

(昭和52年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

高速艇の海水打込みについて

正員 田坂 鋭 一* 正員 橋本 州史**
 正員 深沢 塔 一** 正員 小柳 雅志郎**
 正員 元良 誠 三**

Deck Wetness of High-speed Boats

by Eiichi Tasaka, *Member* Kunifumi Hashimoto, *Member*
 Toichi Fukasawa, *Member* Masashiro Koyanagi, *Member*
 Seizo Matora, *Member*

Summary

In this paper, the authors deal with shipping of sea water onboard high-speed boats in connection with establishing a standard for reasonable amount of the freeboard and the corming height of highspeed pleasure boats.

Shipping of water was observed and measured by model experiments on 1/6.214 scale model in a model basin, and the critical condition of ship speed, wave length, and wave height for shipping of water onboard the model were obtained. Then the results were compared with computed critical condition based on theoretical calculation of relative motion of the bow of the boat and wave surface.

Calculation of ship motion was conducted in the following three different ways: (A) ordinary strip method (OSM) applied for submerged part of the hull configuration at rest, (B) OSM applied for the hull configuration at specified speed, (C) measured hydrodynamic derivatives are to be used in solving the equation of motion.

Compared with model experiments, method B gave closer result with model experiment data than method A, and was as close as method C which was supposed to give the closest result.

This means that the strip method, if the change of the under water hull configuration with speed of advance was taken into account, applied fairly well even under drastic conditions which were much different from assumption of applicability of the strip method.

1 緒 言

波浪中での甲板への波の打込みは、耐航性能を考慮する場合の重要な要素の1つである。これは、船首部付近の複雑な現象であるが、排水量型船舶に関してはいくつかの研究があり^{1)~4)}、理論的にもほとんど説明されていると見てよい。しかし、高速艇のような特殊な船型については、海水打込み自体を取り扱ったものは、ほとんど見受けられない。

高速艇は、流体力学的な揚力を利用して滑走し、静止時と走行時の姿勢変化が著しい等、排水量型船舶とはかなり異ったバランスの上に乗って運動している。このため、動揺問題に対する理論的研究は少ない^{10)~13)}。別所、小松^{5)~6),9)}は、現在広く用いられている O. S. M. ordinary strip method を高速艇に適用し、いろいろな

意味でストリップ法の仮定から外れているにもかかわらず、運動をかなりよい近似で求める可能性があることを示している。

本論文では高速艇の適正な乾舷とコーミング高さを求めるために行なわれた一連の研究⁷⁾に関連して、高速艇の海水打込みの限界条件を、船体運動から理論的に求めることを試みたもので、船体運動の計算方法として、O. S. M. を艇の姿勢変化を考慮せず用いる場合、姿勢変化を考慮して用いる場合、および航走状態で強制動揺試験を行なって求めた流体力係数を用いて運動方程式をとく場合の3種を試みて比較を行なった。

2 計 算 方 法

高速艇が、規則波中で航行する場合の大きな特徴は、揚力が働くことと同時に、運動によって浸水面積が大きく変化することである。O. S. M. ではこれらの影響をとり入れることはむずかしく、ここでは、通常の O. S. M.

* 日本小型船舶検査機構

** 東京大学工学部

を用いている。

2.1 船体運動計算

比較のため次の3種類について行なう。

- A法……O. S. M. を静止時の水面下形状に対して適用する。
- B法……平水中の曳航試験で得られた航走中の姿勢に対応する水面下形状に対して O. S. M. を適用する。
- C法……各船速における姿勢で強制動揺試験を行なって求めた流体力係数を用いて、運動方程式を解く。

運動方程式は次のように表わす。

$$\left. \begin{aligned} a\ddot{z} + b\dot{z} + cz - d\ddot{\theta} - e\dot{\theta} - g_1\theta &= F \\ A\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta - D\ddot{z} - E\dot{z} - G_1Z &= M \end{aligned} \right\} (1)$$

記号は O. S. M. で通常用いられるもの(例えば8)と同じである(付録1参照)。

2.2 打込み限界

実際には、動的な水の盛り上がりや飛沫がかなり大きい、今回は、排水量型船で行なわれる方法と同様、船首の相対水位のみで判定した。

船首の相対水位を

$$H_{fore} = f - z_r \quad (2)$$

ただし、 $z_r = z - l_{GF} \cdot \theta - h$

$$\begin{aligned} &= z_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_z) - l_{GF} \theta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\theta) \\ &\quad - h_0 \cos \omega_e t \end{aligned} \quad (3)$$

