船舶技術研究所報告　第30巻　第1号　研究報告（平成5年1月）

海中移動体に働く流体力に関する研究

上野　道雄*、沢田　博史*

A Study on Hydrodynamic Forces Acting on an Underwater Vehicle

by

Michio UENO*, Hiroshi SAWADA*

Abstract

Oblique tow and PMM (Planar Motion Mechanism) tests to measure hydrodynamic forces and moments acting on models of underwater vehicles are carried out in a towing tank. Three fuselages having different ratios of breadth to depth and three sizes of fins are used at the experiment.

Three-dimensional equations of motion for an underwater vehicle including nonlinear hydrodynamic dervatives are presented. Linear and nonlinear hydrodynamic derivatives together with added masses concerning to surging, swaying, heaving, yawing and pitching motions of the models are identified by analyzing the experimental data. Based on the results of the identification, empirical formulae for estimating linear hydrodynamic derivatives and added masses of underwater vehicles are proposed.

目　次

*　運動性能部
原稿受付　平成4年9月1日

1．緒　言

近年、比較的小型の無人潜水艇が数多く開発され、海洋における調査や海中での作業に広く活用されて成果を上げており、今なおその実績を重ねつつある。無人潜水艇には大きく分けて有索式と無索式がある。現段階ではこれらのほとんどが有索，遠隔操縦式[1]であるが、無索式の自律型無人潜水艇[2]も現在精力的に研究開発がおこなわれており、これも現在実用段階にさしかかりつつあると思われる。このように、将来にわたって無人潜水艇がさまざまな用途に使用されるようになっていくことは確実と考えられる。

現在の無人潜水艇には必要な機器を配置したうえでそれに見合うだけの浮力材を加えたような形式のものも多く、流体力学的に見て必ずしも好ましい形状とは言えないものも多い。なかば無尽蔵に索によってエネルギーが艇に供給される場合ならこのような形式も許されるであろうが､次世代の無索広範囲航行型や波浪，潮流等の擾乱域活動型の無人潜水艇を考えると流体力学的な特性を考慮せずに優れた無人潜水艇の開発はないと思われる。

潜水艇は水上の船とは異なり一般に3次元的な操縦運動をおこなう。そのためその流体力の表現は非線形性や各運動モードの連成を考えると水上船舶に比べて複雑なものになると考えられる。また、無人潜水艇は用途によって様々な形状や使用形態すなわち必要とされる運動モードが変わってくると考えられる。さらに、潜水艇の形状は航空機とは異なり一般に主翼がなく胴体も特殊な形状をしていてこれの全体に対する寄与が大きいなどの特徴があるため、設計のための基礎的かつ系統的な情報は現状では極めて少ない。したがって、潜水艇の運動特性を判断する上で線形流体力微係数等の基本的流体力特性を設計初期の段階で推定することは重要であるが、現状では実験によらずに精度良くこれをおこなうことは困難である。

本研究では、このような事実を踏まえた上で無人潜

水艇を一般的な海中移動体としてとらえ、なるべく一般性を失わない海中移動体形状を選んでその流体力特性に関して系統的な情報を主として水槽実験によって得、これを実際の潜水艇の開発に役立つ形で提供することを目的とした。

海中移動体模型は本体と本体後部の縦、横ひれから構成され、推進器等の可動部は含んでいない。それぞれ大きさを変えて3種類製作し、斜航試験とPMM (Planar Motion Mechanism) 試験を実施した。その上で、非線形成分を含んだ形での流体力の記述方法について検討し、これに基づく実験データの解析によって各流体力微係数を求めた。そして、これらのうち付加質量係数と線形の粘性流体力微係数については実験式を提示した。これらの実験データと解析結果はこれからの無人潜水艇の開発にとっての基礎的資料を与えるものである。

2．座標系と運動方程式

2.1 座標系

2.1.1 空間固定座標と海中移動体固定座標

空間固定の座標系を（x_0, y_0, z_0）とし、z_0を鉛直下向きにとる。また、海中移動体に固定の座標系を（x, y, z）とする。（x, y, z）座標系は（x_0, y_0, z_0）座標系からFig.2-1で定義されるオイラー角：（ψ, θ, ϕ）によって決まる座標系である。オイラー角：（ψ, θ, ϕ）を用いて（x_0, y_0, z_0）座標系を（x, y, z）座標系に移

