phi = 0 \quad (9)$$

となり (2) 式の非定常加速の場合の自由表面条件と等しい。[2], [3], [4], [5]。従つてこの時の自由表面の影響は逆鏡像効果となる。即ち

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} m' = m_1 = m_0 + \text{逆鏡像効果} \quad (10)$$

(2) 周波数が g に較べて極めて小さい場合、即ち極めてゆるやかな振動の場合には、(8) 式の左辺は右辺に較べて省略出来るから

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

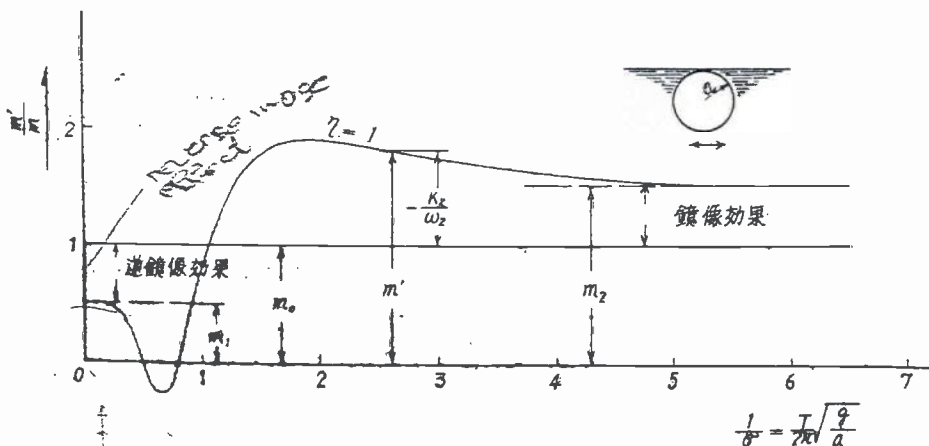


Fig. 1 円嚙の周期運動に対する見掛質量

が自由表面条件となる。即ちこの場合は、自由表面は固体壁の作用をなし、その影響は鏡像効果となる。

[6]

即ち

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} m' = m_2 = m_0 + \text{鏡像効果} = m_1 + 2 \times \text{鏡像効果}$$

となる。

(3) この間の有限の ω に対しては、自由表面の影

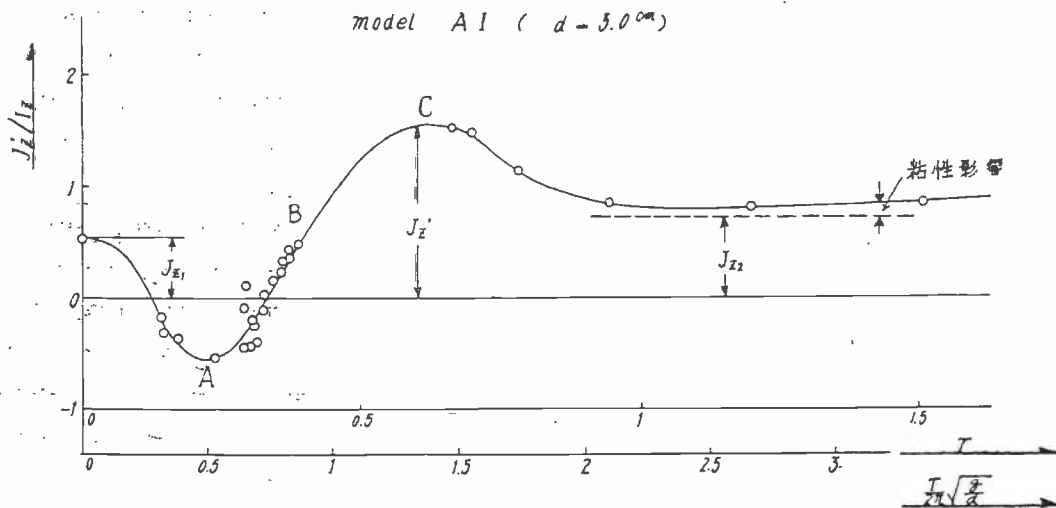


Fig. 2 yawing に対する附加慣性モーメント J_z' の実測値

響は極めて複雑であることが、山本助教授 [3] が没水円壩及び球について行つた計算によつて示されている。Fig. 1 は同氏の円壩に対する計算結果で、種々の周期に対する m' の値を示す。base は周期を無次元化したものである。T=0 では逆鏡像効果により自由表面の無い時の値より小さく、周期が大きくなるに従つて見掛質量は一旦 m_1 より減じ、次に増加して m_0 より大きくなり、最後に周期が無限に大きくなると m_2 に一致する。

Fig. 2 は船の垂直軸の周りの見掛の慣性モーメントを船に固着した鋼棒の振り振動の周期より求めたものであるが、Fig. 1 と同じような傾向を示している。base は周期を無次元化したもので d は吃水である。

J_z' はこの様に周期によつて変化するが、非定常な加速に対する慣性力には J_{z1} のみしか効かないことが、この実験の記録によく現われている。即ち Fig. 2 の C に相当する部分、即ち $J_z' > J_{z1}$ の部分では、Fig. 3 (a) の如く振動の最初の半揺れは未だ波の立つていない静水中を動くので船は J_{z1} に相当する周期で揺れるが、次から波の影響を受けて見掛の慣性は J_z' となり、周期は著しく延長するのが認められる。これに反し、Fig. 2 の A に当る部分では $J_z' < J_{z1}$ であるため、Fig. 3 (b) の如く前と全く逆になつている。

J_z' が Fig. 2 の如く周期によつて変化する結果、バネの剛性を変えた時の yawing の周期は Fig. 4 の如く複雑な変化をし、ある所では同じバネで2つの周期が存在する様になり Fig. 4 の (1) が Fig. 2 の A~B に相当し、(2) が B~C に相当する。然し (2) は不安定で (1) の方が現われ易い。

§ 2. 各自由度の船体運動に対して取るべき附加質量の値

Fig. 5 は base に無次元の周期を取り、前述の円壩に対する附加質量の計算値、Fig. 2 の z 軸の周りの附加慣性モーメントの実測値、及び Gerritsma [7] が heaving 及び pitching について求めた見掛質量の値を plot したもので、山、谷の位置に多少のずれはあるが、傾向は大體一致している。図中船体の rolling に対す

$J_z' > J_{z1}$

$J_z' < J_{z1}$ の場合

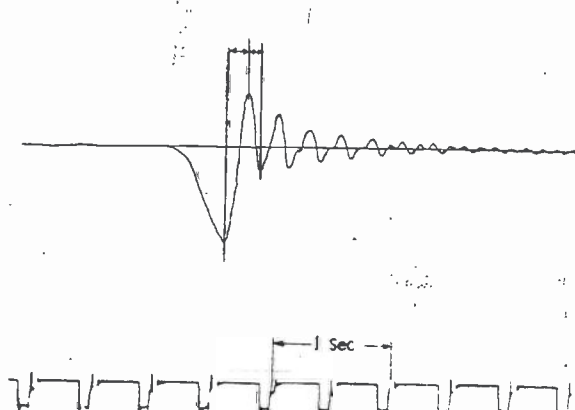
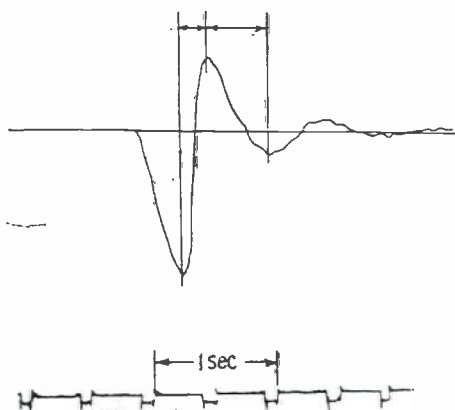


Fig. 3 (a) $J_z' > J_{z1}$ の場合の振動記録.

Fig. 3 (b) $J_z' < J_{z1}$ の場合の振動記録

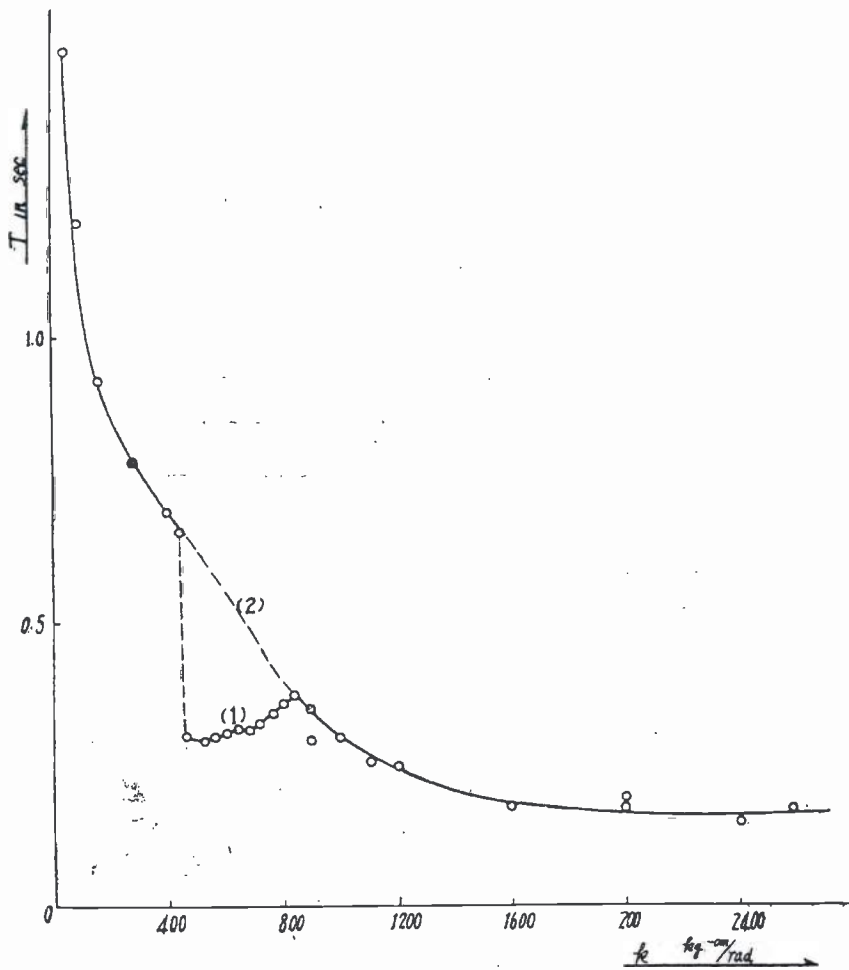


Fig. 4 パネの剛性を変えた場合の yawing の周期の変化
 ず意味を持たせて Table 1 の如く記号をつける。

【い】ずれの自由度に対しても厳密に云えば、運動方程式の慣性項に入れるのは m_1 又は J_1 であつて m' 又は J' ではない筈であるが、rolling の様に自己周期附近の運動が顕著に現われるものでは、初めから慣性項に J_2' を入れておいた方が便利なものもある。又 heaving, pitching 等の様に自己周期を有するが減衰が大きいので rolling 程自己周期の周りの運動は顕著でないものでは自己周期に相当する m' 及至 J' を用いるのも一方法であるが、また不規則な波による動揺は衝撃の連続であるという観点からは m_1 及び J_1 を用いた方が合理的だとも考えられる。

る自己周期, pitching 及び heaving に対する自己周期, 及び船体の撓み振動に対する大体の周期の範囲を記入すると、図のハッチの分ようになる。

先ず船体の撓み振動は2節でも3節でも極めて周期が短いから、自由表面の影響は逆鏡像効果と考えてよく、附加質量として m_1 及至 J_1 を用いる事が出来る。論文[8],[9],[10]等はすべてこの見地から取扱われている。

ところが剛体運動に対しては図に示す如く周期はかなりの範囲に亘り、 m' 及至 J' を用いるのと m_1 及至 J_1 を用いるのとでは非常に大きな差を生じる。rolling に至つては周期の長いものはむしろ J_2 の方に近いものすらある。そこで各自由度につき、どの附加質量を取つたら最も運動を表現するのに便利であるかを考えて見る必要がある。先ず船に固定した座標を Fig. 6 の如く取り、夫々の軸に対する附加質量及び慣性モーメントを夫々 Fig. 1 に示

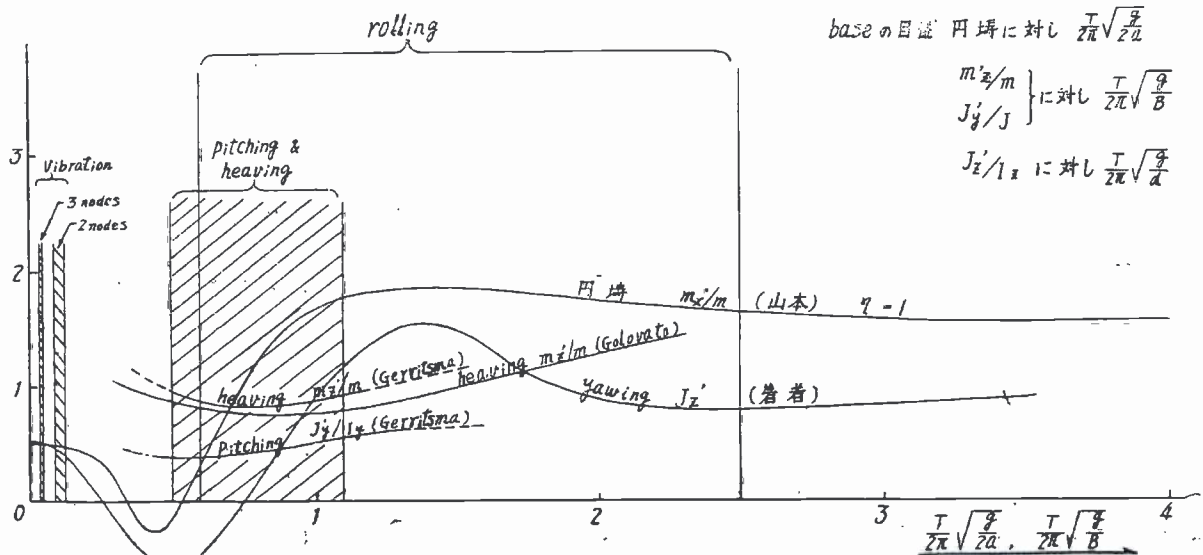


Fig. 5 周期による見掛質量の変化と船体運動の周期範囲

Table 1 附加質量

	自由表面の無い時	慣性より定義されるもの	任意周期に対するもの	周期無限大に対するもの
x 軸	m_{x0}	m_{x1}	m_x'	m_{x2}
y 軸	m_{y0}	m_{y1}	m_y'	m_{y2}
z 軸	m_{z0}	m_{z1}	m_z'	m_{z2}
附加慣性モーメント				
x 軸	J_{x0}	J_{x1}	J_x'	J_{x2}
y 軸	J_{y0}	J_{y1}	J_y'	J_{y2}
z 軸	J_{z0}	J_{z1}	J_z'	J_{z2}

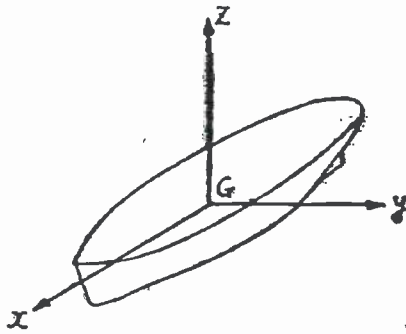


Fig. 6

Table 2

		復原力	減衰	附加慣性/船の慣性	自己周期	運動方程式に採用すべき附加質量の種類	衝撃及び不規則波の場合
x 軸	移行	無	小	小	無	m_{x1}	
	回転	小	小	小	有(長)	J_x'	(J_{x1})
y 軸	移行	無	大	大	無	m_{y1}	
	回転	大	大	大	有(短)	J_y'	J_{y1}
z 軸	移行	大	大	大	有(短)	m_z'	m_{z1}
	回転	無	大	大	無	J_{z1}	

以上を考えて採用すべき見掛質量の種類として Table 2 の如く定める。

rolling の場合は $I_x \gg J_{x1}$, J_x' であるため、 J_x' を J_{x1} の代りに用いても大過ないが pitching 及び heaving では J_x' を用いるのと J_{x1} を用いるのでかなりの相異を生じるから注意すべきである。