z : Heaving, θ : Pitching, h_0 : 波振幅

l_{GF} : 重心と船首との距離

$\varepsilon_z, \varepsilon_\theta$: 船首を基準とした波と運動の位相差

ここで、 $H_{fore} < 0$ で打込みが起これとする。

3 実験および解析計

3.1 供試模型

研究対象としたのは、モーターボート(ヤマハ STR-14)で、模型実験は 1/6.214 模型で行なった。Table 1 にその主要目を示す。

Table 1 Principal Particulars of Model

Length overall, L_{OA} (m)	0.7000
Length on load water line, L_{WL} (m)	0.6131
Breadth \square , B (m)	0.2232
Draft \square , d (m)	0.0383
Displacement, W (kg)	2.6089
Block coefficient, C_B	0.4791
Midship coefficient, C_M	0.6158
Prismatic coefficient, C_P	0.7567
Waterplane coefficient, C_W	0.8236
Longitudinal radius of gyration in air	0.366 L_{WL}
Center of gravity from midship (m)	aft 0.0753

実験は、防衛庁技術研究本部第一研究所中水槽、および東京大学の航海性能試験水槽で行なった。

主な装置と測定器具は次のとおりである。

(1) 運動計測装置

6自由度運動計測装置のrolling, yawing, surging, swaying を固定したものである。この装置を重心位置に取り付け、heaving と pitching の量を2個のポテンシオメーターで計測する。

(2) 強制動揺装置および検力機構

油圧式強制動揺装置に補助具を介してロードセルを取りつけた。pure pitching, pure heaving の両方とも上下方向の力を計測できるようになっている。船体の前部と後部の2接点のうち、後部は回転のみを許し、前部は回転と前後方向の水平移動が可能である。

(3) サーボ式水位計

水面を追跡し、液面の上下に敏感に反応する。今回は姿勢を計測するのに用いた。

3.2 実験内容

(1) 姿勢計測

高速での大きな特徴であるトリム角の変化、浮上・沈下量、浸水長の変化を求める。この計測結果を後の計算にも使用する。運動計測装置で曳航し、サーボ式水位計によって上下方向の変位を求めた。結果は、静水面を基準にして整理している(Fig.1~4 参照)。

(2) 運動計測

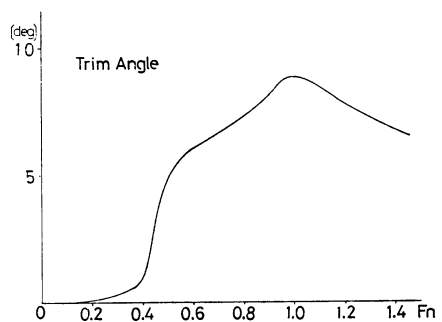


Fig. 1 Trim Angle vs. F_n

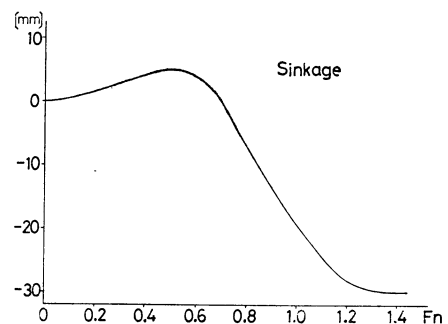


Fig. 2 Sinkage vs. F_n

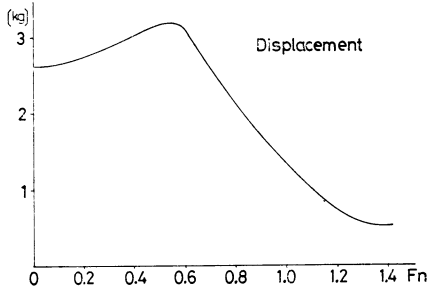


Fig. 3 Displacement vs. F_n

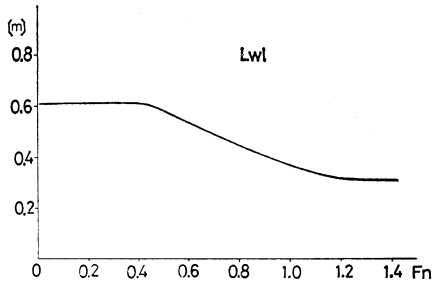


Fig. 4 Length of waterline vs. F_n

波長は、 $\lambda=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ (m), 波高は、 $H_W=3.0, 4.0, 5.0$ (cm), について、 $F_n=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ のものを行なった。

(3) 復原力計測

線形ストリップ理論による運動方程式中に表われる復原力の係数としては、一般に船舶算法的に求めた値が使われている。しかしながら、高速で揚力の働く状況化においては、この値がかなり異なることが予想される。そこで、(1)で得られた姿勢で平水中を航走する場合に受ける力と、微小変位させた場合にうける力との差をロードセルを使って、2点で計測し、復原項および連成項すなわち、 c, C, g_1, G_1 を求めた。