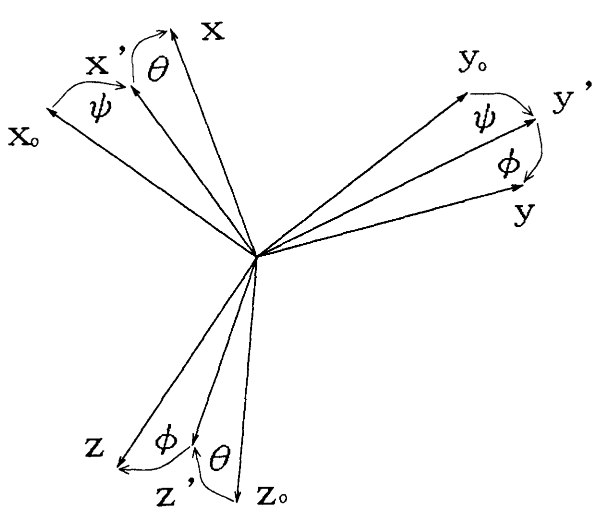

Fig. 2-1　Eurelian Angles

す手順は次のとおりである。まずz_0軸まわりに(x_0, y_0, z_0)座標系を回転させ、x_0軸がz_0軸とx軸とで定まる平面内に含まれるようにする。このときの角度がψであり、この回転によってx_0軸はx'軸に、y_0軸はy'軸に移る。次にy'軸まわりに（x', y', z_0）座標系を回転させてx'軸をx軸に一致させる。このときの角度がθであって、この回転によってz_0軸はz'軸に移る。最後にx軸まわりに（x, y', z'）座標系を回転させてy'軸をy軸に、z'軸をz軸に一致させる。このときの角度がϕである。

以上より、ある点の（x_0, y_0, z_0）座標系と（x, y, z）座標系における位置ベクトルをそれぞれ, $\mathbf{x}_0$, $\mathbf{x}$とすると両者の関係は

$$\mathbf{x}=\mathbf{T}_t\mathbf{x}_0 \tag{2.1}$$

で与えられる。ここで

$$\mathbf{T}_t=\begin{bmatrix} cos\theta cos\psi & cos\theta sin\psi & -sin\theta \\ cos\psi sin\phi sin\theta - sin\psi cos\phi & sin\psi sin\phi sin\theta + cos\psi cos\phi & sin\phi cos\theta \\ cos\psi cos\phi sin\theta + sin\psi sin\phi & sin\psi cos\phi sin\theta - cos\psi sin\phi & cos\theta cos\phi \end{bmatrix} \tag{2.2}$$ 。

$\mathbf{T}_t$の性質として、

$$\mathbf{T}_t^{-1}=\mathbf{T}_t^{\mathrm{T}} \tag{2.3}$$

が成り立つ。ここで、添え字の－１は逆行列を、Tは転置行列を表す。

2.1.2 姿勢と航路

（x_0, y_0, z_0）座標系と（x, y, z）座標系における海中移動体の速度と回転角速度をそれぞれ$\mathbf{u}_0$, $\boldsymbol{\omega}_0$と$\mathbf{u}$, $\boldsymbol{\omega}$と置く。これらの関係は

$$\mathbf{u}_0=\mathbf{T}_t^{-1}\mathbf{u},\ \boldsymbol{\omega}_0=\mathbf{T}_r^{-1}\boldsymbol{\omega} \tag{2.4}$$

で表される。ここで、

$$\mathbf{T}_r=\begin{bmatrix} 1 & 0 & -sin\theta \\ 0 & cos\phi & sin\phi cos\theta \\ 0 & -sin\phi & cos\phi cos\theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_r^{-1}=\begin{bmatrix} 1 & sin\phi tan\theta & cos\phi tan\theta \\ 0 & cos\phi & -sin\phi \\ 0 & sin\phi sec\theta & cos\phi sec\theta \end{bmatrix} \tag{2.5}$$ 。

なお、

$$\boldsymbol{\omega}_0=[\dot{\phi},\ \dot{\theta},\ \dot{\psi}]^{\mathrm{T}} \tag{2.6}$$ 。

ここで、$\dot{}$ は時間微分：$\partial/\partial t$を表す。

以上より、海中移動体の初期状態としての位置と姿勢および$\mathbf{u}$, $\boldsymbol{\omega}$の時刻歴が与えられれば（2.4）式より$\mathbf{u}_0$, $\boldsymbol{\omega}_0$が求められ、これを時間積分することにより海中移動体の任意の時間におけるの位置と姿勢を求める

ことができる。

2.2　3次元運動方程式

静止した無限流体中における海中移動体の3次元運動について考える。ここでは流体は理想流体として扱い、粘性に基づく流体力は外力項として取り扱うこととする。

2.2.1　重力と浮力

重力加速度を g、流体の密度を ρ、海中移動体の質量を m、排水容積を ∇ とする。重力による力とモーメントのベクトルをそれぞれ $\mathbf{G}_f, \mathbf{G}_m$ し、浮力によるこれらを $\mathbf{B}_f, \mathbf{B}_m$ とすると、これらの（x, y, z）座標系における成分は

$$\mathbf{G}_f = \mathrm{mg}\mathbf{T}_t\mathbf{k}_e,\ \mathbf{G}_m = \mathbf{x}_g \times \mathbf{G}_f \tag{2.7}$$

$$\mathbf{B}_f = -\rho g \nabla \mathbf{T}_t\mathbf{k}_e,\ \mathbf{B}_m = \mathbf{x}_b \times \mathbf{B}_f \tag{2.8}$$