§ 3. 附加質量の測定法

本論文の目的である z 軸の回転に対する附加質量の測定には次の方法が考えられる。

(1) 振動法、適当な剛性の棒で船の重心を固定し、棒の振りにより yawing を起さしめ、その周期 T_w を測り、同様のことを空気中で行つて周期 T_a を測れば、

$$I_z + J_z' / I_z = (T_w / T_a)^2$$

が求められ、一方 2 本吊等の方法で船の慣性モーメント I_z を求めれば J_z' が求められる。

棒の径を変えれば任意の周期に対する J_z' が求められるが極めて長い周期に対する J_z' 、即ち J_{z2} は測定容易であるが極めて短い周期に対する J_z' 、即ち J_{z1} を求めようとすると、減衰及び固着等の問題で困難を生じる。

結局振動法は J_{z1} を求める方法としては適当でない。

(2) 加速法

Fig. 7 の如く、船に滑車を固定し紐を介して重錘をかけてモーメントを与え、船体を stopper で止めて置く。

船内に磁歪等、高感度、高周波数の加速度計を装備しておき、stopper を外した瞬間の加速度をオシログラフで記録する。滑車の半径を r 、weight の重さ w 、加速度を $\ddot{\theta}_0$ とすると、

$$\left(I_z + J_{z1} + 2r^2 \frac{w}{g} \right) \ddot{\theta}_0 = 2wr$$

より $I_z + J_{z1}$ が求められる。

最初この方法を主力にするつもりであつたが、test の結果は記録に磁歪管をバネとする振動系の振動が大きく混入して $\ddot{\theta}_0$ を十分な精度で測ることが出来なかつた。然しこの方法は、充分減衰の効いた抵抗線歪計型の加速度計等を用いれば成功の可能性はありそうである。

(3) 衝撃法

最後に考えた方法は衝撃によつて生ずる船の初速を測つて、運動量保存の法則を用いて J_{z1} を求める方法である。

Fig. 8(a) の如く振子を α の角度迄振上げて放し、鉛直下で

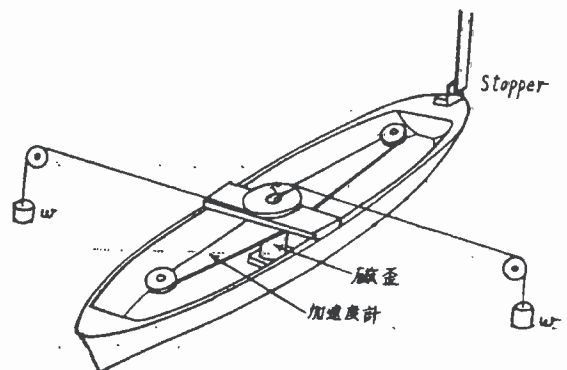


Fig. 7

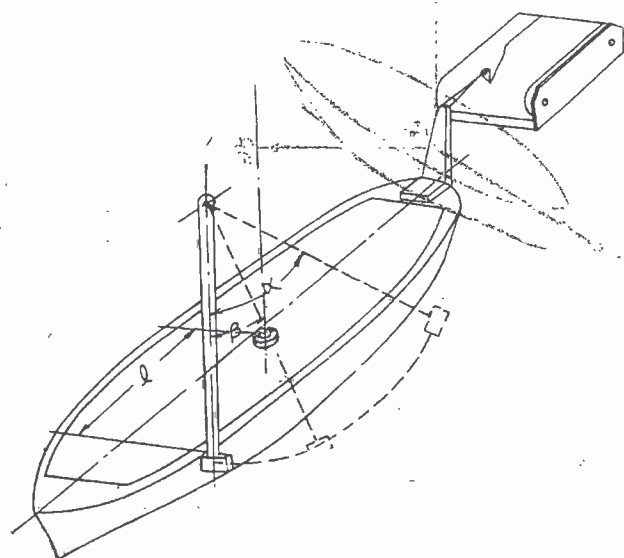
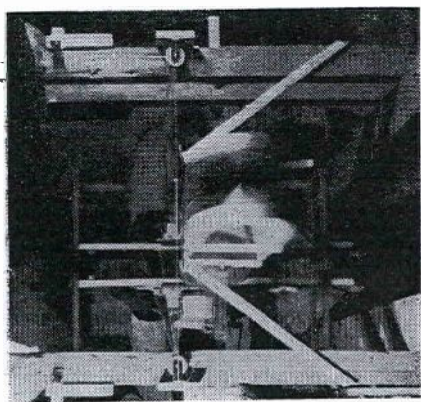


Fig. 8 (a)

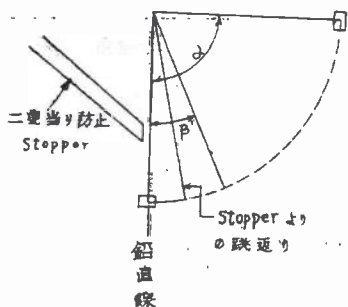


Fig. 8 (b)

船の重心より l だけ距つた所の側面を衝撃するものとする。

- 振子の跳返り角 β ,
- 振子の重さ w
- 支点より重心迄の長さ l_p
- 慣動半径 κ_p

- 船の初速 $\dot{\theta}_0$
- 船の重量 W
- 慣性モーメント I_z
- 重心より打撃位置迄の距離 l

とすると、振子は $\dot{\alpha} = \sqrt{2gl_p(1-\cos\alpha)}/\kappa_p$ なる角速度より $\dot{\beta} = -\sqrt{2gl_p(1-\cos\beta)}/\kappa_p$ なる角速度に変化するから支点から l_p の点での impact の総量は

$$\frac{I_p}{g}(\dot{\alpha} - \dot{\beta}) \frac{l}{l_p} = \frac{w}{g} \kappa_p^2 \frac{l}{l_p} (\dot{\alpha} - \dot{\beta})$$

である。一方船はこの衝撃モーメントによつて

$$\dot{\theta}_0(I_z + J_{z1})/g$$

なる運動量変化を生じるからこれを等置して

$$I_z + J_{z1} = w\kappa_p^2 l (\dot{\alpha} - \dot{\beta}) / l_p \cdot \dot{\theta}_0$$

として $I_z + J_{z1}$ が求められる。問題は α, β 及び $\dot{\theta}_0$ の測定

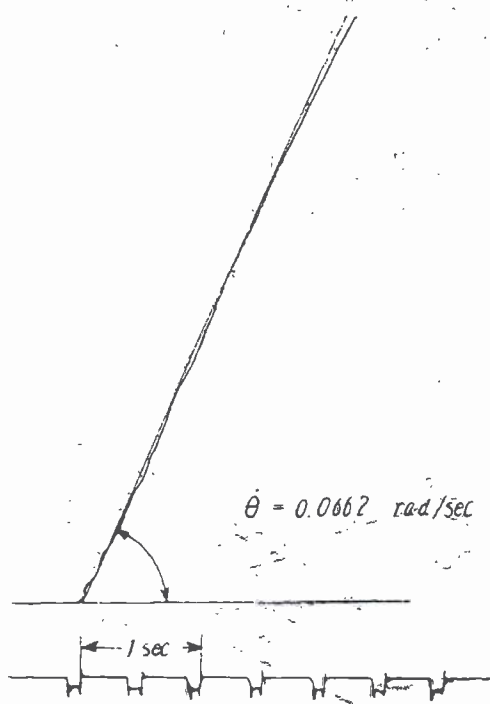


Fig. 9 (a) 衝撃法による速度記録 (空气中)

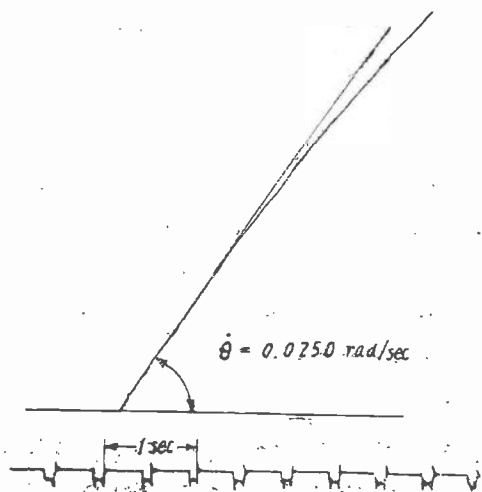


Fig. 9 (b) 衝撃法による速度記録 (水中)

であるが、 α 及び β は Fig. 8 (b) の如く長露出の写真によつて求められ、 θ_0 は船尾に附したペンによつて記録することが出来る。

θ_0 の記録の例が Fig. 9 に示してあるが、懸念された速度の減衰も初速を測るのに邪魔になる程でなく、かなりの精度で θ_0 を求めることが出来る。

なおこの方法の精度を確かめるため、後述の B_0 船型について、振子の振上げ高さを種々変えて空気中で衝撃によつて求めた I_z と、振動法により求めた I_z とを比較すると Table 3 の如くなる。

衝撃法の方がいつも少々大き目に出ているのは、振動等に多少運動量が散逸されるためであろう。然し今の目的には満足すべき精度であるので、今回はこの方法を採用した。

Table 3

l cm	40				
α deg	90.0	90.0	90.2	61.2	61.6
β deg	21.6	23.2	22.7	9.3	10.8
θ_0 rad/sce	0.0576	0.0578	0.0581	0.0355	0.0354
I_z kg-m ²	2.79	2.83	2.82	2.84	2.85
振動法による I_z kg-m ²	2.770				

§ 4. 計測に用いた模型

模型は国川丸 (145.0m×19.50m×12.20m, $d_m=8.03$ m, $\Delta=15,825$ t) を母型とし C_b を 4 種, L/B を 3 種変化せるもので、全部垂線間長 1,700m の木製ボディラック塗装である。要目は Table 4 に、また各 group の母型の正面図を Fig. 10 (a), (b), (c), (d) に示してある。

Table 4 模型要目表

	A			B			C	D			E
L_m	1.700										
d_m	0.093										
C_b	0.800			0.679			0.565	0.450			0.603
C_p	0.807			-0.682			0.599	0.555			0.613
C_{pr}	0.992			0.983			0.943	0.811			0.983
	A_0	A_I	A_{II}	B_0	B_I	B_{II}	C_0	D_0	D_I	D_{II}	E_0
B_m	0.2280	0.1700	0.3400	0.2280	0.1700	0.3400	0.2280	0.2280	0.1700	0.3400	0.2280
L/B	7.456	10	5	7.456	10	5	7.456	7.456	10	5	7.456
W kg	29.147	21.710	43.420	24.756	18.458	36.916	21.023	16.395	12.224	24.448	22.000
W/L^3	5.933	4.419	8.838	5.039	3.757	7.514	4.279	3.337	2.488	4.976	4.478
I_z kg-m ²	3.32	2.45	4.65	2.65	2.06	3.38	2.30	2.07	1.43	2.35	2.17
κ_z/L	.198	.197	.193	.192	.196	.178	.187	.209	.201	.183	.184

各船型間の C_b, C_p, C_{pr} 等の関係は山県博士 [11] の与えた関係 (Fig. 11) によつている。又 E 模型は B_0 を母型とし、極端に Cut-up を大きくしたもので、大きさの異なる dead wood を付すことにより、Cut-up の変化の影響を求める為に作られた模型である。

§ 5. J_{z1} の測定値

§ 4 の模型につき衝撃法で求めた J_{z1} の値を Fig. 12 及至 Fig. 16 に示す。

Fig. 12 は C_b の変化に伴う J_{z1} の変化で縦軸には J_{z1}/I_z が取つてある。然し乍ら I_z は重量の配置で変化す

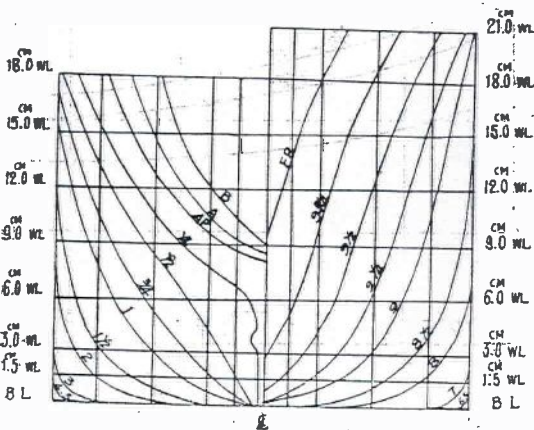


Fig. 10 (a) A_0 船型

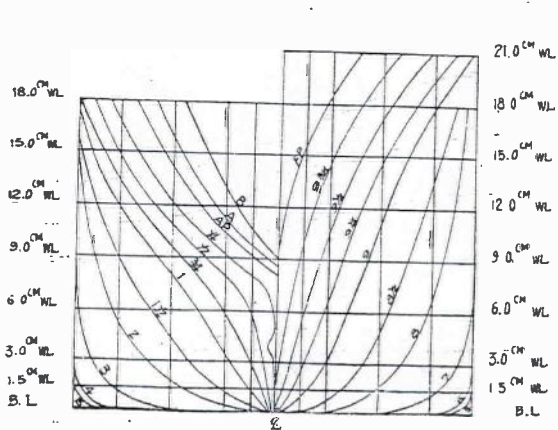


Fig. 10 (b) B_0 船型

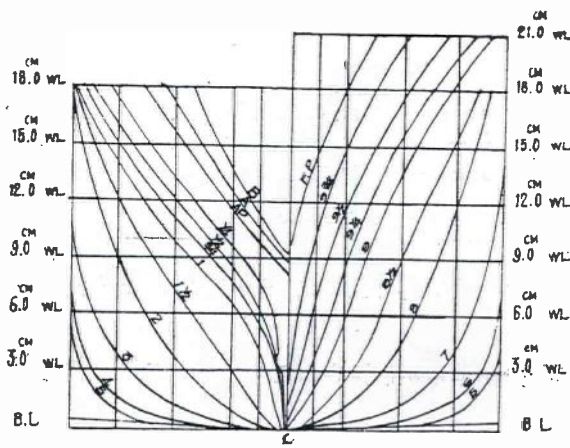


Fig. 10 (c) C₀ 船型

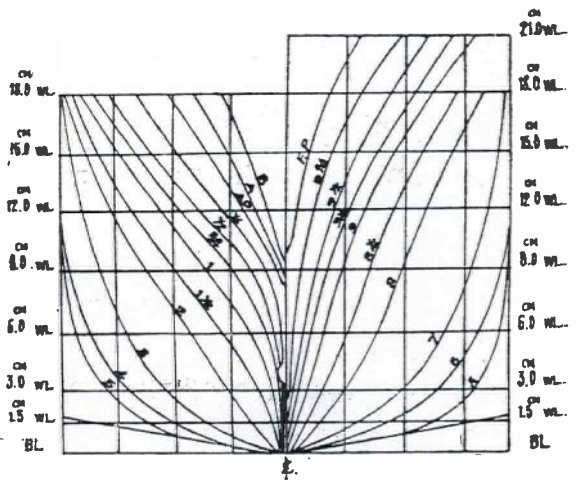


Fig. 10 (d) D₀ 船型

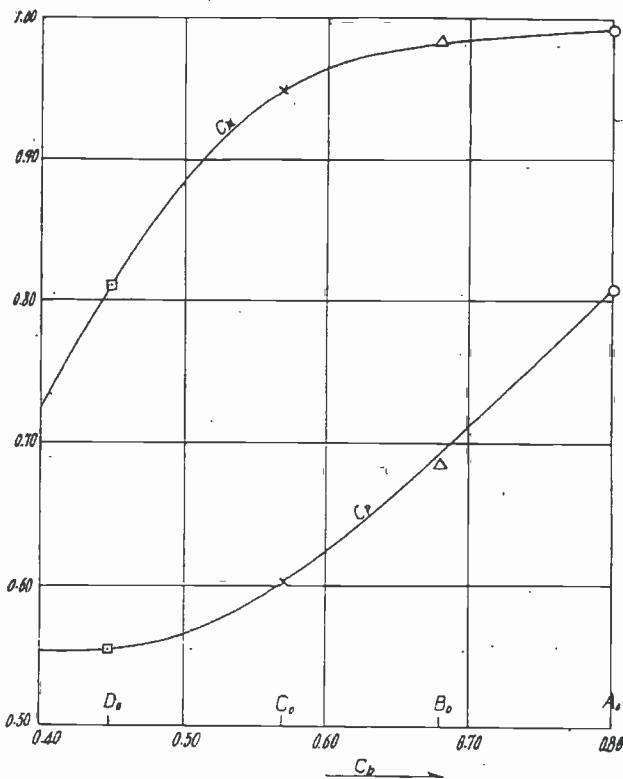


Fig. 11 模型船の C₀, C_p, C_B の関係

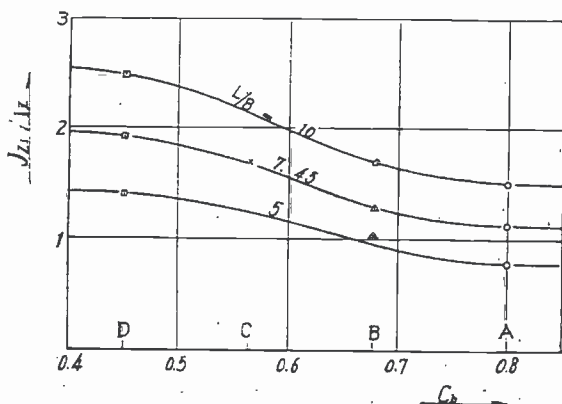


Fig. 12 附加慣性モーメントと船の慣性モーメントの比

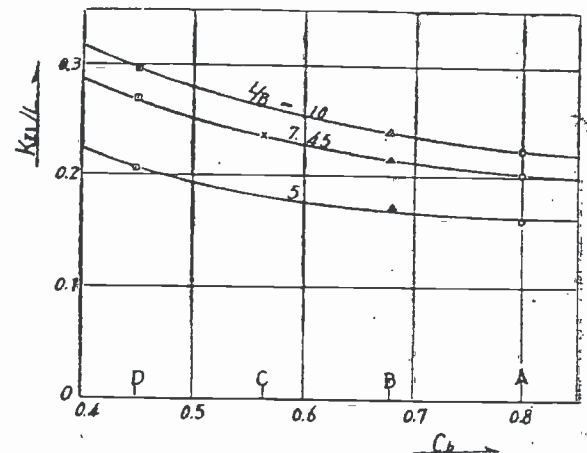


Fig. 13 C₀ の変化に伴う附加慣性モーメントの変化

るので J_{z1}/I_z で附加慣性モーメントを比較するのは余り適当でない。

Fig. 12はその意味で附加慣動半径 $\kappa_{z1} (\kappa_{z1} = \sqrt{J_{z1}/W})$ を取り、船長との比で表わしてある。図により船が着せて来ると附加慣性が増加することが判る。