変位量は、Heaving については、5mm の一様沈下、($\Delta z=5\text{mm}$)、Pitching については、前部セル 5mm 下方移動 ($\Delta\theta=-1.91\text{deg}$) とした。なお Pitching については、 $\Delta\theta$ を 3 種変えて線形性を調べた。

(4) 強制動揺試験

(1)で得られた姿勢を中心に運動すると仮定し、この位置を中心に、各速度で曳航して定変位法強制動揺試験を行ない、動的な流体力係数を求めた。すなわち a, A, b, B, d, D, e, E である。

(5) 規則波中海水打込み実験

運動計測装置で規則波向海中を曳行し、打込みの状況を観察した。打込みの定量的な計測は行なわず、すべて目視による観察である。Fig. 23~Fig. 28 では次の記号によって打込みの状況を判別している。

×……全く打込まない。
 △……くずれた波、あるいは多量の水しぶきが Deck にかかる。
 ○……船首より青波の打込みあり。

4 計算値と実験値の比較

4.1 流体力係数

強制動揺試験、復原力計測によって得られた値と、計算式 (2.1 の B 法) とを Fig. 5~Fig. 16 に比較してある。結果は、付録 3 のように無次元化している。

$F_n=0.8$ 付近を境にして、実験値とストリップ法による計算値は、大きく離れていく。ただ a', A' のみは、定量的にも比較的よく合っているといえる。周波数によ