で表される。ここで $\mathbf{x}_g$ と $\mathbf{x}_b$ はそれぞれ（x, y, z）座標系における海中移動体の重心と浮心の位置ベクトルであり、

$$\mathbf{k}_e = [0, 0, 1]^{\mathrm{T}} \tag{2.9}$$

である。

重力と浮力による力とモーメントを加えてそれぞれ $\mathbf{S}_f, \mathbf{S}_m$ とすると、これらは

$$\mathbf{S}_f = (m - \rho\nabla) g \mathbf{T}_t\mathbf{k}_e,\ \mathbf{S}_m = (m\mathbf{x}_g - \rho\nabla\mathbf{x}_b) g \times \mathbf{T}_t\mathbf{k}_e \tag{2.10}$$

で表される。

2.2.2　海中移動体固定座標系における運動方程式

Milne-Thomson[3]の方法を基に（x, y, z）座標系での運動方程式を求める。静的流体力：$\mathbf{S}_f, \mathbf{S}_m$ 以外の外力として海中移動体に作用する粘性に基づく力とモーメントをそれぞれ $\mathbf{X}_f, \mathbf{X}_m$ とする。一方、海中移動体の運動エネルギーを T_b とし、流体の運動エネルギーを T_w として、

$$T = T_b + T_w \tag{2.11}$$

で T を定義すると運動方程式は

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \mathbf{u}} + \mathbf{u} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{X}_f + \mathbf{S}_f,$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\omega}} + \mathbf{u} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{u}} + \boldsymbol{\omega} \times \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\omega}} = \mathbf{X}_m + \mathbf{S}_m \tag{2.12}$$

のように表される。

さて、

$$\mathbf{u} = [u_1,\ u_2,\ u_3]^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{\omega} = [u_4,\ u_5,\ u_6]^{\mathrm{T}} \tag{2.13}$$

と置くと、海中移動体の運動エネルギー：T_b は

$$T_b = \frac{1}{2}\sum_{i,\ j=1}^{6}(M_{ij}u_iu_j) \tag{2.14}$$

で表される。M_{ij} は海中移動体の質量を m とし、（x, y, z）座標系における重心の座標を（x_{g1}, x_{g2}, x_{g3}）としたとき

$$[M_{ij}] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mx_{g3} & -mx_{g2} \\ 0 & m & 0 & -mx_{g3} & 0 & mx_{g1} \\ 0 & 0 & m & mx_{g2} & -mx_{g1} & 0 \\ 0 & -mx_{g3} & mx_{g2} & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mx_{g3} & 0 & -mx_{g1} & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -mx_{g2} & mx_{g1} & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix}$$

$$(1 \leqq i,\ j \leqq 6) \tag{2.15}$$

で表される。I_{ij} は海中移動体の慣性モーメント（$i=j$）と慣性乗積（$i \neq j$）を表し、海中移動体の微少部分の質量を dm をとすると、

$$[I_{ij}] = \begin{bmatrix} (y^2+z^2)dm & -xydm & -xzdm \\ -yxdm & (z^2+x^2)dm & -yzdm \\ -zxdm & -zydm & (x^2+y^2)dm \end{bmatrix}$$

$$(1 \leqq i,\ j \leqq 3) \tag{2.16}$$

で定義される。

一方、流体の運動エネルギー：T_w は

$$T_w = \frac{1}{2}\sum_{i,\ j=1}^{6}(m_{ij}u_iu_j) \tag{2.17}$$

で表される。m_{ij} は流体による付加質量，付加慣性モーメント，付加慣性乗積で、

$$m_{ij} = \rho\Phi_j\frac{\partial \Phi_i}{\partial n}dS_b \tag{2.18}$$

で定義される。ここで、積分範囲：S_b は海中移動体表面を表し、n は海中移動体表面における移動体内向きを正とする法線方向を表す。また Φ_i は流場の速度ポテンシャルを Φ としたとき

$$\Phi = \sum_{i=1}^{6} u_i\Phi_i \tag{2.19}$$

で表される。なお、理想流体中では

$$m_{ij} = m_{ji} \tag{2.20}$$

である。

（2.14）式から（2.20）式までを考慮し、さらに、

$$\mathbf{X}_f = [X_1,\ X_2,\ X_3]^{\mathrm{T}},\ \mathbf{X}_m = [X_4,\ X_5,\ X_6]^{\mathrm{T}} \tag{2.21}$$

$$\mathbf{S}_f = [S_1,\ S_2,\ S_3]^{\mathrm{T}},\ \mathbf{S}_m = [S_4,\ S_5,\ S_6]^{\mathrm{T}} \tag{2.22}$$