J_{z1} は案外に大きい、その理由の一つは、前後の dead wood による加速が大きい為であろう。

Fig. 14 は L/B の変化に伴う κ_{z1}/L の変化の様で、 L/B が大きくなると附加慣動半径は増加する。然し $L/B = \infty$ の極限では船の center plane の形をした平板の J_{z1} に相当する筈であるから、何れの船型も一定値に収斂する傾向を持つ。また $L/B = 1$ では J_{z1} は 0 となる筈で各船型に対する曲線は $L/B = 1$ で 0 に集まる。

Fig. 15 は吃水を変化させた時の見掛の慣動半径の変化で、吃水が減ると附加慣性は急激に減少する。

今回の系統模型には L/d を変えた系統が無いが同一船型で吃水を変えた Fig. 15 により、大体の傾向は推察することが出来る。

Fig. 16 は Cut-up の変化に伴う附加慣性の変化で、E₀ 模型に 4 種類の dead wood を着けて実験したも

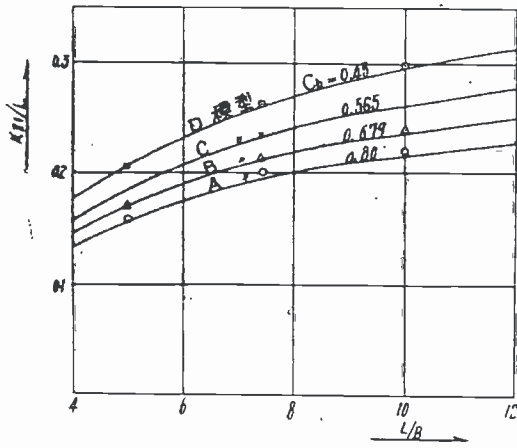


Fig. 14 L/B の変化に伴う附加慣性モーメントの変化.

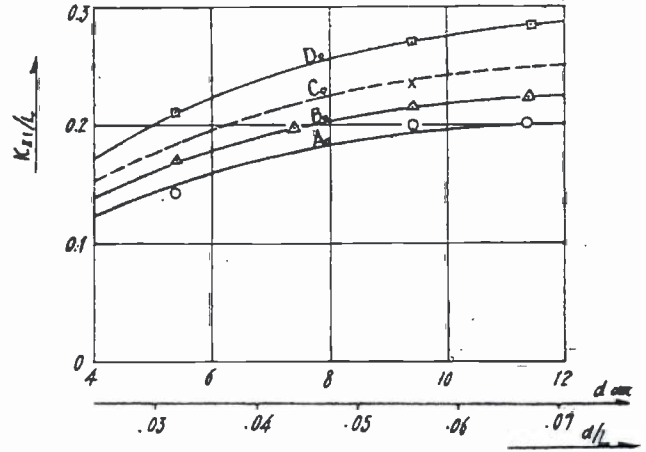


Fig. 15 吃水の変化に伴う附加慣性モーメント

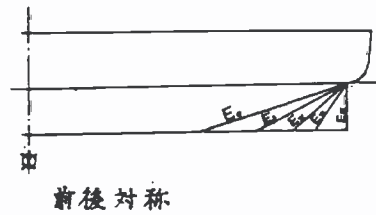
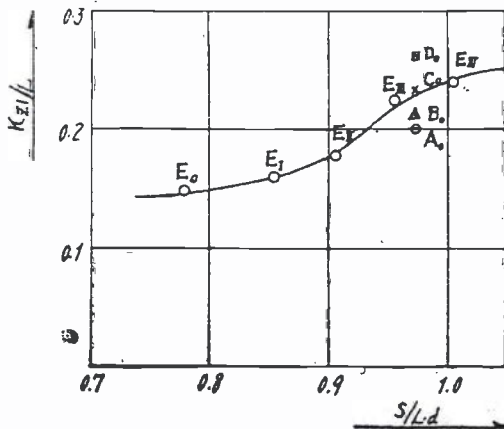


Fig. 16 Cut-up の変化に伴う附加慣性モーメントの変化

のである。Cut-up が少ないもの程附加慣性モーメントが大きくなる程度が Fig. 16 により推察出来る。

§ 6 J_{z2} の測定値

周期の長い方の極限值 J_{z2} は運動学上は余り重要ではないが、 J_{z1} との関連を見る上で多少の興味もあるので

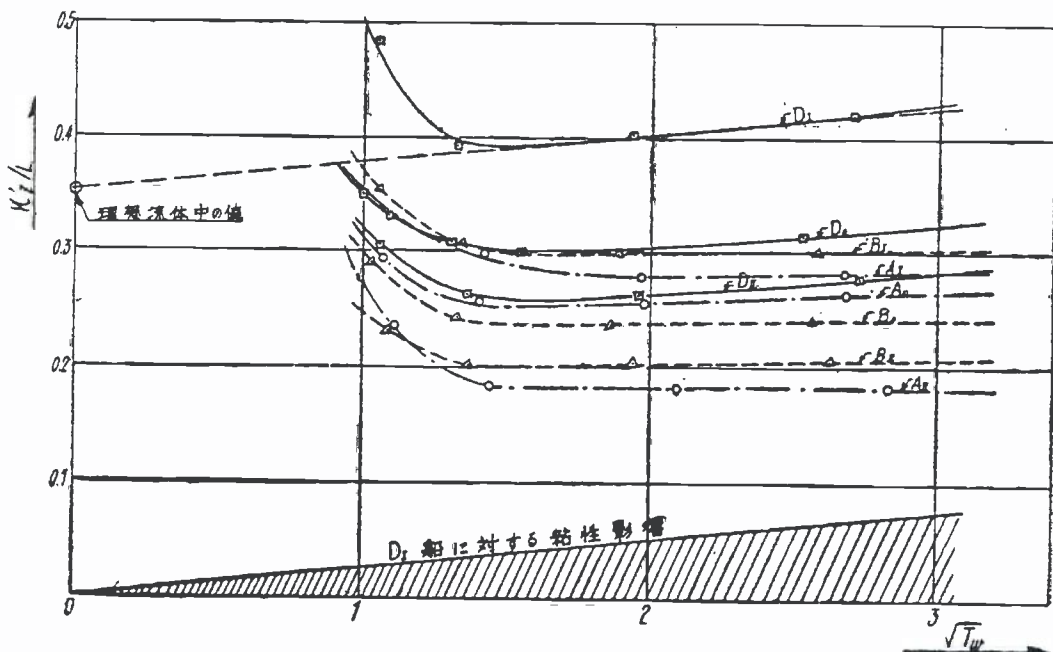


Fig. 17

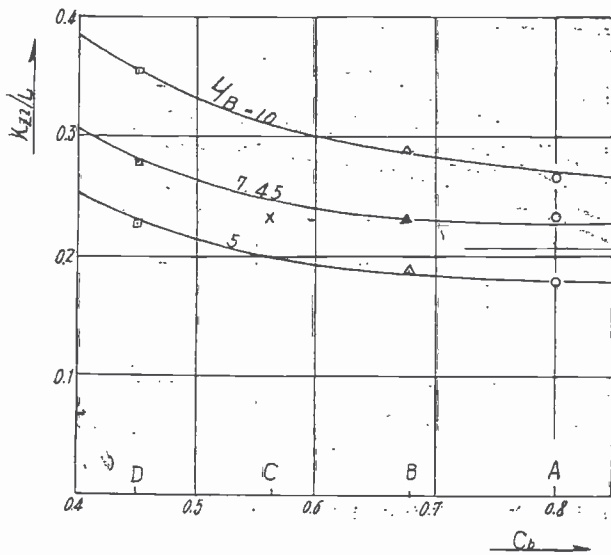


Fig. 18 極めて長周期の振動に対する
附加慣性モーメント

小さく、その差は鏡像効果×2になる筈であるが、その船型による変化の傾向迄は現在の精度では検討出来ない。

終りに臨み有益な助言を与えられた乾教授、三菱日本重工笠原協之氏並びに実験の遂行に尽力された東京大学動揺水槽の杉田松次氏以下職員諸氏及び水産大学宮崎芳夫氏に対し厚く御礼申上げる。

なお本研究は文部省科学試程研究費による研究の一環として行われたものである。

参考文献

- [1] 元良誠三 「見掛質量について」造船協会会報 第 87 号
- [2] 元良誠三 「見掛質量に対する自由表面の影響について」造船協会々報 第 86 号 (後編)
- [3] 山本善之 「周期運動を行う没水体について」造船協会々報 77 号
- [4] 山本善之 「見掛質量の定義と一般性質」雑纂 285 号
- [5] 磯部 孝 「見掛質量」応用物理 Vol. 17, No. 1~2, 3~4.
- [6] Weinblum G. Schiff und Haven 1951.
- [7] Gerritsma J. "Experimental Determination of Damping, Added Mass and Added Moment of Inertia of a Ship model Int. Ship. Progress. Vol. 4, No. 38.
- [8] Taylor J.L. "Some Hydrodynamical Inertia Coefficient" Philosophical Mag. 1930.
- [9] Lewis F.M. "The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Body" TSNAME 1929.
- [10] 熊井豊二 「船体振動における附加慣性力率について」造船協会論文集 104 号
- [11] 山県昌夫 「船型学」(抵抗編) p. 67 天然社
- [12] Stokes G.G. Hydrodynamics (Lamb) p. 944

求めて見た。

Fig. 17 は Fig. 2 の C より長い周期の部分で各船型について求めたもので、横軸には周期の平方根を取つてある。Stokes [12] が球について行つた近似計算及び磯部教授 [5] の実験では、粘性の影響は周期の平方根に比例することが知られているが実験 Fig. 17 でも周期の長い所では直線となり、 $\sqrt{T_w}=1.3$ 即ち 1.7 秒位の周期から短い所で表面波の為に急激に附加慣性が増加している。

従つて粘性の影響を除いた J_{x2} を求めるには Fig. 17 で D_I 船型で例を示す様に、直線部分を延長して、 $T=0$ の所の値を取ればよいわけである。

Fig. 18 はこうして求めた J_{x2} より附加慣動半径 k_{x2}/L を求めたもので、Fig. 13 に対応すべきものである。

Fig. 13 と Fig. 18 を較べると確かに Fig. 13 の方が

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 2 前後動に対する附加質量 —

正員 元 良 誠 三*

On the measurement of added mass and added moment of inertia for ship motions.

(Part 2. Added mass Abstract for the longitudinal motions.)

By Seizo Motora Member

Abstract

The Author describes in this paper the results of measurements of added mass for longitudinal motions. An impact method described in Part 1 was used for measuring device and the results are compared with the theoretical values for a prolate spheroid after Lamb. It was found that the ratio added mass to the mass of the ship m_{s1}/m increases when C_b of the ship becomes large, as well as when L/B of the ship increases.

本論文では前回に引続き、同じ系統模型船について前後動に対する付加質量を計測した。

x 軸方向の付加質量として必要なのは非定常運動に対するもの、すなわち m_{s1} である。したがってその測定も非定常な過程を用いなければならない。

§ 1. 測定方法

m_{s1} は大体 m の 4~8% 程度と考えられるので、 m_{s1} を $\pm 5\%$ の精度で測るためには見掛質量 $m+m_{s1}$ を 0.2~0.4% の精度で測る必要があり、かなり困難な測定である。

第一報と同じく振動法、加速法、衝撃法の 3 つにつき検討を行なつた末、衝撃法によることにした。

方法は第 1 報に述べたものとはほぼ同じで、衝撃を与えるものとしては振子を用い、Fig. 1 のごとく、鉛直より角 α だけ振上げて放し鉛直下で模型中心線を打撃する。

振子の跳返り角 β 船の初速 u_0 " の重さ w_P 船の重量 W " 支点より重心までの長さ l_G " 環動半径 K_P

とすると、

振子は $\dot{\alpha} = \sqrt{2gl_G(1-\cos\alpha)}/K_P$ なる角速度より $\dot{\beta} = -\sqrt{2gl_G(1-\cos\beta)}/K_P$

なる角速度に変化するから、支点から l_P の点で impact の総量は、

$$\frac{I_P}{g}(\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \frac{\cos^2\phi}{l_P} = \frac{w_P}{g} \frac{K_P^2}{l_P} (\dot{\alpha} + \dot{\beta}) \cos^2\phi = w_P \frac{K_P}{l_P} \sqrt{\frac{2l_G}{g}} (\sqrt{1-\cos\alpha} + \sqrt{1-\cos\beta}) \cos^2\phi \quad (1)$$

である。ただし ϕ は Fig. 1 に示す角度である。

一方船はこの衝撃力によつて

$$(m+m_{s1})u_0$$

なる運動量変化を生じるから、これを等置して

$$m+m_{s1} = \frac{w_P}{u_0} \frac{K_P}{l_P} \frac{2l_G}{g} (\sqrt{1-\cos\alpha} + \sqrt{1-\cos\beta}) \cos^2\phi \quad (2)$$

として見掛質量が求められる。

はじめ初速 u_0 を求める方法として、一定速度で送っている紙の上に船の動きをペンで書かせて、 $t=0$ のところの tangent より求める方法を探したが、精度が思わしくなかつたので、次のような方法を採用した。

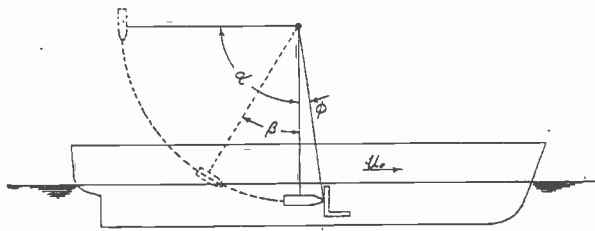


Fig. 1

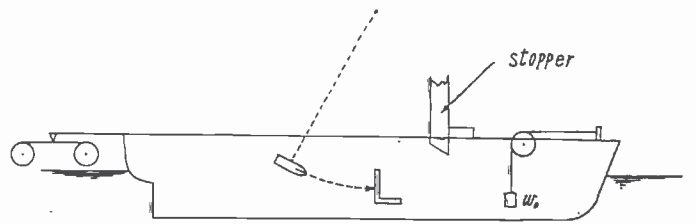


Fig. 2

すなわち、Fig. 2 に示すごとく、船首につけた紐を摩擦の極めて少ない滑車に掛けて先に w_0 なる重錘をつけて置く、

船は stopper により定位置より後に退らないように止められている。振子を α なる角度より離すと、船は衝撃を受けて u_0 なる初速で動き始めるが、 w_0 で常に後に引かれるので、初めに持っていた運動エネルギーと w_0 が上に引張り上げられるための位置のエネルギーの増加とが釣合う長さ h だけ動いて元に戻る。