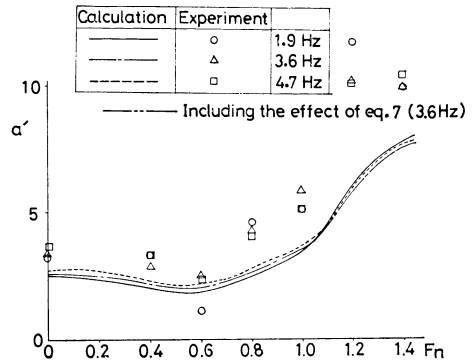


Fig. 5 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

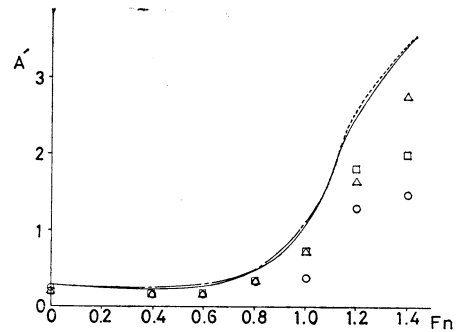


Fig. 6 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

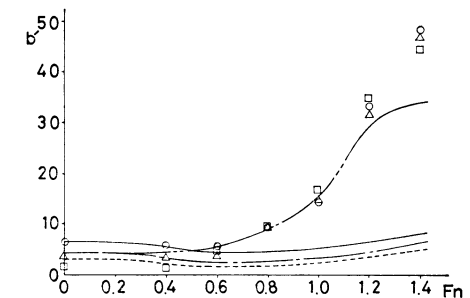


Fig. 7 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

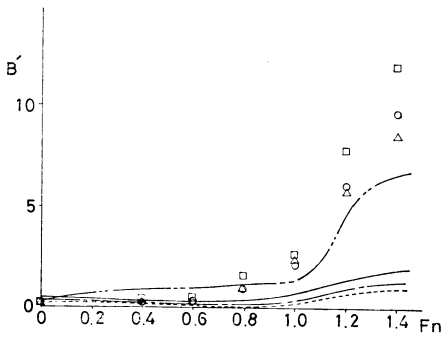


Fig. 8 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

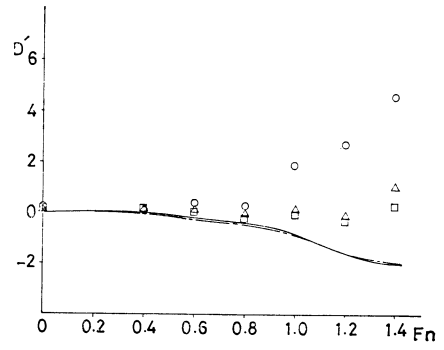


Fig. 12 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

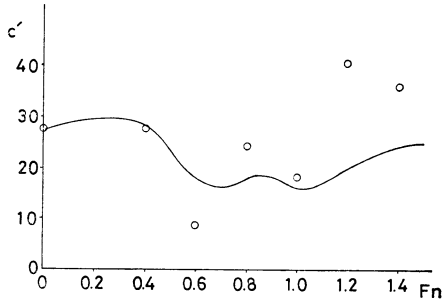


Fig. 9 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

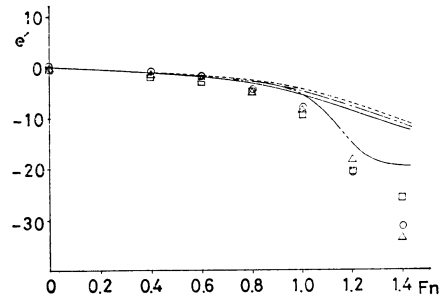


Fig. 13 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

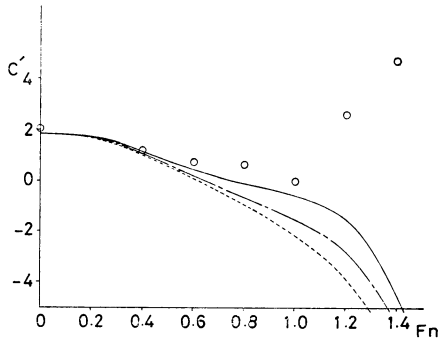


Fig. 10 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

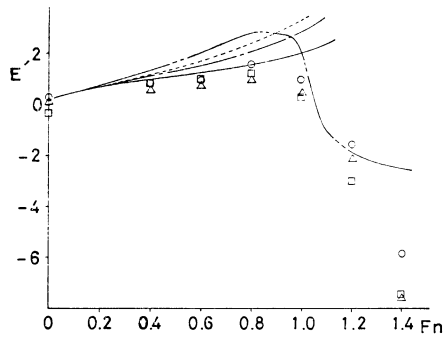


Fig. 14 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

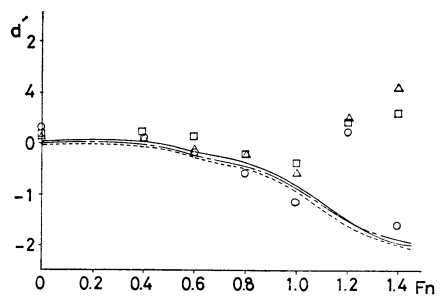


Fig. 11 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

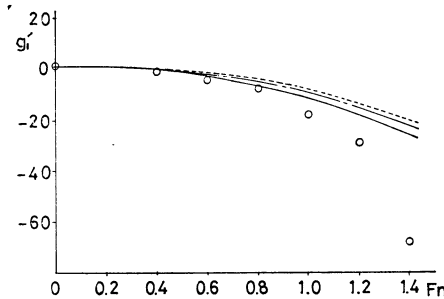


Fig. 15 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

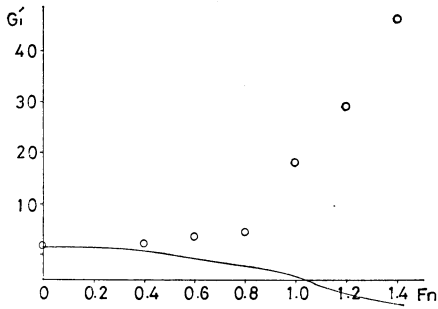


Fig. 16 Hydrodynamic Derivatives vs. F_n

る変化は、実験値でも小さい。

諸係数の中で最も速度影響の大きい減衰項 b' , B' について考察を行なってみる。

O. S. M. においては、一般に付加質量の時間的な変動を無視するが、ここで、その変動分をも考慮してみると、付加質量による力は、

$$F = -\frac{d}{dt}(m_a \dot{z}) = -\left(m_a \ddot{z} + \frac{dm_a}{dt} \cdot \dot{z}\right) \quad (4)$$

となる。一方、

$$\frac{dm_a}{dt} = \frac{dm_a}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$$

ところが、

$$\frac{dx}{dt} = -V$$

故、

$$\frac{dm_a}{dt} = -\frac{dm_a}{dx} V \quad (5)$$

となる。

m_a を 2 次元断面の付加質量とし、幅 $2y(x)$ の平板に対する付加質量を用いて次の様に表わす。

$$m_a = C \frac{\rho \pi y^2(x)}{2} \quad (6)$$

ただし、 C は付加質量係数である。従って

$$\frac{dm_a}{dt} = -C \rho \pi y(x) \frac{dy(x)}{dx} \cdot V$$

船の受ける力は

$$\int_{-L/2}^{L/2} \frac{dm_a}{dt} \cdot dx \times \dot{z} = -C \rho \pi V \times \int_{-L/2}^{L/2} y(x) \frac{dy(x)}{dx} \cdot dx \times \dot{z} \quad (7)$$