と置いて（2.12）式を表すと、最終的に海中移動体固定座標系における運動方程式は

$$m\left(\begin{bmatrix} \dot{u}_1 + (x_{g3}\dot{u}_5 - x_{g2}\dot{u}_6) \\ \dot{u}_2 + (x_{g1}\dot{u}_6 - x_{g3}\dot{u}_4) \\ \dot{u}_3 + (x_{g2}\dot{u}_4 - x_{g1}\dot{u}_5) \end{bmatrix}\right.$$

$$+\begin{bmatrix} -x_{g1}(u_5{}^2+u_6{}^2)+(x_{g2}u_5+x_{g3}u_6)u_4 \\ -x_{g2}(u_6{}^2+u_4{}^2)+(x_{g3}u_6+x_{g1}u_4)u_5 \\ -x_{g3}(u_4{}^2+u_5{}^2)+(x_{g1}u_4+x_{g2}u_5)u_6 \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} u_5u_3-u_6u_2 \\ u_6u_1-u_4u_3 \\ u_4u_2-u_5u_1 \end{bmatrix}\Bigg)\Bigg]+\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} m_{1i}\dot{u}_i \\ \sum_{i=1}^{6} m_{2i}\dot{u}_i \\ \sum_{i=1}^{6} m_{3i}\dot{u}_i \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} u_5\sum_{i=1}^{6} m_{3i}u_i-u_6\sum_{i=1}^{6} m_{2i}u_i \\ u_6\sum_{i=1}^{6} m_{1i}u_i-u_4\sum_{i=1}^{6} m_{3i}u_i \\ u_4\sum_{i=1}^{6} m_{2i}u_i-u_5\sum_{i=1}^{6} m_{1i}u_i \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} X_1+S_1 \\ X_2+S_2 \\ X_3+S_3 \end{bmatrix},$$

$$m\begin{bmatrix} x_{g2}\dot{u}_3-x_{g3}\dot{u}_2 \\ x_{g3}\dot{u}_1-x_{g1}\dot{u}_3 \\ x_{g1}\dot{u}_2-x_{g2}\dot{u}_1 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} I_{11}\dot{u}_4+I_{12}\dot{u}_5+I_{13}\dot{u}_6 \\ I_{12}\dot{u}_4+I_{22}\dot{u}_5+I_{23}\dot{u}_6 \\ I_{13}\dot{u}_4+I_{23}\dot{u}_5+I_{33}\dot{u}_6 \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{6} m_{4i}\dot{u}_i \\ \sum_{i=1}^{6} m_{5i}\dot{u}_i \\ \sum_{i=1}^{6} m_{6i}\dot{u}_i \end{bmatrix}$$

$$+m\begin{bmatrix} x_{g2}(u_4u_2-u_5u_1)+x_{g3}(u_4u_3-u_6u_1) \\ x_{g3}(u_5u_3-u_6u_2)+x_{g1}(u_5u_1-u_4u_2) \\ x_{g1}(u_6u_1-u_4u_3)+x_{g2}(u_6u_2-u_5u_3) \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} u_5(I_{13}u_4+I_{23}u_5+I_{33}u_6)-u_6(I_{12}u_4+I_{22}u_5+I_{23}u_6) \\ u_6(I_{11}u_4+I_{12}u_5+I_{13}u_6)-u_4(I_{13}u_4+I_{23}u_5+I_{33}u_6) \\ u_4(I_{12}u_4+I_{22}u_5+I_{23}u_6)-u_5(I_{11}u_4+I_{12}u_5+I_{13}u_6) \end{bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} u_2\sum_{i=1}^{6} m_{3i}u_i-u_3\sum_{i=1}^{6} m_{2i}u_i+u_5\sum_{i=1}^{6} m_{6i}u_i-u_6\sum_{i=1}^{6} m_{5i}u_i \\ u_3\sum_{i=1}^{6} m_{1i}u_i-u_1\sum_{i=1}^{6} m_{3i}u_i+u_6\sum_{i=1}^{6} m_{4i}u_i-u_4\sum_{i=1}^{6} m_{6i}u_i \\ u_1\sum_{i=1}^{6} m_{2i}u_i-u_2\sum_{i=1}^{6} m_{1i}u_i+u_4\sum_{i=1}^{6} m_{5i}u_i-u_5\sum_{i=1}^{6} m_{4i}u_i \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} X_4+S_4 \\ X_5+S_5 \\ X_6+S_6 \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

と表される。

なお、次章以降では、

$$\mathbf{x}_g=[x_g,\ y_g,\ z_g]^{\mathrm{T}} \tag{2.24}$$

$$\mathbf{u}=[u,\ v,\ w]^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{\omega}=[p,\ q,\ r]^{\mathrm{T}} \tag{2.25}$$

$$\mathbf{X}_f=[X,\ Y,\ Z]^{\mathrm{T}},\ \mathbf{X}_m=[L,\ M,\ N]^{\mathrm{T}} \tag{2.26}$$

の記号で各成分を記すこととする。

3．水槽実験

3.1 海中移動体模型

実験に用いた海中移動体模型は Fig.3–1に示すように本体と本体後部の縦，横各１対のひれから構成される。本体，ひれともに形状あるいは大きさを変えて各３種類製作した。