したがって船の動いた距離、すなわち重錘の引張り上げられた高さを h とすれば

$$\frac{1}{2} \left(m + m_{x1} + \frac{w_0}{g} \right) u_0^2 = w_0 h + \delta E \tag{3}$$

ただし δE は船体の摩擦抵抗や滑車の摩擦のなす仕事である。

u_0 は (2) 式より

$$u_0 = \frac{w_P}{m + m_{x1} + w_0/g} \frac{K_P}{l_P} \sqrt{\frac{2l_G}{g}} (\sqrt{1 - \cos \alpha} + \sqrt{1 - \cos \beta}) \cos^2 \phi \tag{4}$$

(3) と (4) より

$$m + m_{x1} = \frac{w_P K^2 P l_G}{(w_0 h + \delta E) l_P^2 g} (\sqrt{1 - \cos \alpha} + \sqrt{1 - \cos \beta}) \cos^4 \phi - \frac{w_0}{g} \tag{5}$$

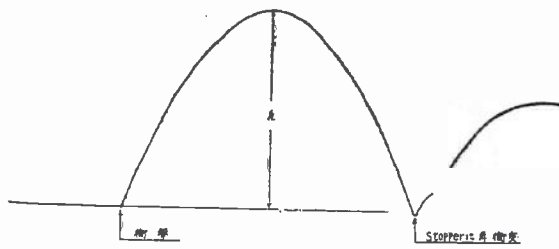


Fig. 3

として見掛質量が求められる。

問題は船体の摩擦抵抗で、これが w_0 に比べて余り大きければ、この方法は用いられない訳であるが検討の結果は w_0 の 0.4% 以下であることが判つたので、一船別に計算して注意して修正すれば問題ないことが判つた。Fig. 3 は船の動きの記録例で、これより h を充分の精度で読む事ができる。

§ 2. 空中における予備実験

この方法の精度を調べる意味で、船を2本のワイヤーで空中に吊り、実験に用いた同じ振子で衝撃して質量を測定した。

ワイヤーの長さを l 、impact を U 初速を u_0 とすると、

$$Ul = mu_0 l$$

$$m = \frac{U}{u_0} \tag{6}$$

U は振子の振上げ角度および跳返り角度より

u_0 は船の振れ止りの角度より求められる。

約 10 回の実験の結果は測定値と船の質量との比は正確に 1.0000 にならず 1.0031 となつたが、これは衝撃により振動を起し、そのため運動量がわずかに散逸されるためと考えられるので、後の水中の実験値はすべてこの比率だけの修正を加えた。

§ 3. 船体の摩擦抵抗による誤差の修正

船体の摩擦抵抗は仕事をするので重錘 w_0 の仕事 $w_0 h$ が幾分増加したような誤差を生じる。その仕事を δE とし初速 w_0 に対する摩擦抵抗を Rf_0 とすると、

$$\delta E = \frac{1}{2} Rf_0 h$$

となり、Weight w_0 が $\delta w = 1/2 Rf_0$ だけ増加したのと同じ誤差を生じる。

Blasius の公式を用いて C_f を計算して Rf を求めて見ると、 $\delta w/w_0$ は、最大、0.4% となつて無視出来ないで、一船別に計算して修正を行なつた。

§ 4. 測定結果

測定は先ず B_0 船型につき数 10 回行ない、測定値のバラツキ等確かめた上、各船型各々 10 回ずつ行なつて、振子の当り損いと判定されるものを除いて平均値を求めた。

これを L/B base に plot すると Fig. 4 のごとくなり、 m_{x1}/m は L/B が大きくなると増加することが判る。図中に Lamb の計算した回転楕円体、別所氏* の計算した乾教授の理論船型 S~201 および S~202 に対する値が Plot してあるが、回転楕円体と L/B の変化に対する傾向がやや異なるのは、回転楕円体が d/B が一定であるのに対し、模型船では、 d 一定で B を変化しているため d/B が変化しているからである。このことは、また後に述べる。

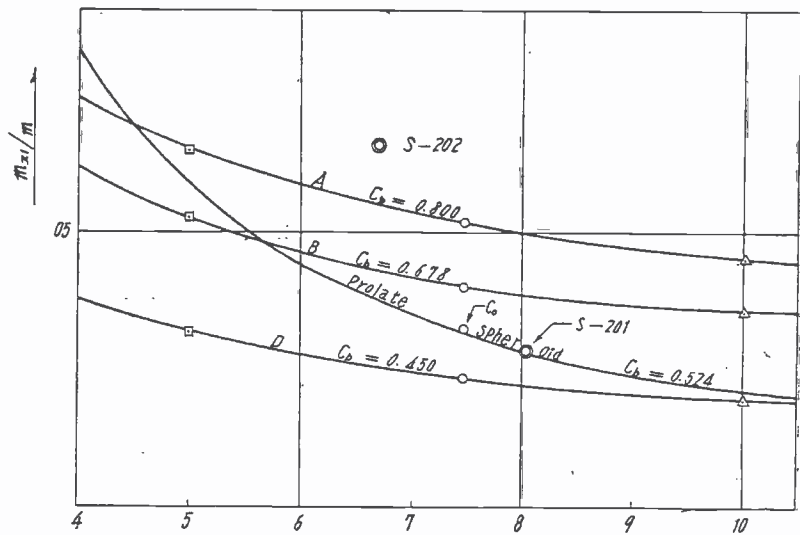


Fig. 4

Fig. 5 は C_b base に Plot したもので、 C_b が大きくなると附加質量は増加する。

Fig. 6 は B_0 船型につき、喫水を変化せしめて、 d/B を変えたときの附加質量の変化で、大体 d/B に比例しており、一方図中の回転楕円体 $d/B=0.5$ と楕円体 $d/B=0.25$ も亦ほとんど d/B に比例していることから、 m_{x1} は d/B に略々比例すると考えられる。

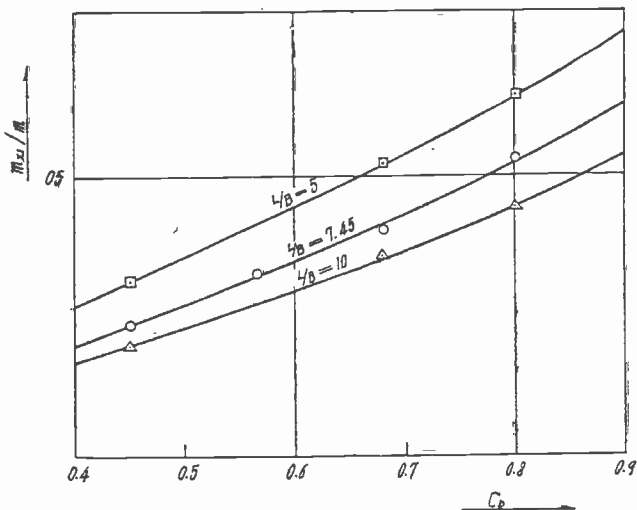


Fig. 5

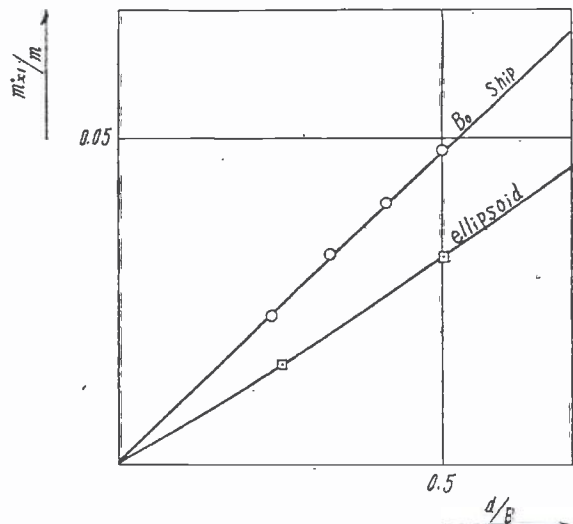


Fig. 6

* 別所正利 “没水体の造波抵抗について” 造船協会論文集 99 号

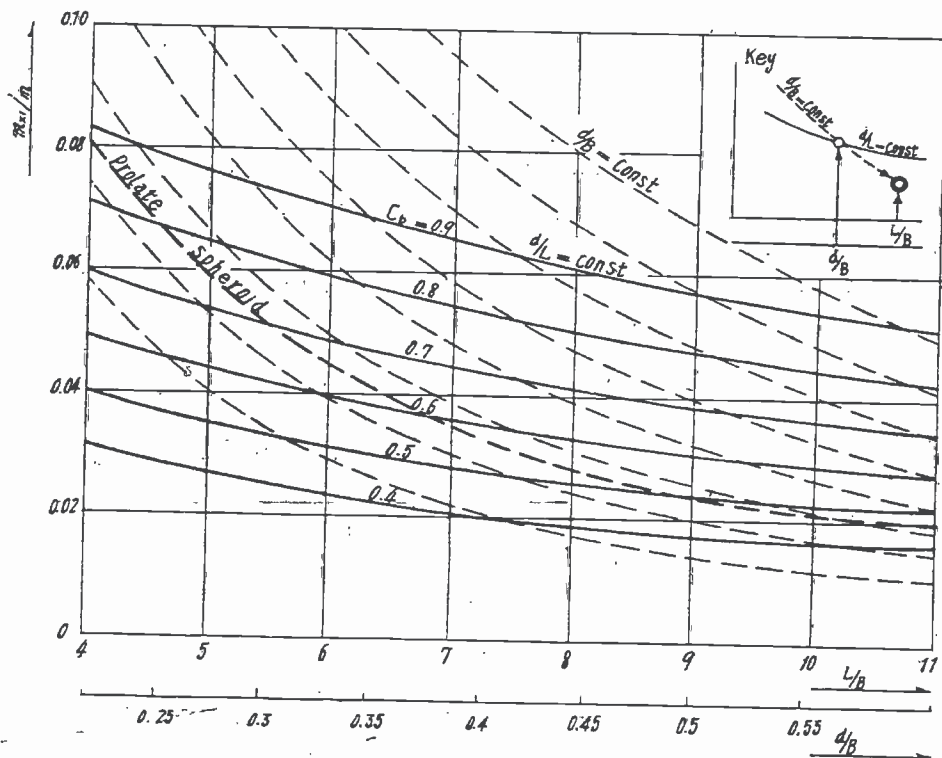


Fig. 7

Fig. 7 はこの関係を用いて、 $d/B = \text{const}$ の場合の m_{x1} の変化を求めたもので、先ず Fig. 5 より、 C_b 0.4, 0.5……0.9 の所の各 L/B に対する値を取つて、 L/B base に Plot すると Fig. 7 の $d = \text{const}$ で C_b を Parameter とする曲線群となる。

つぎに Fig. 6 の関係、 $-m_{x1}$ が d/B に比例する——を用いて、 $d/B = 0.75 = \text{const}$ の曲線群を書いたのが Fig. 7 中の破線である。これは $d/B = \text{const}$ の曲線群であるから、これを用いて任意の L/B で任意の d/B の場合の m_{x1}/m を求めることができる。

すなわち、今求のようとする喫水に対する d/B を base 上に下の目盛で取り、その直上で求めようとする C_b の $d = \text{const}$ の線の値を読み取る。その点を通り、最寄りの $L/B = \text{const}$ の線に平行に曲線を引き、求める L/B の直上でその曲線の値を読み取れば求める L/B , C_b , d/B に対する m_{x1}/m が求められる。

なお、図中太い破線で plot してあるのは回転楕円体 ($d/B = 0.5$) で大体船型の $d/B = \text{const}$ 曲線と平行になつており、且、数値も $C_b = 0.5$ (回転楕円体は 0.523) のものに略々等しいから、 m_{x1} については回転楕円体の理論値は同じ程度の C_b の船には適用できる事が判る。しかし C_b の大きな船ではかなり異つた値になる。

終りに本論文は文部省科学試験研究の一部として行われたものであることを附記し、終始御教示を賜つた加藤教授、乾教授および実験解析に努力を惜まれなかつた東京大学動揺水槽の職員諸氏に厚く御礼申上げる。

なお本論文は同じ目的の下に行われた湯本 秀、吉田昌平両君の卒業論文の経験に負うところが大きいので、ここに感謝の意を表明したい。

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 3 左右動に対する附加質量—

正員 元 良 誠 三*

On the measurement of added mass and added moment of inertia for ship motions.

(Part 3. Added mass for the transverse motions.)

By Seizo Motora, Member

The Author describes in this paper the results of measurement of added mass for the transverse motions.

The Author employed an "athwartship accelerating method" which is grounded on the fact that, when a slender body like a ship is accelerated by a force making an angle α to the center plane of the ship, the direction of acceleration does not coincide to that of the force, and let the angle of acceleration to the center plane β , there is a relation as follows;

$$\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{m + m_{y1}}{m + m_{x1}}$$

The results obtained by this method were satisfactory ones. It was found that m_{y1}/m decreases when C_b value of a ship increases, that m_{y1}/m increases when a ship becomes more slender.

左右動に対し、船は自己周期を有しないから第 1 報で述べたごとく、非定常運動に対する附加質量 m_{y1} が最も必要である。

本論文では前に述べた系統模型船につき m_{y1} を求め、 C_b , L/B および d/B との関連を調べて見た。

§ 1 測定方法

測定方法としては前後動に対する附加質量 m_{x1} を測定したときと同じ振動法、加速法、衝撃法を検討したが、減衰が大きいため、加速法が少々良好な結果を示したのみで他は用いられなかつた。

そこで方法を変え細長い物体を水中で加速するとき、力と加速の方向が一致しない現象を利用することにした。すなわち、Fig. 1 において船の重心（詳しくは見掛重心）に船体中心線と α をなす方向 F に力を加えると x 方向の加速度は

$$\ddot{x} = \frac{F \cos \alpha}{m + m_{x1}} \quad (1)$$

y 方向の加速度は

$$\ddot{y} = \frac{F \sin \alpha}{m + m_{y1}} \quad (2)$$

となるから、加速度 A の船体中心線とたす角を β とすると

$$\tan \beta = \frac{\ddot{y}}{\ddot{x}} = \frac{m + m_{x1}}{m + m_{y1}} \tan \alpha \quad (3)$$

となり、加速度は力の方向より船体中心線の方向に偏る。

(3) 式より $\tan \alpha$ と $\tan \beta$ の比を測定すれば $m + m_{x1}$ と $m + m_{y1}$ の比が求められ、 m_{x1} が判つていれば m_{y1} が求められる。

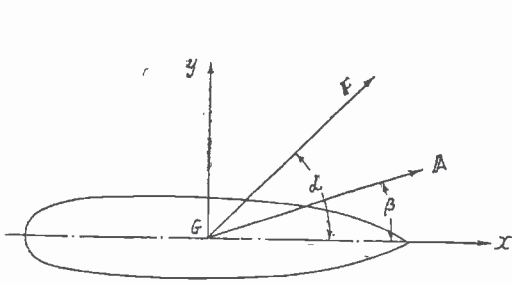


Fig. 1

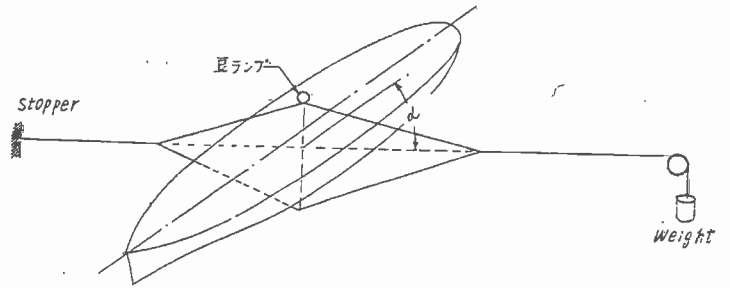


Fig. 2

この関係を用いて m_y を測定するため、Fig. 2 のごとき方法を用いた。すなわち船の重心を通る鉛直線内で船の甲板上と船底下に紐をつけ rolling しないように平行四辺形に左右に張つた後一方は滑車を経て weight で引張り、一方は stopper で止めて重心直上に豆ランプをつけ、船体中心線および紐が明瞭に写真に写るように白く塗つて置く。静止時に真上から写真を撮り、ついで stopper を外すと同時に同じ画面に豆ランプの動きを重ねて写す。