この力は Heaving 速度 \dot{z} に比例するので減衰力となる。すなわち、

$$-C \rho \pi V \int y(x) \frac{dy}{dx} \cdot dx$$

が減衰係数 b の付加分として加わるわけである。この付加分は前進速度 V と共に増加する。

Fig.7 にこの付加分を加えたものを 2 点鎖線で示してあるが、この項を入れることにより、減衰係数の前進速度による変動が、かなりよく説明されている。なお、この場合、付加質量係数 C としては、自由表面のない平板の付加質量と、実験より求めた付加質量の比を用いてある。

同様の修正が Pitching の減衰係数 B に行なわれるべきで、その値は

$$-C \rho \pi V \int_{-L/2}^{L/2} y(x) (x-x_G)^2 \frac{dy}{dx} \cdot dx \quad (8)$$

である。この値を付加したものを Fig. 8 に示してあるが、やはり実験値をよく説明している。また、減衰項が変化するため、連成項 e , E もまたこの影響を受けるわけで、この修正を行なったものを、Fig.13, 14 に、2 点鎖線で示してあるが、これも実験値に近づく傾向を示している。

4.2 船体運動

Fig.17~Fig.22 に示すように、計算値は、3つの方法によってかなりの差があり、高速域では著しい。しかし模型実験結果と比較してみると、3つの方法の優劣はつけ難い。今回は調べなかったが、波浪強制力の算定にかなりの差異があることが予想される。

Experiments		Calculation	
○	Wave Height 3 cm	—	A Method
△	" 4 cm	- - -	B Method
□	" 5 cm	—	C Method

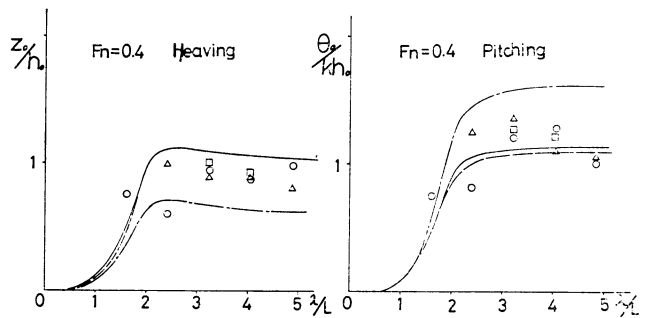


Fig. 17 Pitching, Heaving vs. λ/L

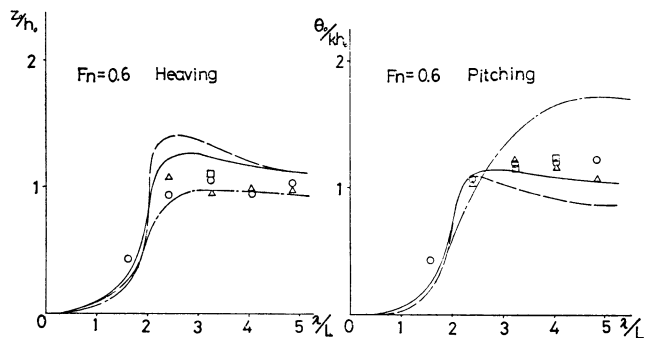
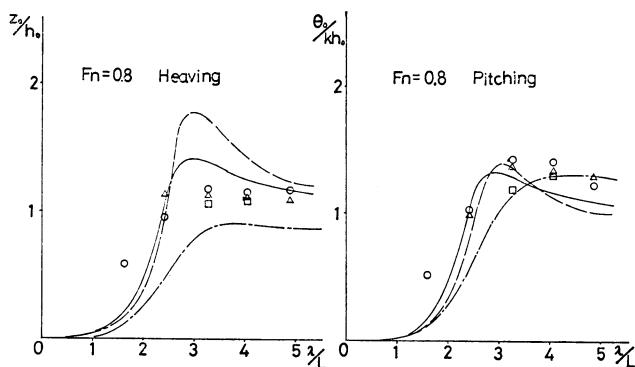
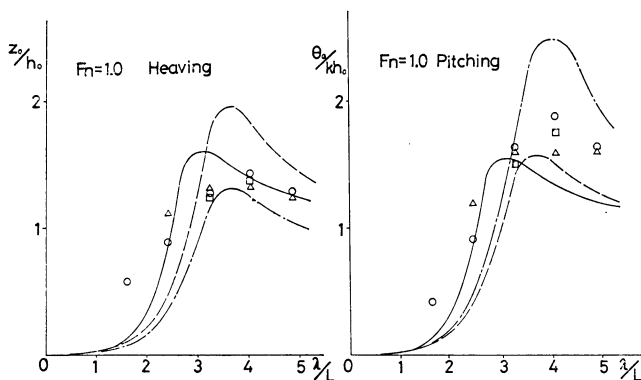
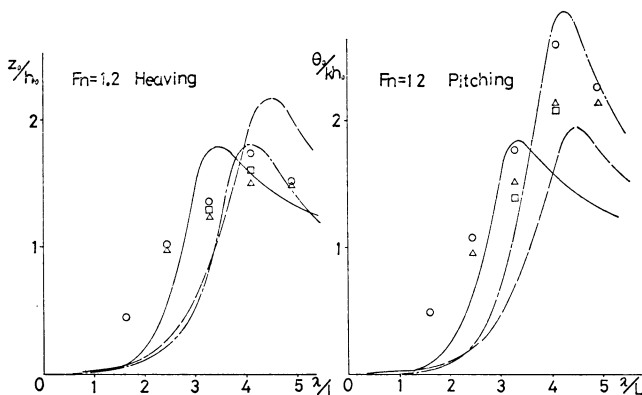