本体はいずれも長さ (L) と深さ (D) が同じで幅 (B) のみが異なる形状である。外形は主流方向のはっきりした流線型とするために $NACA$ 4桁の翼型[4)]を変形して最大幅と最大深さが先端から長さの40%の位置となる次式で表される形状とした。

$$b(\xi)=\frac{B}{2}f(\xi),\ d(\xi)=\frac{D}{2}f(\xi) \tag{3.1}$$

ただし、

$$f(\xi)=a_0\frac{\xi}{L}+a_1\frac{\xi}{L}+a_2\left(\frac{\xi}{L}\right)^2+a_3\left(\frac{\xi}{L}\right)^3+a_4\left(\frac{\xi}{L}\right)^4$$

$$(0\leqq\xi\leqq L),$$

$$a_0=1.6505,\ a_1=1.0611,\ a_2=-2.7297,$$

$$a_3=-0.8341,\ a_4=0.8521 \tag{3.2}$$

ここで ξ は本体先端から後向きにとった距離を、$b(\xi)$，$d(\xi)$ はそれぞれ各 ξ 位置での半幅，半深さを表す。横断面形状は大型本体ではいたるところで円形、他の２機はいたるところで各位置の半深さと半幅をそれぞれ長径と短径とする楕円形である。本体の浮心位置はいずれも先端から長さの43.2%のところにある。本体の排水容積は小さいものから0.01679m³，0.02518 m³，0.03357m³である。以下この順で小型本体（fuselage–S)，中型本体(fuselage–M)，大型本体(fuselage –L）と呼ぶ。

ひれの形状は Fig.3–1に示すとおりいずれも片側が台形で互いに相似形である。これらのひれは取り外しができ、本体との組み合わせを自由に変えることができる。ここでも３種類のひれを小型ひれ(fin–S)，中型ひれ（fin–M)，大型ひれ（fin–L）と呼ぶ。

模型の各状態における基本的な要目をそれぞれ Table 3–1，Table 3–2，Table 3–3に示す。表中の L，B，D は本体単独の値、A_y，A_zはひれと本体のそれぞれ xz 平面，xy 平面への投影面積、x_{fc}はひれの面積中心の x 座標である。慣性モーメント：I_{22}，I_{33}は実験状態にあるもののみを記した。

3.2 模型の内部構造と設置状態

模型の設置状態の概略を Fig.3–2に示す。海中移動

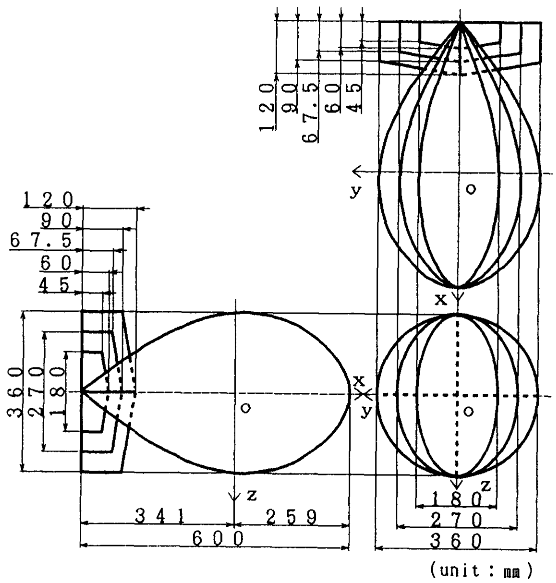

Fig. 3-1 Models of Underwater Vehicles

Table 3-1 Principal Dimensions (fuselage-S)

fuselage type	fuselage-S						
L(m)	0.600						
B(m)	0.180						
D(m)	0.360						
wetted area(m^2)	0.35727						
fin condition	w/o fin	witn vertical fin			with horizontal fin		
fin type	—	fin-S	fin-M	fin-L	fin-S	fin-M	fin-L
fin span(m)	—	0.180	0.270	0.360	0.180	0.270	0.360
fin area(m^2)	0.	0.00708	0.01593	0.02833	0.00819	0.01843	0.03276
∇(m^3)	0.01679	0.01682	0.01687	0.01694	0.01683	0.01689	0.01697
$m \cdot g$(kg)	16.15	16.26	16.31	16.37	16.15	16.31	16.37
x_g(m)	0.0045	0.0022	0.0016	0.0008	0.0022	0.0016	0.0008
I_{22}(kg·m·s²)	0.03340	—	—	—	0.03463	0.03484	0.03507
I_{33}(kg·m·s²)	0.02971	0.03094	0.03115	0.03138	—	—	—
A_y(m^2)	0.14743	0.15451	0.16336	0.17576	0.14743	0.14743	0.14743
A_z(m^2)	0.07371	0.07371	0.07371	0.07371	0.08190	0.09214	0.10647
x_{fc}(m)	—	-0.3213	-0.3115	-0.3016	-0.3182	-0.3069	-0.2955

nb: A_y :Projected Area on xz-plane
A_z :Projected Area on xy-plane
x_{fc} :x coordinate of center of fin area