その結果は Fig. 3 a) b) のごとくなり、これより $\tan \alpha$ と $\tan \beta$ の比をかなり正確に読み取る事が出来る。Table 1 は (3) 式が実際成立するかどうかを試みるために力の方向 α を大幅に数種変化させて実験した結果で、これより α のいかに拘らず (3) 式の関係が成立つ事が判る。Fig. 3 a) は Table 1 の $\alpha=16.4^\circ$ の場合、b) は $\alpha=57.6^\circ$ の場合の記録の例である。

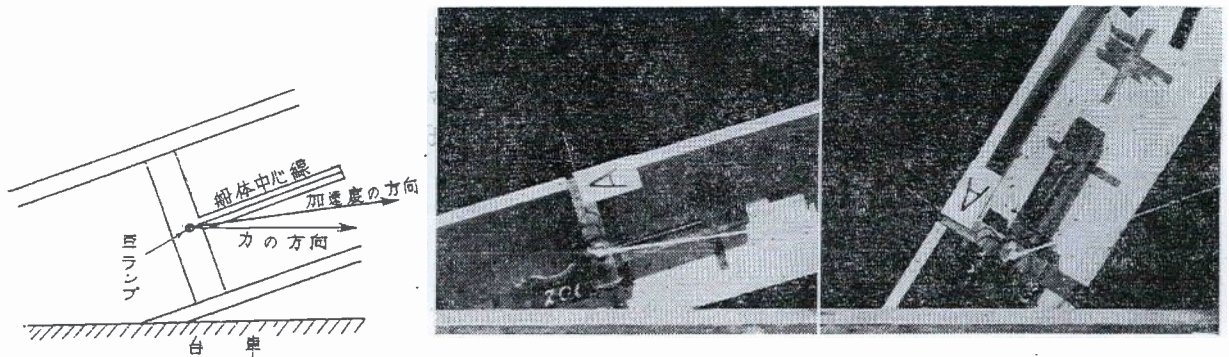


Fig. 3

Table 1 B₀ 模 型

α	$\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{m+m_{y1}}{m+m_{z1}}$	$\frac{m+m_{z1}}{m}$	$\frac{m+m_{y1}}{m}$	m_{y1}/m
16.4°	1.880			
22.2°	1.890			
36.2°	1.885			
43.5°	1.898			
57.6°	1.888			
82.5°	1.910			
平均	1.891	1.040	1.967	0.967

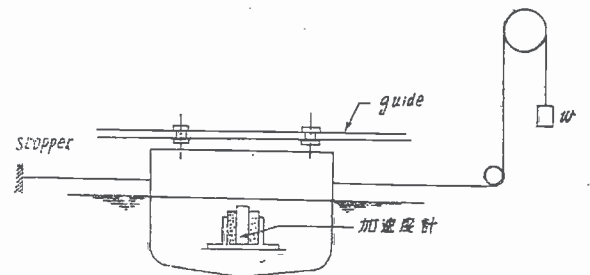


Fig. 4

実際の測定では、 α が余り小さくても大きくても $\tan \alpha / \tan \beta$ が測定し難いので大体 $\alpha=37^\circ$ 近辺を狙つて数回実験を行ない、平均を取つた。

得られた m_{y1} がもう少し直接的な方法と一致するかどうかを調べるために加速法による測定も行なつて見た。その方法は Fig. 4 のごとく船に加速度計を固定し、rolling を止めるために摩擦の少いガイドをつけ船体に固着した紐を左右に水平に伸ばして、一方は stopper につけ、一方は滑車を経て weight w で引張つてある。

stopper を外す瞬間の加速度の変化を oscillograph で記録し、最大加速度を y_0 とすると

$$\left(m + m_y + \frac{w}{g} + \delta m\right) y_0 = w \tag{4}$$

より $m + m_y$ が求められる。ただし δm は滑車の慣性による質量の増加である。

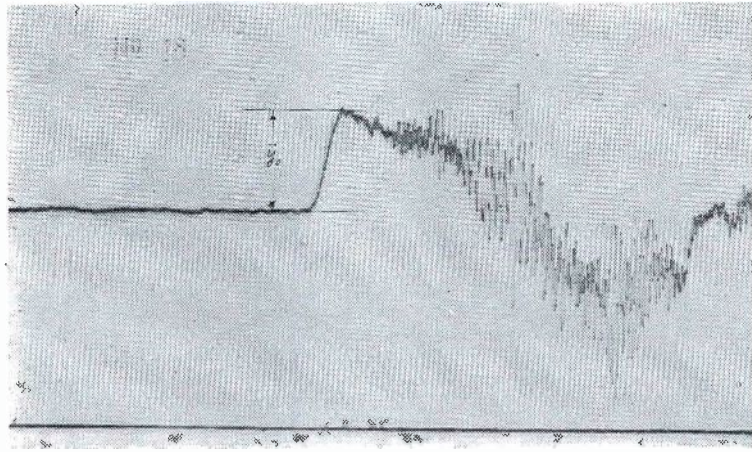


Fig. 5

oscillogram の一例が Fig. 5 に示してあるが、ガイドの振動等が入つて来てあまり高い精度は望めない。測定結果は、その平均は大体前述の方法による測定結果と一致するが $\pm 5\%$ 程度のバラッキがあり精度から考えて前の方法の方が信頼出来よう。

§ 9 測定結果

2.1 測定値

測定の精度を調べるため、 B_0 模型につき数回実験を行なつた結果は大体 $\pm 2\%$ 程度の精度であつた。

Table 2

模 型	$\tan \alpha / \tan \beta$	$(m+m_{z1})/m$	$(m+m_{y1})/m$	m_{y1}/m
A_0	1.782	1.0503	1.873	0.873
A_I	2.092	1.0448	2.186	1.186
A_{II}	1.524	1.0643	1.622	0.622
B_0	1.896	1.0400	1.972	0.972
B_I	2.250	1.0356	2.330	1.330
B_{II}	1.610	1.0526	1.695	0.695
C_0	1.975	1.0324	2.404	1.040
D_0	2.092	1.0234	2.141	1.141
D_I	2.543	1.0315	2.623	1.623
D_{II}	1.757	1.0297	1.810	0.810

各模型について行なつた測定結果を平均値だけ示すと Table 2 のごとくなる。

2.2 L/B との関連

Fig. 6 は Table 2 を L/B base に Plot したもので L/B が増加し、船が細長くなると m_y/m は急激に増加することが判る。図中破線は回転楕円体に対する自由表面のない時の計算値であるが、傾向が著しく異なるのは回転楕

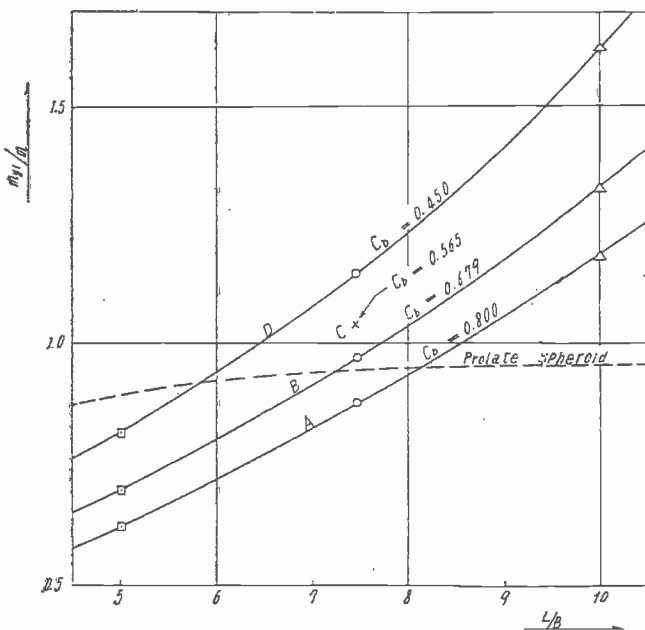


Fig. 6

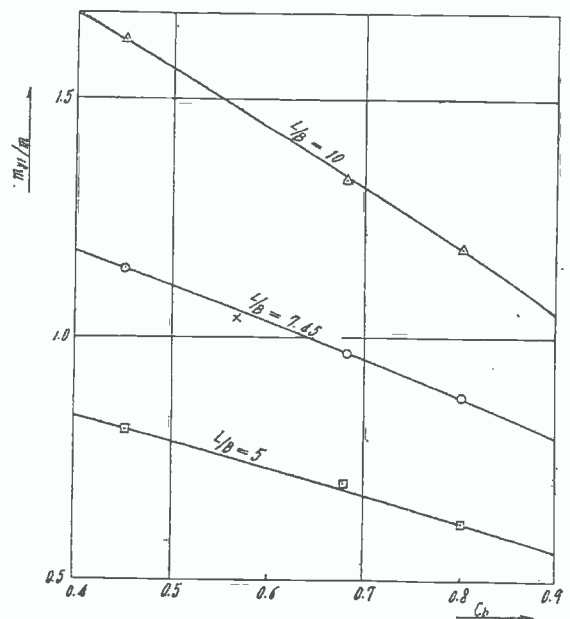


Fig. 7

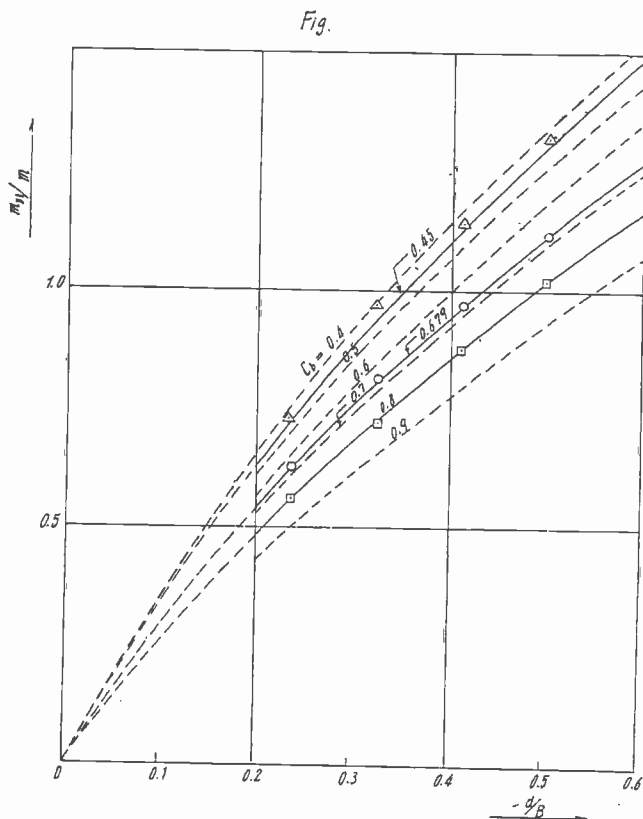


Fig. 8

$L/B=7.45$ (標準喫水)の点を通り Fig. 8 の関係により d/B による変化分を修正したのが図中の破線、 $d/B=const$ の曲線である。

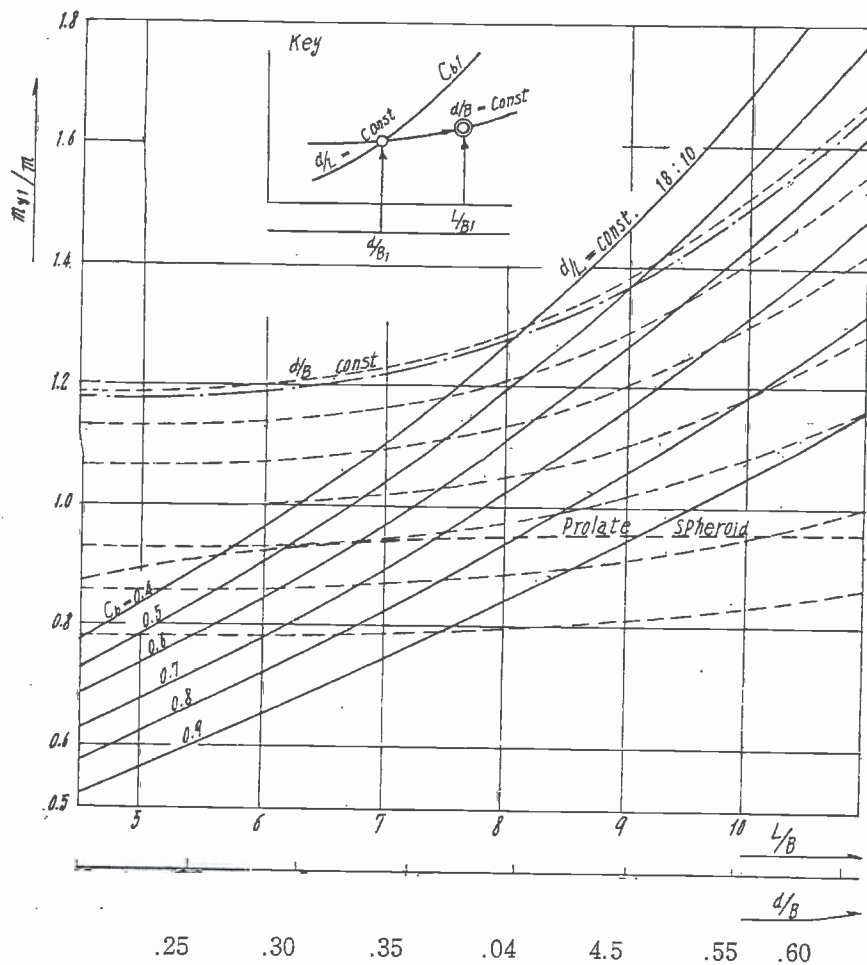


Fig. 9

円体が d/B 一定で L/B が変化しているのに対し実験値は、 d/L 一定で行なっているためである。その相異については後に述べる。

2.3 C_b との関連

Fig. 7 は C_b との関連を示したもので、 C_b が増加すると m_{y1}/m は減少するがこれは尖つた部分が減少するためと考えられる。

2.4 d/B との関連

Fig. 6 は d 一定で実験した結果であるから、 L/B が変化すると同時に d/B も変化していて、純粹の L/B だけ、または d/B だけの変化の影響ではない。そのため、 d/B だけの影響を見るため、 A_0, B_0, D_0 の船型で喫水を変化させて測定を行なつた。

その結果が Fig. 8 で m_{y1} のときと異なり、 d/B に完全には比例しないが d/B が増加すれば m_{y1}/m は一定の傾向で増加する。そこで Fig. 8 の関係を用いて、Fig. 6 の d 一定の曲線を近似的に d/B 一定の線に修正することが出来る。

Fig. 9 はその結果を示したもので、Fig. 7 より $C_b=0.4\sim 0.9$ に相当する値を読んで Plot したのが Fig. 9 中の $d/L=const$ の曲線であり、各曲線の

Fig. 9 より任意の $L/B, C_b, d/B$ に対する m_{y1}/m の値を求めることが出来る。すなわち、求めようとする船の d/B を base 上に取り、その直上で与えられた C_b に相当する $d/L = \text{const}$ の線との交点を求め、その交点を通り最寄りの $d/B = \text{const}$ の線に平行に線を引き、与えられた L/B の直上の値を読み取ればよい。

2.5 回転楕円体の理論値との比較

Fig. 9 には回転楕円体 $d/B = \text{const} = 0.5$ の計算値が plot してあるが、 m_{y1} のときと異なり、実験値を $d/B = \text{const}$ の場合に修正してもなお傾向が一致しない。特に船の場合は $d/B = \text{const}$ でも L/B が大きくなると、 m_{y1}/m は増加の傾向を示しているが、これは L/B が大きくなると船首、船尾の尖りが鋭くなつて来るためと考えられる。また回転楕円体の $C_b = 0.514, d/B = 0.5$ に相当する $d/B = \text{const}$ 曲線を Fig. 9 で求めて見ると図中の一番上の $d/B = \text{const}$ 曲線のわずかに下、図中の鎖線になるから、回転楕円体に対するものより遙かに大きくなる。この相異はやはり船首、船尾の尖りのためと考えられ、 m_{y1} に関する限り回転楕円体の理論値は船には適用できないことが判る。

2.6 側面積と m_{y1} の関係

dead Wood の面積をかえて側面積を変化させた場合の m_{y1} の変化を調べるために、 E_0 模型に4種類のヒレをつけて実験を行なつた結果は Fig. 10 のごとくなる。