Fig. 18 Pitching, Heaving vs. λ/L

Fig. 19 Pitching, Heaving vs. λ/L Fig. 20 Pitching, Heaving vs. λ/L Fig. 21 Pitching, Heaving vs. λ/L

4.3 海水打込み限界曲線

Fig. 23~Fig. 28 に3つの方法による計算値と模型実験結果を比較してある。これによるとストリップ法では明らかにA法よりB法の方が実験値に近い。また、C法はさらに幾分B法より実験結果に近いようであるが、B法とC法との優劣はつけ難い。

一般にあまり高速でない範囲では、B法またはC法はかなり実験値と合致しているといえよう。また、 F_n 1.2

を超えると艇体がジャンプをするようになり、定常的な流体力の外に衝撃力も考慮する必要があるであろう。

5 問題点

本論文の解析には、実験3.2(1)で測定した姿勢が基本となっており、この平衡位置を中心にして船体運動は正弦的に起こると仮定している。しかし、実際には、運動の平均位置がやや異なり、運動に含まれる高周波成分も顕著であるという報告もある⁹⁾。また、水面下形状を考える際にも、水面の乱れを無視することにはかなり無理がある。正確には、これらの点を考慮しなければならない。

実験3.2(3)より鉛直上向きに作用するリフトの変動が非常に大きいことがわかった。運動の各瞬間で、水面下形状が大きく変化し、時間的に条件が急変する船型においては、定常リフトが働いているという仮定で解析することは、かなり問題があるといわざるを得ない。

今回の模型実験と実船との対応を考える場合、問題となるのに曳航方法がある。本研究の方法では、推力の方向が水面に平行であるが、実船では船体に対して一定の方向を持つ。精度のよい自航試験が理想であるが、種々の制約があり実現できなかった。

6 結 言

O.S.M. は、排水量型船舶に適用した場合、向波中の縦運動ではほぼ満足な理論計算値を与えるとされている。本研究に用いた高速艇においても、航走中の姿勢に対する船型を用いることにより、 $F_n=0.8$ 程度までは、実験値と良好な一致が得られることがわかった。しかし、これ以上の速さになると差が急激に大きくなる。これは、浸水容積、浸水長の大きな減少と対応しており、運動方程式の係数についてみても、減衰項の実験値は理論値よりもかなり大きくなり、連成項の中には、正負が逆になるものすらあらわれる。これは、大きな揚力が働くプレーニング状態にはいり、O.S.M. の仮定と大きく異なるためと考えられる。

強制動揺などによって求めた流体力係数を用いた計算によっても、実験値との一致はさほど良くならない。今回は波浪強制力としてストリップ法による計算値を用いているが、波浪強制力もストリップ法によるものとな

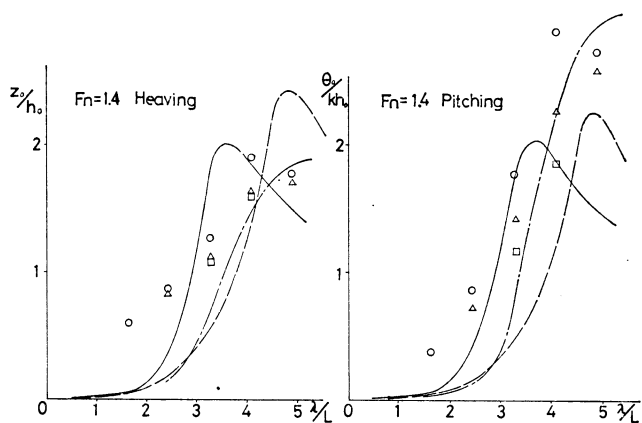


Fig. 22 Pitching, Heaving vs. λ/L

り違うことが考えられ、そのためC法がそれほどよい結果を示さないと考えられる。今後波浪強制力も実測して、ストリップ法によるものとの差を調べる必要がある。

海水打込みに関しては、今回のような簡単なモデルでもある程度現象の説明ができることがわかった。しかし、 $F_n=1.2$ を超すとジャンプするようになり、衝撃的な力の考慮も必要である。