Table 3-2 Principal Dimensions (fuselage-M)

fuselage type	fuselage-M						
L (m)	0.600						
B (m)	0.270						
D (m)	0.360						
wetted area(m^2)	0.40754						
fin condition	w/o fin	with vertical fin			with horizontal fin		
fin type	—	fin-S	fin-M	fin-L	fin-S	fin-M	fin-L
fin span(m)	—	0.180	0.270	0.360	0.180	0.270	0.360
fin area(m^2)	0.	0.00708	0.01593	0.02833	0.00761	0.01713	0.03046
∇ (m^3)	0.02518	0.02521	0.02526	0.02533	0.02522	0.02527	0.02534
$m \cdot g$ (kg)	24.34	24.45	24.50	24.56	24.45	24.50	24.56
x_g (m)	0.0016	0.0001	-0.0003	-0.0009	0.0001	-0.0003	-0.0009
I_{22} (kg·m·s²)	0.06130	—	—	—	0.06253	0.06274	0.06297
I_{33} (kg·m·s²)	0.04450	0.04573	0.04594	0.04617	—	—	—
A_y (m²)	0.14743	0.15451	0.16336	0.17576	0.14743	0.14743	0.14743
A_z (m²)	0.11057	0.11057	0.11057	0.11057	0.11818	0.12770	0.14103
x_{fc} (m)	—	-0.3213	-0.3115	-0.3016	-0.3198	-0.3093	-0.2987

nb: A_y :Projected Area on xz-plane
A_z :Projected Area on xy-plane

Table 3-3 Principal Dimensions (fuselage-L)

fuselage type	fuselage-L						
L (m)	0.600						
B (m)	0.360						
D (m)	0.360						
wetted area(m^2)	0.46339						
fin condition	w/o fin	with vertical fin			with horizontal fin		
fin type	—	fin-S	fin-M	fin-L	fin-S	fin-M	fin-L
fin span(m)	—	0.180	0.270	0.360	0.180	0.270	0.360
fin area(m^2)	0.	0.00708	0.01593	0.02833	0.00708	0.01593	0.02833
∇ (m^3)	0.03357	0.03360	0.03365	0.03372	0.03360	0.03365	0.03372
$m \cdot g$ (kg)	33.11	33.22	33.27	33.33	33.11	33.27	33.33
x_g (m)	0.0049	0.0038	0.0035	0.0031	0.0038	0.0035	0.0031
I_{22} (kg·m·s²)	0.06050	—	—	—	0.06173	0.06194	0.06217
I_{33} (kg·m·s²)	0.06050	0.06173	0.06194	0.06217	—	—	—
A_y (m²)	0.14743	0.15451	0.16336	0.17576	0.14743	0.14743	0.14743
A_z (m²)	0.14743	0.14743	0.14743	0.14743	0.15451	0.16336	0.17576
x_{fc} (m)	—	-0.3213	-0.3115	-0.3016	-0.3213	-0.3115	-0.3016

nb: A_y :Projected Area on xz-plane
A_z :Projected Area on xy-plane
x_{fc} :x coordinate of center of fin area

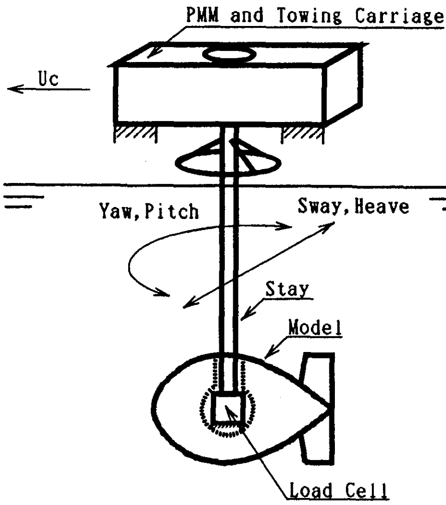

Fig. 3-2 Arrangement of Towing Test

体模型は本体中央部に空洞を持たせて、そこに防水型検力計を固定できるようにした。そして模型はこの検力計を介して直径48.6(mm)の支柱に固定され、これが水上の装置によって支持されるようにした。

模型は縦，横いずれの状態でも設置することができるようにした。したがって、実験に使用した装置は水平面内の斜航角、あるいは水平面内の強制運動を模型に与えるものであるが、前述のように各模型は縦と横の状態で設置することができるので、相対的に模型に対して水平面内と垂直面内の運動モードを与えることができる。なお、各実験において、模型の縦状態では横ひれを付けない状態で、また横状態では縦ひれを付けない状態でおこなった。

実験の種類については後述するが、模型の浮心までの水深は斜航試験では約1.7 (m) である。この斜航試験で支柱の剛性が不足していることが判明したので、PMM 試験ではこの支柱を改造し水深は約1.2 (m) とした。また、PMM 試験の場合には海中移動体模型の水中重量に相当するだけの円筒型の浮体を支柱の水面付近に設置した。この浮体の喫水は約10 (cm) である。Fig.3-3に海中移動体模型を支柱に取り付けた状態の例を示す。この図中の支柱には円筒型の浮体が取り付けられている。

Fig.3-3に示すように、模型を支持する支柱は模型上部から出て水面上に達する。支柱下端にある模型内部の防水型検力計によって力を計測しているため、この支柱に働く流体力は計測されない。ただ、模型周辺の流場を乱すという意味で、計測される流体力には原理的にこの支柱の影響があると考えられるが、その影響は小さいと考えて、データ解析に際しては特別な配慮はおこなわなかった。また、後述する実験結果にも見られるように、自由表面の影響は無視できる程度であると考えられる。