ヒレは前後対称につけられている。Fig. 10 中の破線は、 m_{y1} が側面積に比例すると考えたときの線で、実測値はそれよりやや大き目に出ている。これは dead wood が薄い板で出来ていることから当然予想されることであるが、近似的には側面積の増加による m_{y1} の増加は面積に比例すると考えて差支えない。すなわち

$$\frac{\delta m_{y1}}{\delta A} = \frac{m_{y1}}{A} \quad (5)$$

ただし δm_{y1} は m_{y1} の増加分

δA は側面積の増加分である。

2.7 横の附加質量 m_{y1} の中心

附加質量は普通の質量の重心に相当する中心を有する。船体の重心を G 。附加質量の中心を O とすると、見掛上全体の重心は、 G と O とを船体の質量と附加質量の逆比に内分したところにあることが知られている*。

今の場合、重心も附加質量の中心も船体中心面上にあることは明かであるから、問題になるのは、その前後方向の位置である。

見掛の重心位置を G' とすると

$$\overline{GG'} = \frac{m_{y1} \times \overline{OG}}{m + m_{y1}} \quad (6)$$

となるわけである。

実験により $\overline{GG'}$ が求められれば \overline{OG} が求められる。 \overline{OG} を求めるため E_0 模型を用いて次の如き実験を行なう。

1) dead wood が無い場合

O, G, G' とともに O にあり、斜航法により、 $m = 22.00 \text{ kg}$ $m_{y1} = 0.797 \text{ m}$ が求められる。

2) dead wood を船尾だけにつけた場合 (Fig. 11 参照)。

dead wood の面積 $\delta A = 172.2 \text{ cm}^2$ dead wood の面積の中心の O からの距離 $\text{OC} = 70.84 \text{ cm}$

E_0 の側面積 $A = 1262 \text{ cm}^2$ $m = 22.00 \text{ kg}$ 。

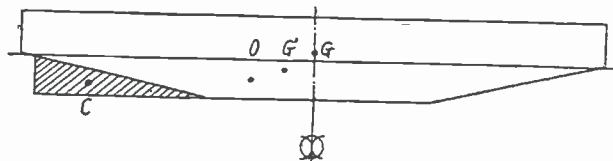


Fig. 11

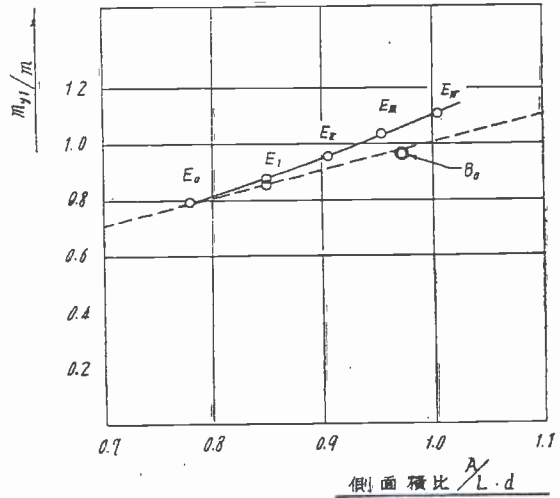


Fig. 10

* 元良誠三 見掛質量について造船協会々報 87 号

附加質量の増加 $\delta m_{y1} = 0.160m$

$\overline{GG'}$ を求めるため、回転中心を前後にずらせ乍ら衝撃実験を行なつて、見掛の慣性モーメント $I_Z + J_{Z1}$ を求めて見ると、Fig. 12 のごとくなる。

Fig. 12 より $I_Z + J_{Z1}$ が極小となる点が G' の管であるから $\overline{GG'} = 6.00 \text{ cm}$ を得る。

これより、(6)式を用いて附加質量の中心位置 \overline{OG} を求めて見ると

$$\overline{GG'} = 6.00 = \frac{\overline{OG} \times m_{y1} + \delta m_{y1}}{m + m_{y1} + \delta m_{y1}}$$

より $\overline{OG} = 12.26 \text{ cm}$ となる。

a) 今簡単のため、附加質量の増加は側面積の増加に比例し、増加分の中心は面積の増加分 (dead wood) の面積中心 C にあると仮定すると

$$\frac{\delta m_{y1}}{\delta A} = \frac{m_{y1}}{A}$$

$$\overline{OG} = \frac{\overline{OC} \times \delta A}{A + \delta A} = 8.50 \text{ cm}$$

$$\overline{OG} \text{ (実測)} = 12.26 \text{ cm}$$

となり、実際の方が後に偏る。

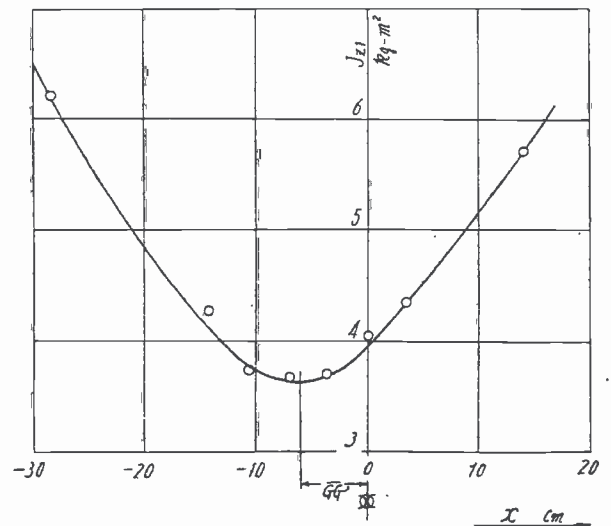
b) つぎに附加質量の増加は実測値を取り、その中心は dead wood の面積中心 C にあるとすると

$$\overline{OG} = \frac{\overline{OC} \times \delta m_{y1}}{m_{y1} + \delta m_{y1}} = 11.85 \text{ cm}$$

$$\overline{OG} \text{ (実測)} = 12.26 \text{ cm}$$

したがつて、b) の仮定は大体成立すると考えてよい。実測値の方がなお後に偏っているのは、附加質量の増加分の中心が dead wood の中心より後へ偏るためであり、dead wood の後端が薄く尖つていることから当然であろう。

終りに臨み、本研究は文部省科学試験研究の一部として行われたものであることを附記し、終始御指導と助言を賜つた加藤教授、乾教授、および解析に尽力された東京大学工学部船舶工学科安定性能研究室の職員諸氏に厚く御礼申上げる。



F. 12

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 Motora, 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 enertia 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

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

となるから、船の運動を

$$\phi \cos \omega t \quad (2)$$

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

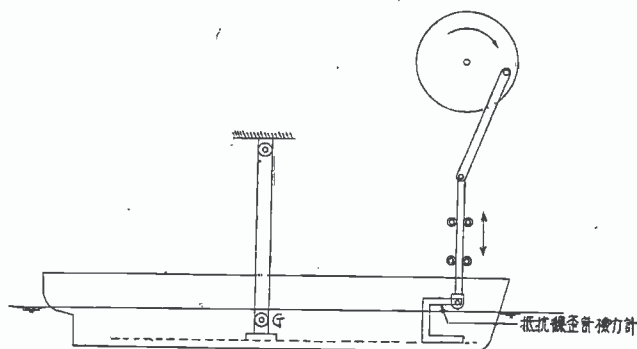


Fig. 1

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

として見掛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。



Fig. 2

船の運動と強制力の位相差は強制装置の回転 disc につ

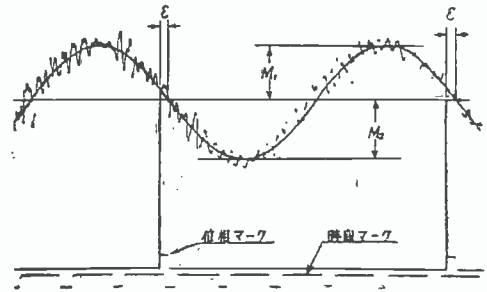


Fig. 3

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 5.4cm 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つて来て比較し難いので次のごとき無次元表示を行なうことにした。

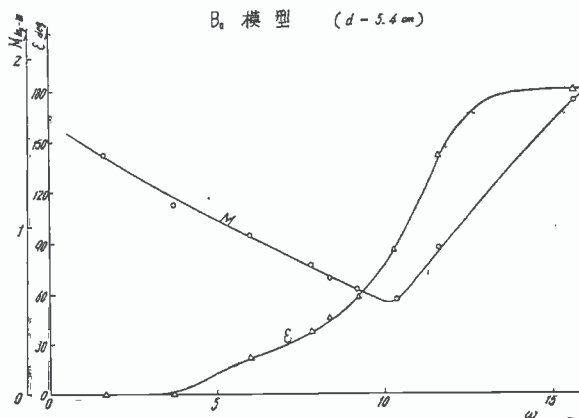


Fig. 4

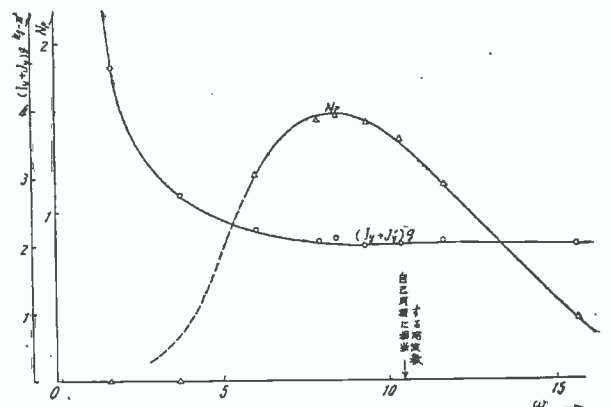


Fig. 5

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

無次元減衰係数 $N_p' = \frac{N_{pv}\sqrt{g \cdot L}}{WL^2}$ (5)

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

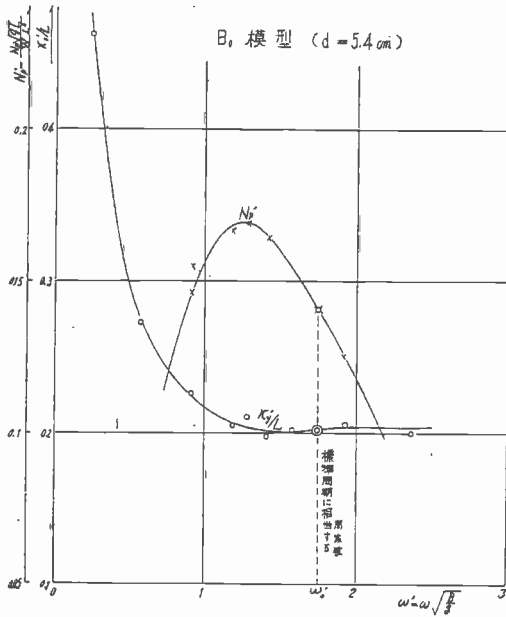


Fig. 6

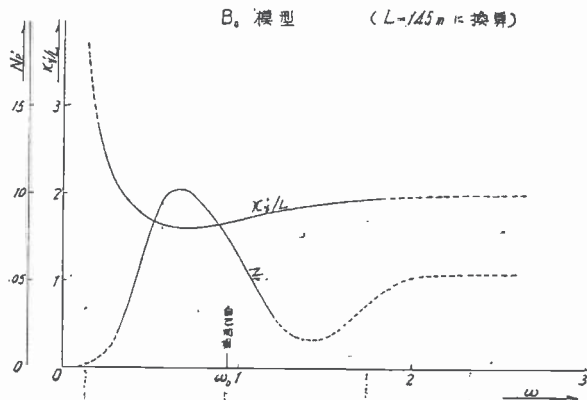


Fig. 7

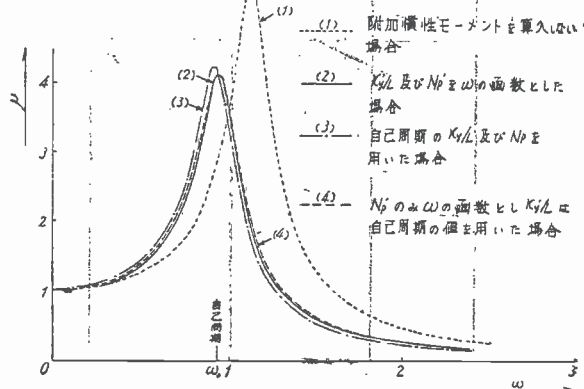


Fig. 8

的な値を取つて船型の影響を論じることを考える。

Fig. 7 は船 B_0 型に対する K_y'/L および N_p' の値を $L=145m$ 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) だけは非常に異なつた値になつてはいるが、(2), (3), (4), 特に (2) と (4) とはほとんど差が無いと云つてよく、したがつ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 40 km の風による完全発達 of Neumann Spectrum を有する波が正面から当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つ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

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っ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。したがっ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_v'/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