高速艇の運動を十分把握するためには、変動するリフトをとり入れた計算法が必要で、この方面の研究が望まれる。

謝 辞

本研究を行なうに当り水槽施設の使用に関して特別に便宜をはかっていただいた防衛庁技術研究本部第一研究所第三部 永井部長初め関係各位、並びに本研究に対し終始助言を賜った、防衛大学校 別所教授、および日本小型船舶検査機構モーターボート設計標準委員会委員の方々に、厚く御礼申上げる。

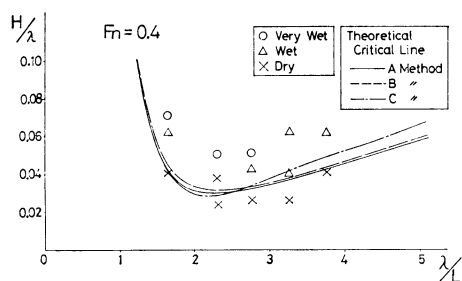


Fig. 23 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

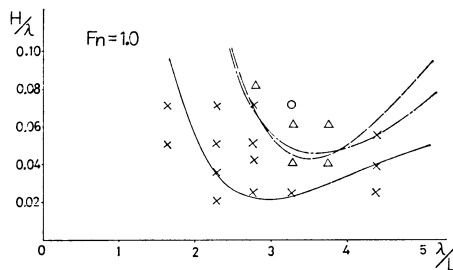


Fig. 26 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

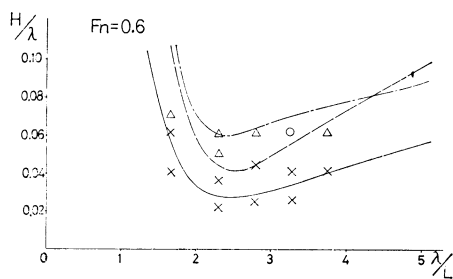


Fig. 24 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

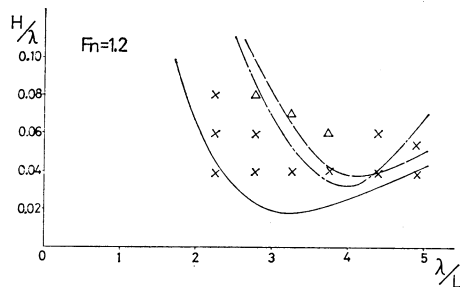


Fig. 27 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

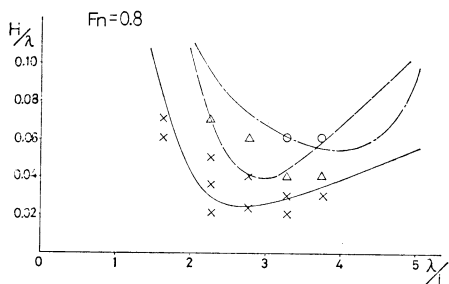


Fig. 25 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

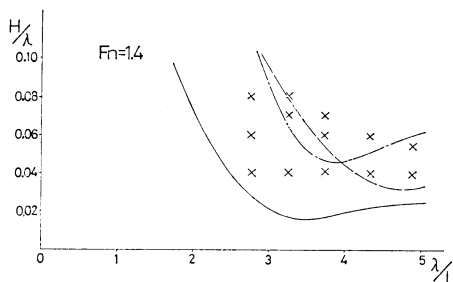


Fig. 28 Deck wetness vs. H/λ and λ/L

参 考 文 献

- 1) Aertssen G.: Limit of Speed of Cargo Ships in Severe Seas, Proceeding, 11 th ITTC 1966, p. 456.
- 2) 田崎 亮: 船舶の波浪中における甲板上への海水打込みについて, 運研報告, 第11巻, 第8号(昭36.8).
- 3) 田才福造他: 肥大船の耐航性に関する研究, 西部造船会会報, 第37号, (昭44.2).
- 4) 造研 SR 108: 高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究, 日本造船研究協会, 研究資料 No. 125, (昭46.3).
- 5) 別所正利, 小松正彦: 高速艇の波浪中運動性能の研究(第1報)~(第3報), 高速艇研究委員会レポート.
- 6) 別所正利, 小松正彦他: 高速艇の規則波中縦運動の研究, 日本造船学会論文集, (昭49.5).
- 7) 設計標準委員会: モーターボートの甲板への海水打込みに関する研究, 日本小型船舶検査機構報告書, (昭50.3, 51.3, 52.3).
- 8) 福田淳一他: 波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する理論計算, 日本造船学会論文集, (昭46.5).
- 9) 小松正彦: 高速艇の規則波中縦運動の研究, 防大論文, (昭47.2).
- 10) 別所正利, 小松正彦: 水面で動揺する2次元平板に働く流体力について, 関西造船学会誌, 154号, (昭49.12).
- 11) 別所正利, 小松正彦: 同(続報), 関西造船学会誌 163号, (昭51.12).
- 12) 別所正利: 動揺する2次元浅喫水船に働く流体力の理論について, 関西造船学会誌, 165号, (昭52.6).
- 13) 別所正利: 動揺する2次元滑走板に働く流体について, 関西造船学会誌, 165号, (昭52.6).