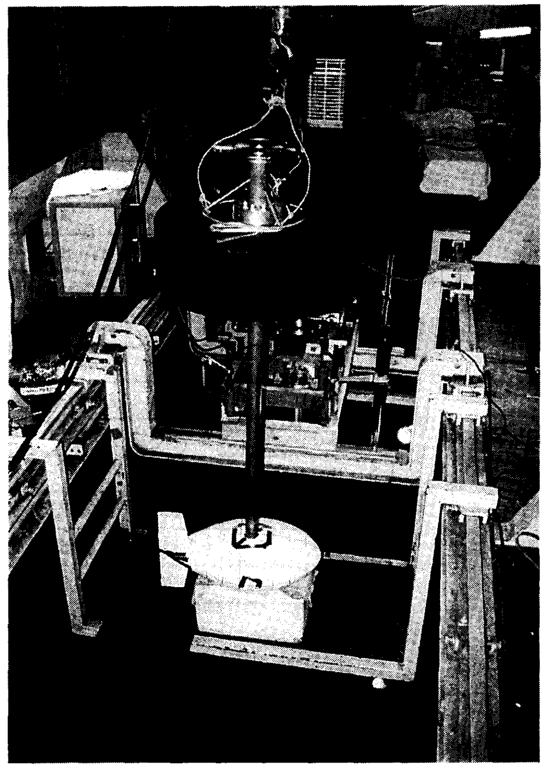

Fig. 3-3 An Underwater Vehicle Model Attached to a Stay with a Float

検力計のための模型内部の空洞には検力計以外の部分に若干の水が満たされていることになるため、PMM 試験を考えた場合、回転運動をさせた場合に計測値にその部分の水の影響が出ると考えられる。このことを考慮して、Table 3-1, Table 3-2, Table 3-3に示した模型固有の慣性モーメントは、模型内部に水を満たした状態で計測した値である。しかし、これらの値を計測した時の揺れの周波数 (ω) は約4.5 (rad/s) であって、実際の PMM 試験の周波数（最大1.5 (rad/s)）よりも大きいため、回転運動を与えた場

合にはこの影響が残る可能性がある。したがって、回転運動と並進運動を与えた場合で同種の流体力成分が計測される場合には後者の計測値の方が精度が高いと考えられる。

3.3 実験の種類と計測項目

水槽実験は合計3回実施した。最初は斜航試験である。続く2回はPMM試験である。ただし、今回は実験装置の関係で横揺れに関する実験だけは実施していない。

3.3.1 斜航試験

斜航試験状態をTable 3-4に示す。横流れ角 (ψ) と迎え角 (θ) の変化に対する定常流体力を計測した。横流れ角と迎え角の正方向はそれぞれ z 軸、y 軸まわりのモーメントと同じ方向とする。大型本体の場合は本体形状が x 軸に関して回転対称であるから横流れ角を変化させた場合と迎え角を変化させた場合は同じ状態を表す。

Table 3-4-1 Oblique Towing Test Condition (Oblique angle : ψ)

towing speed	0.3～0.6(m/s)			
depth of c.b.	1.7(m)			
obilque angle	ψ:-10～190(deg)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○		○	○
fuselage-M	○	○	○	○
fuselage-L	○		○	○

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・ ○:exp. condition

Table 3-4-2 Oblique Towing Test Condition (Oblique angle : θ)

towing speed	0.3～0.6(m/s)			
depth of c.b.	1.7(m)			
obilque angle	θ:-10～190(deg)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○		○	○
fuselage-M	○		○	○
fuselage-L	○		○	○

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・ ○:exp. condition

斜航角は海中移動体の運動の範囲が後進までも含む場合を考慮して幅広く変化させた。この斜航角範囲は取付治具の都合で正側には0～45度，80～130度，170～180度、負側には0～－10度，－50～－80度，－135～－180度とした。実験データの整理にあたっては、縦，横のいずれの状態に関しても模型の対称性を考慮してデータは斜航角－10～190度の範囲の値に変換して整理した。また、計測された力とモーメントが曳航速度の2乗に比例すると仮定して曳航速度0.5 (m/s)の場合の値に変換して整理して後述の解析に用いた。

3.3.2 PMM試験

PMM試験は合計2回実施した。第1回と第2回のPMM試験状態をそれぞれTable 3-5とTable 3-6に示す。PMM試験では斜航試験とは異なり、模型に正弦的な運動をさせることによって非定常な流体力特性を求めることができる。

Table 3-5-1 No.1 PMM Test Condition (P. Sway)

mode	Pure Sway			
towing speed	0.5(m/s)			
depth of c.b.	1.2(m)			
frequency	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5(r/s)			
amplitude	0.08, 0.11, 0.14(m)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○			○
fuselage-M	○			○
fuselage-L	○		○	○

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・ ○:exp. condition

Table 3-5-2 No.1 PMM Test Condition (P. Heave)

mode	Pure Heave			
towing speed	0.5(m/s)			
depth of c.b.	1.2(m)			
frequency	0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5(r/s)			
amplitude	0.08, 0.11, 0.14(m)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○		○	○
fuselage-M	○		○	○
fuselage-L	○		○	○