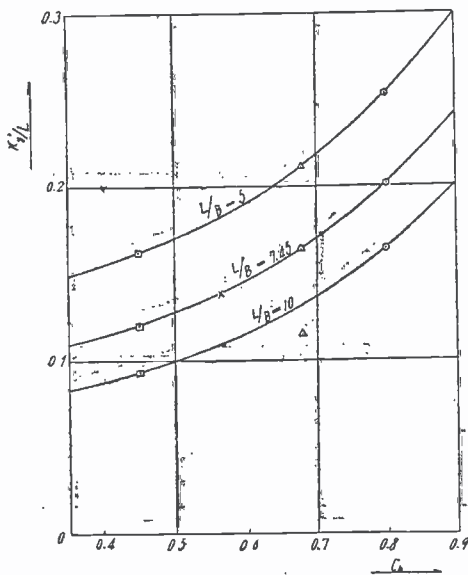


Fig. 9

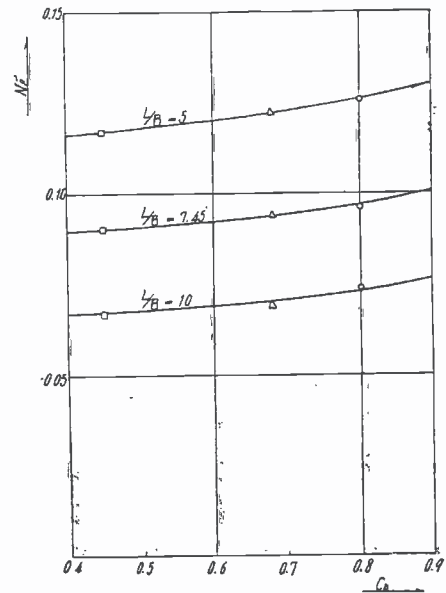


Fig. 10

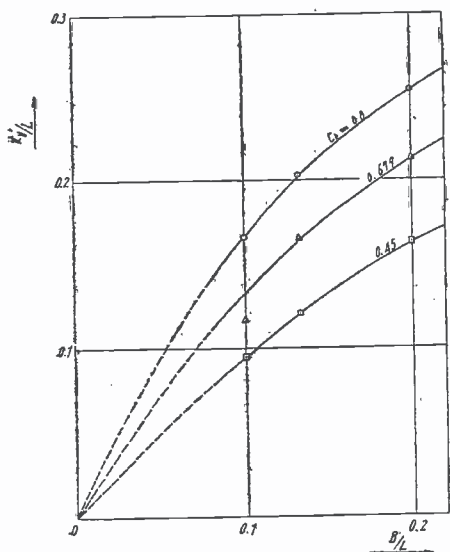


Fig. 11

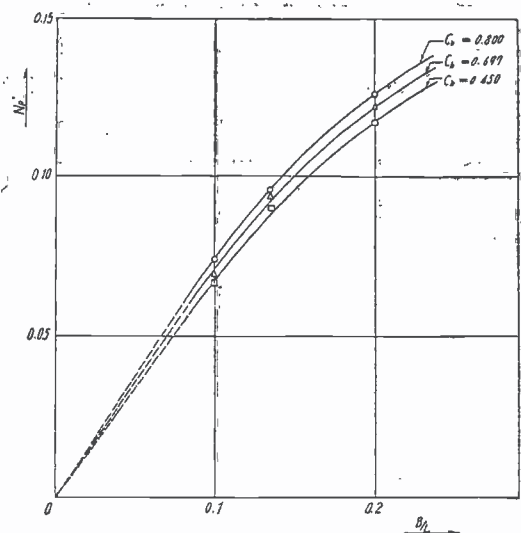


Fig. 12

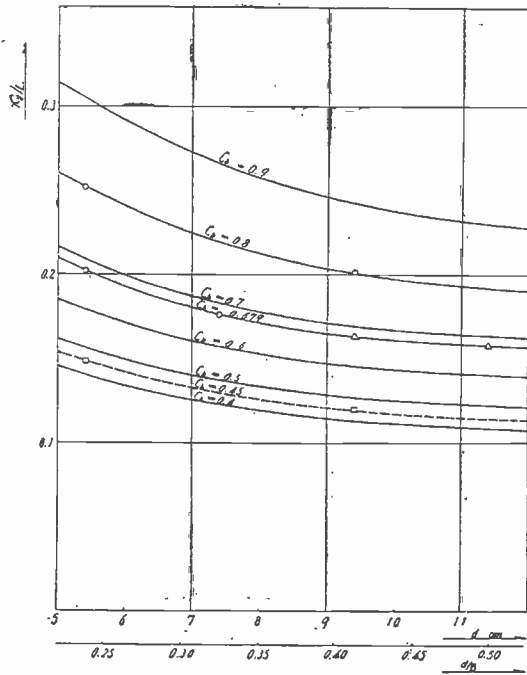


Fig. 13

Pitching の標準周期に対する附加慣動半径の値

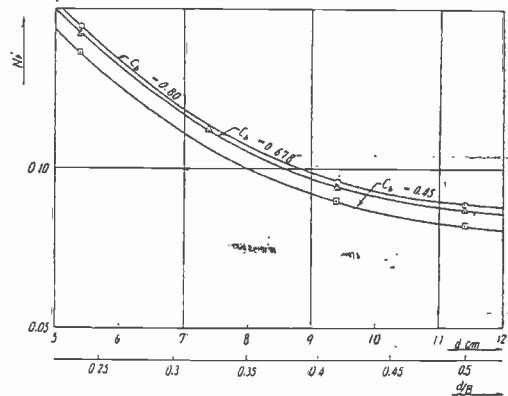


Fig. 14

Pitching の標準周期に対する減衰係数の値

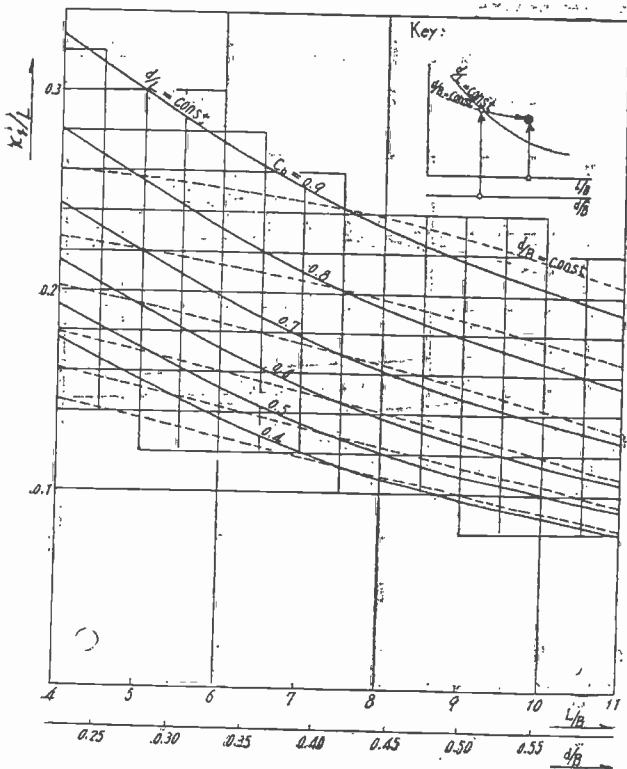


Fig. 15

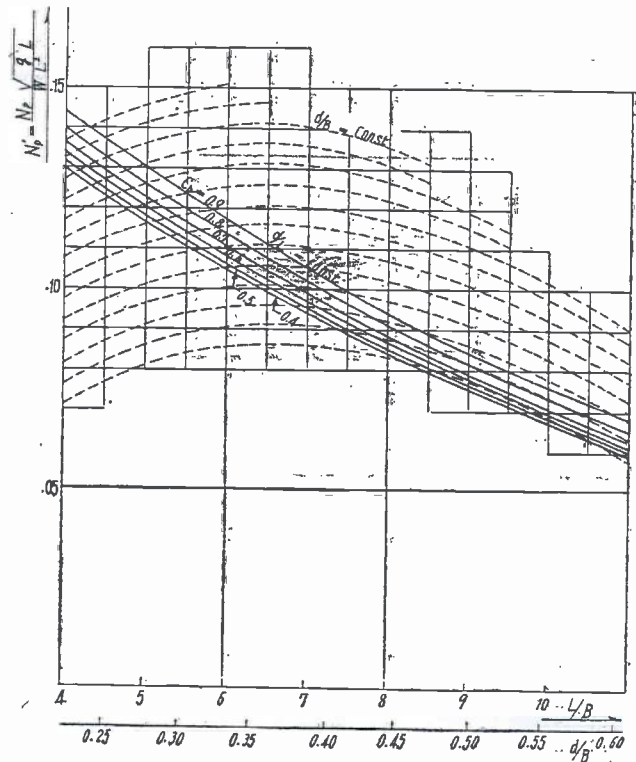


Fig. 16

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。図表の用い方は第 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), $F_I(U, -U)$, F_{II}

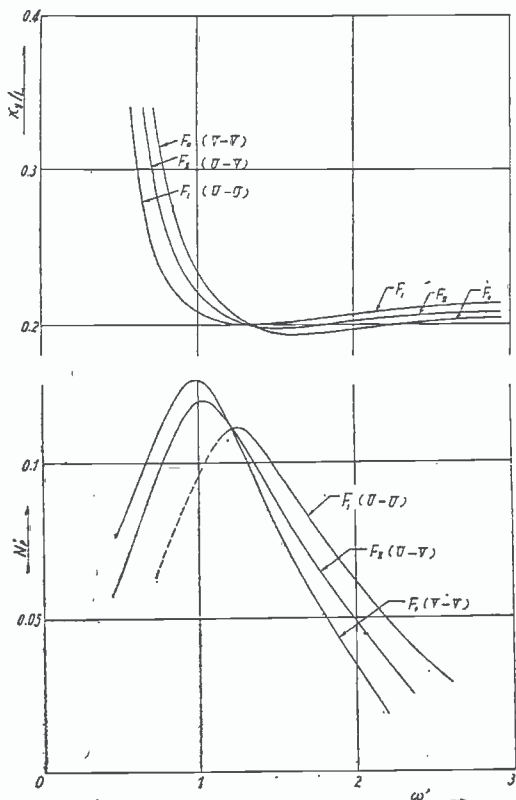


Fig. 17

(V, -U) の3船型 (何れも $C_b=0.756$) について K_y/L および N_y' 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體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つく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波数では、臨界速度は実用の船速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

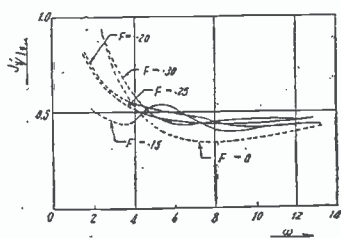
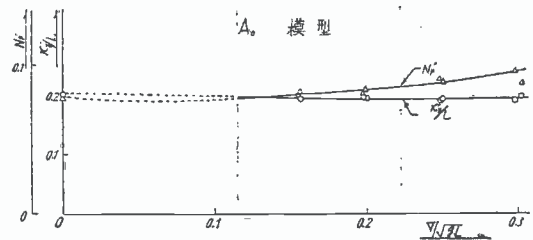


Fig. 18

A. 模型



B. 模型

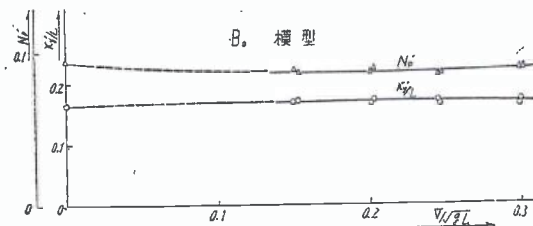


Fig. 20

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 N_y' を求めると Fig. 20 のごとくなる。Fig. 20 は紙数の関係で A₀ 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。

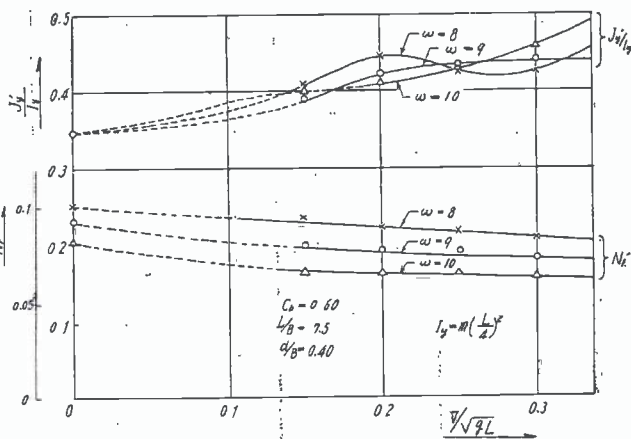


Fig. 19

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 N_y' を求めると Fig. 20 のごとくなる。Fig. 20 は紙数の関係で A₀ 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。

§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出来る。Fig. 21はB₀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へて次の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。

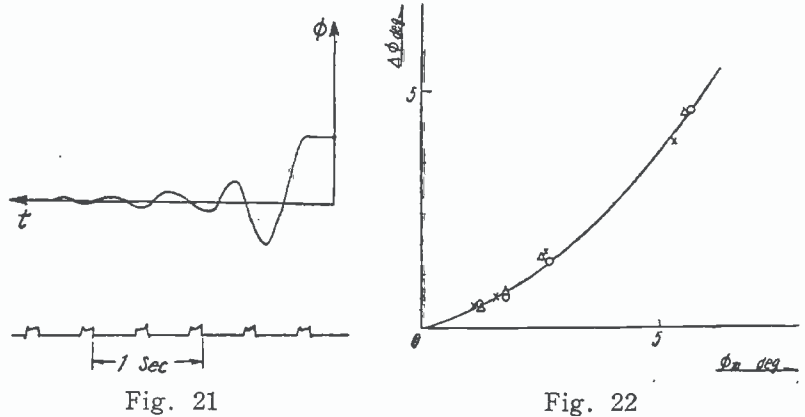
- (1) 最初の半揺れの時間の2倍を周期として取る。
- (2) 最初の1揺れの周期を取る。
- (3) 第2, 第3揺れの平均周期を取る。

	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



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5 上下揺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. 5. Heaving motion)

By Seizo Motora. Member

Abstract

A forced oscillation method same as was used in the case of pitching was employed. The effects of ship forms upon additional mass and damping force are discussed about the values corresponding to the ship's natural frequency.

It was found that the ratio additional mass to ship's own mass increases when C_b and B/L increases, that damping coefficient decreases when C_b increases and increases when B/L increases. Charts of added mass coefficient and damping coefficient same as for pitching motion are also proposed in this paper.

§1 測定方法

上下揺に対する附加質量は周期運動に対するもの $-m_z'$ であり周期によつて変化する。したがつて測定法としては縦揺のときと同じく強制動揺法を用いる。

第4報で述べた強制動揺装置を用い、模型の浮面心に固着した垂直の rod を介して一定周期の上下動を船に与える。船は縦揺を起こさないようにガイドをつけ even keel に保ちつつ上下せしめる。

rod と船の間に挿入した検力計により強制外力を測りまた強制装置の回転 disc に附した接点装置により船の運動と強制外力の位相差を測ることができる。

船の運動を $Z \cos \omega t$ (1)

Z = 上下動振幅 ω = 円周波数

とすると運動方程式は

$$(m + m_z')\ddot{z} + N_h\dot{z} + \sigma A_w Z = F \cos(\omega t + \epsilon) \quad (2)$$

ただし N_h = 減衰係数

σ = 水の比重量

A_w = 水線面積

F = 強制外力の振幅

ϵ = 船の運動と強制外力の位相差

(1), (2) 式より

$$\left. \begin{aligned} m + m_z' &= \frac{1}{\omega^2} \left(\sigma A_w - \frac{F \cos \epsilon}{Z} \right) \\ N_h &= \frac{F \sin \epsilon}{\omega Z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

として見掛質量および減衰係数を求めることができる。

原稿受付 昭和 35 年 1 月 10 日

* 東京大学工学部

船の質量は容易に測れるからこれより附加質量 m_z' を求めることができる。強制装置は縦揺のときと全く同じものを用い、得られた Oscillogram も全く同様である。

§2 記録の解析および表示

測定は各船型につき周波数 2~14 の間で行ない、得られた Oscillogram より強制力の振幅 F 、位相差 ϵ 、周波数 ω を求め、周波数に対して Fig.1 のごとく plot して異常のないことを確かめた後、(3) 式により見掛質量 $m+m_z'$ および減衰係数 N_h を算出し、Fig.2 のごとく周波数 base に plot した。

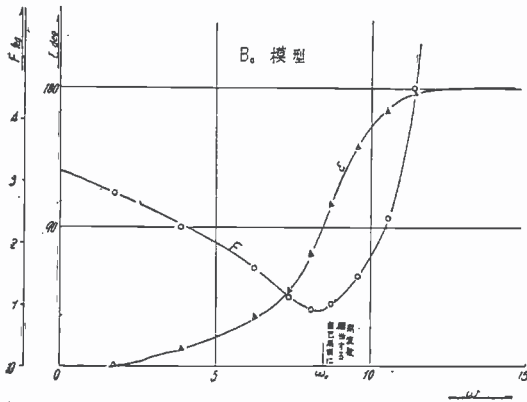


Fig. 1

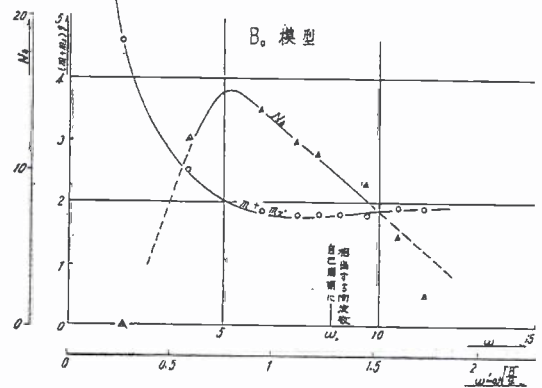


Fig. 2

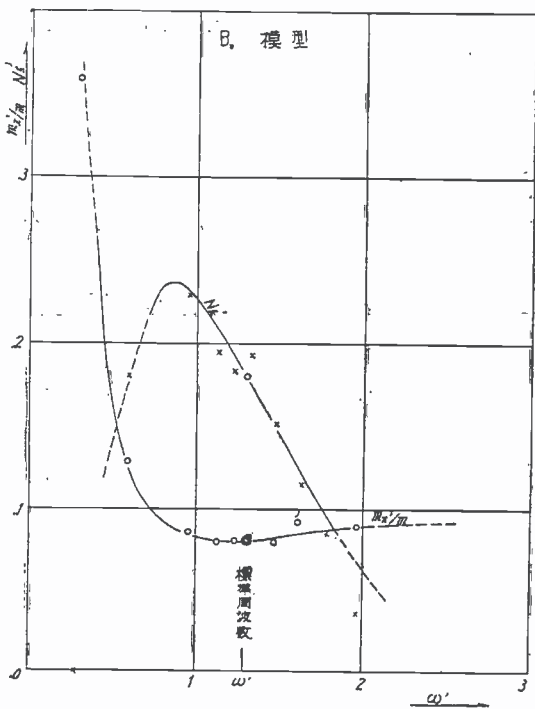


Fig. 3

このようにして各船型について求めた値は次のごとく無次元化して表わすことにした。

$$\left. \begin{aligned} \text{附加質量比} & m_z'/m \\ \text{無次元減衰係数} & N_h' = N_h \sqrt{gL/W} \\ \text{無次元周波数} & \omega' = \omega \sqrt{B/g} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一例として B_0 船型について無次元化した値を Fig. 3 に示してある。

各船型に対する結果を全部掲げるのは紙数の関係で無理なので、比較の基準として縦揺の場合と同じく自己周期に対する m_z'/m および N_h' の値を代表値として採ることとする。

§3 計測結果

(1) C_b の影響

C_b が大きくなると m_z'/m は増加するとともにその最小値を生ずる周波数が小さい方に移つて行く。この傾向は田才助教授の結果と一致する。

自己周期に対する m_z'/m の値は Fig. 4 に示すごとく、 C_b が大きくなると徐々に増加する。自己周期に対する N_h' の値は Fig. 5 に示すごとく C_b の増加とともに急激に減少する。この傾向は縦揺に対する減衰係数が C_b によりほとんど変化しないのと著く異なっているが、その理由として船の前後のろせ方、すなわち C_p がこの系統模型船では C_b に比例して変化していない(第1報参照)ことが考えられる。