付 録

(1) 運動方程式の係数

$$a = \frac{W}{g} + \int M_H dx$$

$$b = \int N_H dx$$

$$c = 2\rho g \int b \cdot dx$$

$$d = \int (x-x_G) M_H dx$$

$$e = \int (x-x_G) N_H dx - V \int M_H dx$$

$$g_1 = 2\rho g \int (x-x_G) b dx - V \int N_H dx$$

$$A = \frac{I}{g} + \int (x-x_G)^2 M_H dx$$

$$B = \int (x-x_G)^2 N_H dx$$

$$C = 2\rho g \int (x-x_G)^2 b dx - V^2 \int M_H dx$$

$$- V \int (x-x_G) N_H dx$$

$$D = \int (x-x_G) M_H dx$$

$$E = \int (x-x_G) N_H dx + V \int M_H dx$$

$$G_1 = 2\rho g \int (x-x_G) b dx$$

$$F = \int M_H \dot{v}_w dx + 2\rho g \int b \cdot \zeta_w dx + \int N_H v_w dx$$

$$M = - \int (x-x_G) M_H \dot{v}_w dx - 2\rho g \int (x-x_G) b dx$$

$$- \int (x-x_G) N_H v_w dx - V \int M_H v_w dx$$

(2) 強制動揺試験による係数の算出

a. 純上下揺れ

$$\begin{cases} a\ddot{z} + b\dot{z} + Cz = F \\ -D\ddot{z} - E\dot{z} - G_1 z = M \end{cases}$$

$$z = z_0 e^{i\omega t}, \quad F = F_0 e^{i(\omega t - \beta)}, \quad M = M_0 e^{i(\omega t - \delta)}$$

とすれば,

$$a = \frac{C - (F_0/z_0) \cos \beta}{\omega^2}, \quad b = \frac{-(F_0/z_0) \sin \beta}{\omega}$$

$$D = \frac{G_1 + (M_0/z_0) \cos \delta}{\omega^2}, \quad E = \frac{(M_0/z_0) \sin \delta}{\omega}$$

b. 純縦揺れ

$$\begin{cases} -d\ddot{\theta} - e\dot{\theta} - g_1\theta = F \\ A\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta = M \end{cases}$$

$$\theta = \theta_0 e^{i\omega t}, \quad F = F_0 e^{i(\omega t - \beta')}, \quad M = M_0 e^{i(\omega t - \delta')}$$

とすれば,

$$d = \frac{g_1 + (F_0/\theta_0) \cos \beta'}{\omega^2}, \quad e = \frac{(F_0/\theta_0) \sin \beta'}{\omega}$$

$$A = \frac{C - (M_0/\theta_0) \cos \delta'}{\omega^2}, \quad B = \frac{-(M_0/\theta_0) \sin \delta'}{\omega}$$

ここで, c, g_1, C, G_1 には実験値を用いている。

(3) 係数表

$$a' = \frac{a \cdot g}{W_V} - 1, \quad b' = \frac{b \sqrt{gL_V}}{W_V}, \quad c = \frac{C \cdot L_V}{W_V}$$

$$d' = \frac{d \cdot g}{W_V \cdot L_V}, \quad e' = \frac{e \sqrt{gL_V}}{W_V \cdot L_V}, \quad g_1' = \frac{g_1}{W_V}$$

$$A' = \frac{A \cdot g}{W_V \cdot L_V^2}, \quad B' = \frac{B \sqrt{gL_V}}{W_V \cdot L_V^2}, \quad C' = \frac{C}{W_V \cdot L_V}$$

$$D' = \frac{D \cdot g}{W_V \cdot L_V}, \quad E' = \frac{E \sqrt{gL_V}}{W_V \cdot L_V}, \quad G_1' = \frac{G_1}{W_V}$$

ここで, W_V および L_V は, 各船速での排水量および水線長を用いている (Fig. 3, Fig. 4 参照)。 g は重力加速度 = 9.8 (m/sec²)。

なお, $F_n = V/\sqrt{g \cdot L_p}$ とし, L_p には静止時の水線長を用いている。