(2) B/L の影響

B/L の影響は Fig. 6, Fig. 7 に示すごとく、 $m_z'/m, N_h'$ とともに B/L の増加とともにほぼ直線的に増加する。

(3) 喫水変化

d/B の変化の影響は Fig. 8, Fig. 9 に示すごとく d/B が増加すると $m_z'/m, N_h'$ とともに減少する。

(4) 任意の状態に対する m_z'/m および N_h' の値

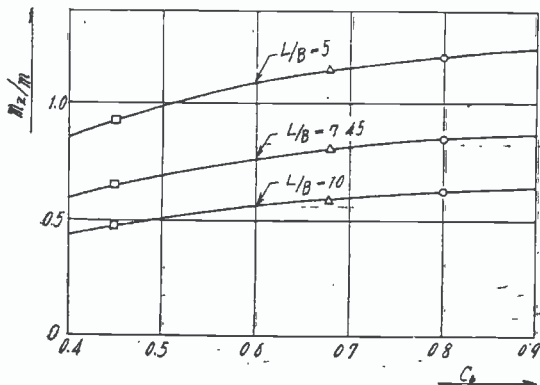


Fig. 4

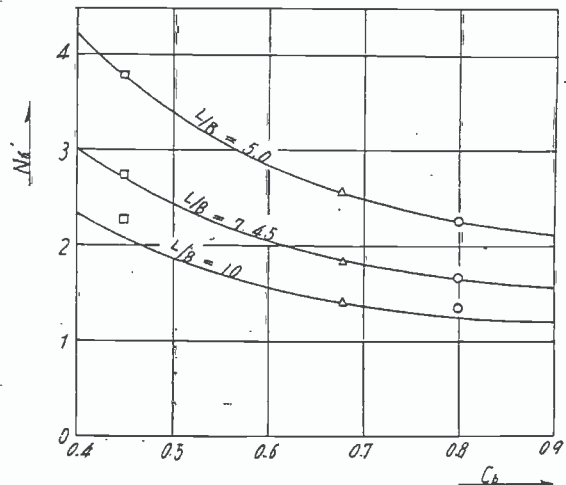


Fig. 5

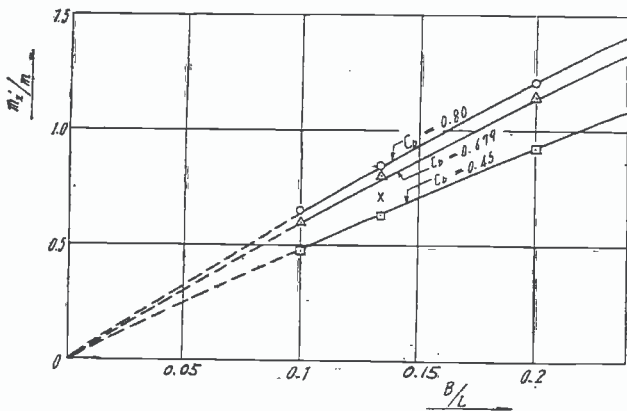


Fig. 6

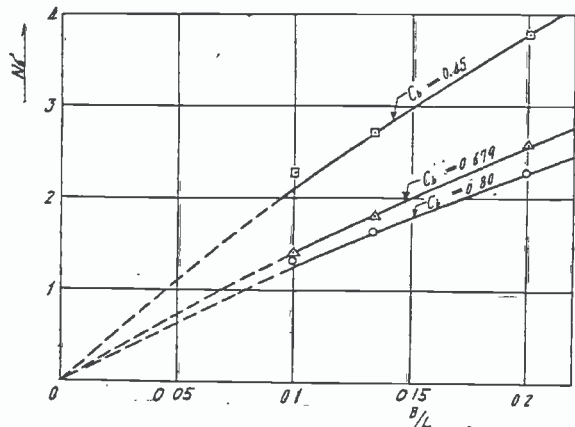


Fig. 7

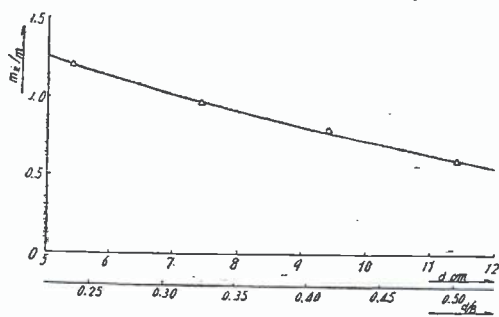


Fig. 8

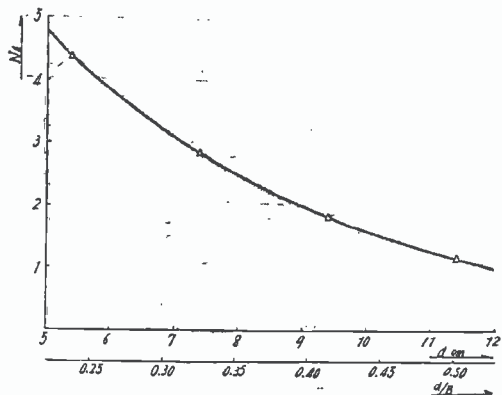


Fig. 9

任意の $C_b, L/B, d/B$ を有する船に対する m'_z/m および N'_n の値を求める Chart を前報と同じ要領で作ると Fig. 10 および Fig. 11 のごとくなる。使用法は前と同じである。

(5) frame line の影響

frame line 変化の影響を見るため、 C_b 一定で frame line を変化した $F_0(V-V)$, $F_I(U-U)$, $F_{II}(V-U)$ の 3 船型につき実験を行なった。結果は Fig. 12, 13 に示すごとく余り大きな差が無く、Fig. 10, Fig. 11 は通常の船型に対して用い得ることが判る。

(6) 前進速度の影響

前進速度の影響を調べるため、装置全体を抵抗水槽の曳行車上に積んで実験を行なった。結果の数値を Fig. 14(a)(b),(c) に示してあるが、これより見て船が自身で起した波を超越す臨界速度以外では m'_z/m , N'_n と

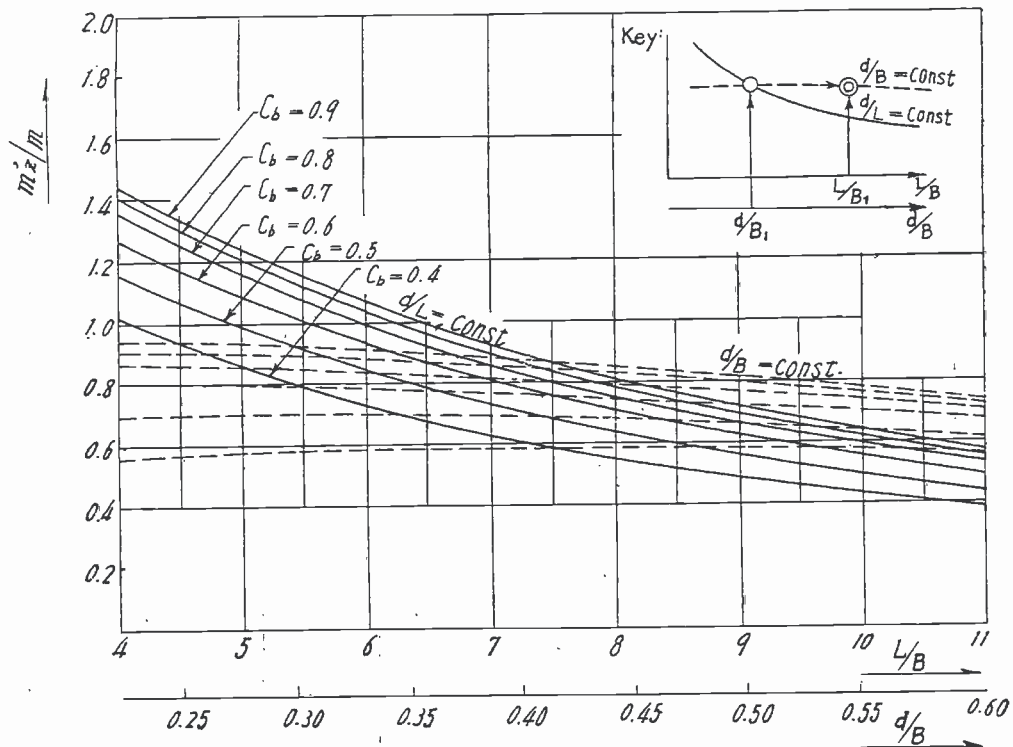


Fig. 10

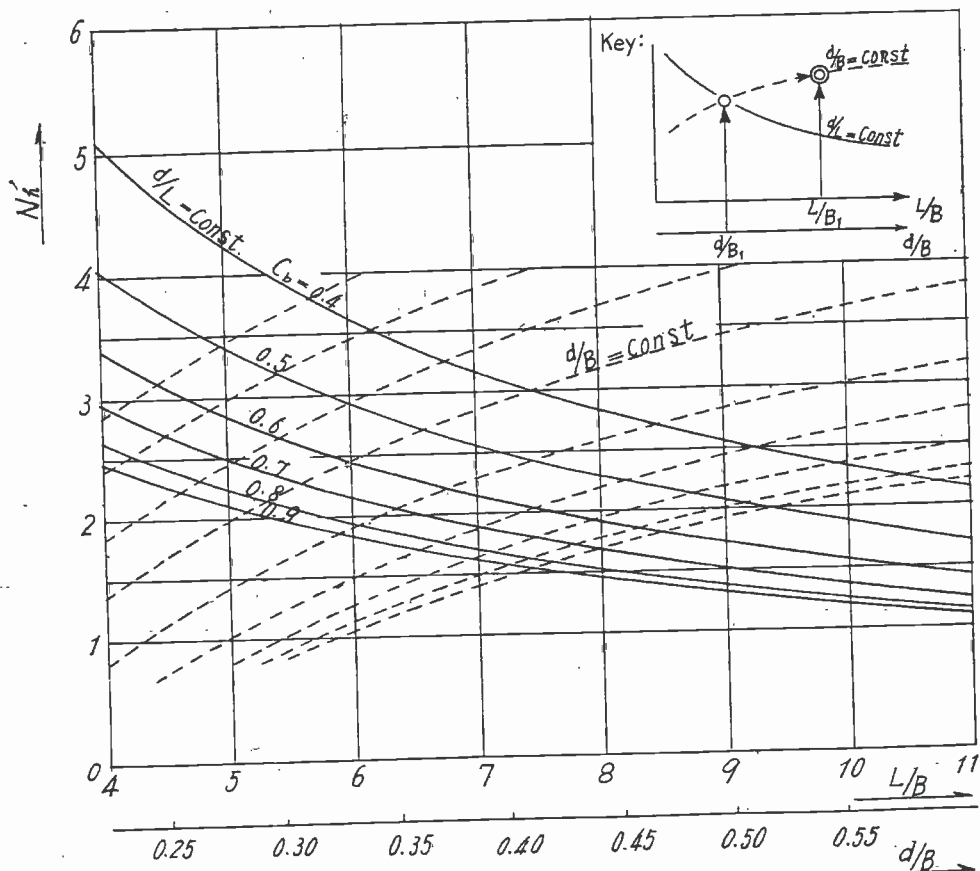


Fig. 11

もに大きな変化が無く、特に m_z'/m はほとんど速度に無関係と云つて差支えない。 N_h' は速度が増すと僅かに増加するがこれも現在の段階では変化しないと考へて差つかえないようである。

(7) 2次元の理論値との比較

田才助教授の2次元柱体に対する附加質量の理論値と本実験の結果を比較するため、比較的断面形の似ている

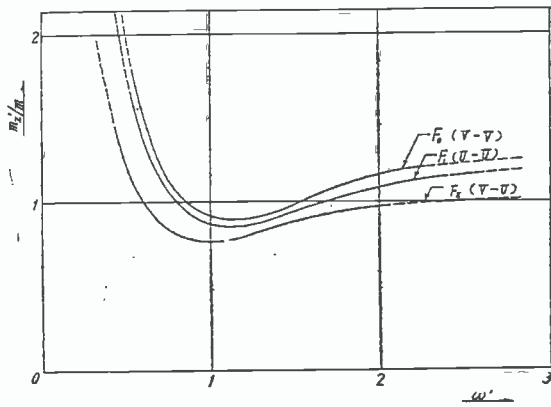


Fig. 12

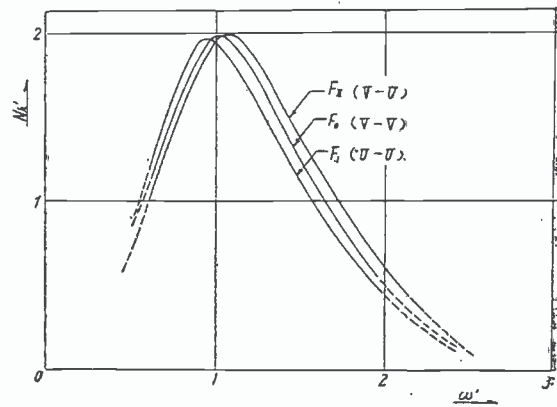


Fig. 13

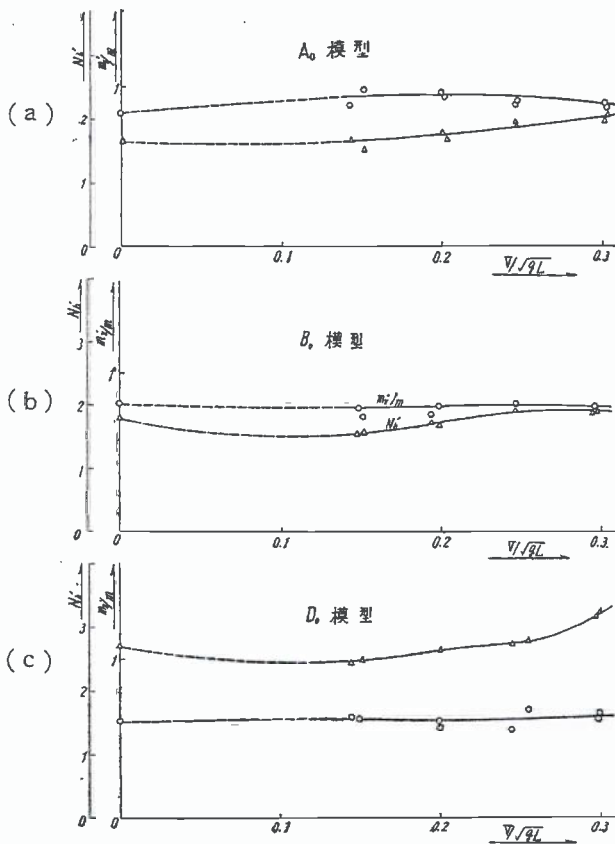


Fig. 14

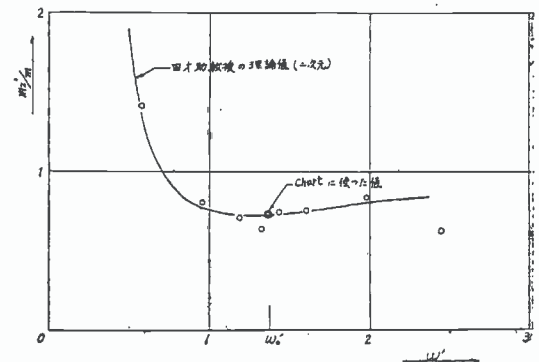


Fig. 15

C₀ 船型について strip method により附加質量を求めて見た。同論文中の ξ_0 と本論文の ω' との間には

$$2\xi_0 = \omega'^2$$

の関係があるので、計算結果を ω' base に表示すると Fig. 15 のごとくなる。

図中の plot は本論文の実験値で、2重丸は自己周期に対する値として Fig. 10 の chart に用いた値である。

Fig. 15 の理論値は3次元の実験値と極めてよく一致し予想された3次元影響が意外に少ないが、これは Fig. 6 で m_{22}'/m が B/L に対して linear に変化していることから当然と云えよう。

縦揺の場合にはこれよりも3次元影響が大きく出ることが予想されるが、 B/L の余り大きくない範囲では strip method は十分の精度を持つと考えられる。

終りに臨み終始御指導を賜わった加藤教授ならびに各種便宜を与えられた乾教授に厚く御礼申上げる。また実験方法については徳田洋次、日比野福田両氏の卒業論文の経験に負う所が大きいので茲に感謝の意を表したい。