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・ ○:exp. condition

Table 3-6-1 No.2 PMM Test Condition (P. Sway. P. Heave)

mode	Pure Sway, Pure Heave			
towing speed	0.5, 0.3, 0.0(m/s)			
depth of c.b.	1.2(m)			
frequency	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50(r/s)			
amplitude	0.12(m)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○			○
fuselage-M	○			○
fuselage-L	◎			◎

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・○◎:exp. condition
・○:speed 0.5m/s, 0.0m/s
・◎:speed 0.5m/s, 0.3m/s, 0.0m/s

Table 3-6-2 No.2 PMM Test Condition (P. Yaw. P. Pitch)

mode	Pure Yaw, Pure Pitch			
towing speed	0.5, 0.3, 0.0(m/s)			
depth of c.b.	1.2(m)			
frequency	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50(r/s)			
amplitude	10(deg)(speed:0.5, 0.3m/s) 20, 40(deg)(speed:0.0m/s)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○			○
fuselage-M	○			○
fuselage-L	◎			◎

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・○◎:exp. condition
・○:speed 0.5m/s, 0.0m/s
・◎:speed 0.5m/s, 0.3m/s, 0.0m/s

第1回PMM試験では強制動揺装置を用いた。この装置では並進運動しか与えられないため、Pure Sway と Pure Heave 状態を実施した。第1回PMM試験では前進速度のある場合のみを実施した。

第2回PMM試験では既存の簡易PMM試験装置を用いた。この時は Pure Surge, Pure Sway, Pure Heave, Pure Yaw, Pure Pitch,の各状態を実施したほか、Sway と Yaw および Heave と Pitch の Combined Motion も実施した。この Combined Motion は海中移動体模型を一定速度で直線的に曳航しつつ横流れ角あるいは迎え角を正弦的に変化させるモードである。第2回PMM試験では各状態の前進速度のある場合とない場合を実施した。ただし、Pure Surge 状態は前進速度のない場合のみである。

Table 3-6-3 No.2 PMM Test Condition (Combined Motion)

mode	Combined Motion (Sway & Yaw, Heave & Pitch)			
towing speed	0.5, 0.3(m/s)			
depth of c.b.	1.2(m)			
frequency(ω)	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50(r/s)			
Yaw, Pitch amp.	20, 40(deg)			
fin type	w/o fin	fin-S	fin-M	fin-L
fuselage-S	○			○
fuselage-M	○			○
fuselage-L	◎			◎

nb: ・c.b.:center of buoyancy
・○◎:exp. condition
・○:speed 0.5m/s
・◎:speed 0.5m/s, 0.3m/s

PMM試験結果の解析にあたっては、得られた流体力をフーリエ解析することによって必要とする成分を求めた。フーリエ解析の基本周波数には強制運動の周波数を用いた。

なお、PMM試験に用いた試験装置は小型の簡易的な装置であって強制変位に連動して模型の曳航速度を変化させることができないため Pure Yaw や Pure Pitch のような場合も海中移動体模型は速度一定で曳航した。したがって、これらのモードの場合には変位の振幅を大きくできないという制約がある。

3.3.3 抵抗試験

第2回PMM試験を実施した際に、直進状態の抵抗試験も実施した。前進速度は0.2 (m/s) から0.6 (m/s) までの範囲で変化させた。小型本体と中型本体については縦と横の状態の本体単独状態と大型ひれ付き状態を実施した。大型本体についても本体単独状態と大型ひれ付き状態を実施した。

中型本体の縦と横の状態の結果に海中移動体模型と支柱の製作精度が原因と思われる若干の差が見られたほかは、ひれの有無に基づく有意な差は認められなかった。解析にあたってはこれらの実験データの平均値を用いた。

3.3.4 計測項目

模型固定の座標系を Fig.3-1のように原点を浮心位置に取り、x 軸, y 軸, z 軸をそれぞれ前方向, 右方向, 下方向に取る。各軸方向の力を X, Y, Z、各軸まわり

のモーメントを L, M, N とする。計測項目は模型の縦状態の場合は X, Y, N、横状態の場合は X, Z, M である。計測した力とモーメントは本体あるいは本体とひれを含めた模型全体に働くものである。無次元化に関しては、質量，加速度，長さ，時間をそれぞれ $\rho\nabla$, g, L, $\sqrt{Lg}$ でおこなった。これらに従い、力，速度はそれぞれ $\rho\nabla g$, $\sqrt{Lg}$ でおこなった。ここで、∇ には本体単独の値のみを用いた。

4．実験状態対応の運動方程式

2で述べた3次元運動方程式を基に、今回の水槽実験結果の解析の基礎となる運動方程式を海中移動体模型に対応した形で求める。

4.1 式の構成成分

4.1.1 付加質量

海中移動体模型は実験の各状態で上下，左右が対称である。したがって、(2.18) 式の付加質量に関して

$$m_{12}=m_{21}=0,\ m_{13}=m_{31}=0,\ m_{14}=m_{41}=0、m_{15}=m_{51}=0,$$
$$m_{16}=m_{61}=0,\ m_{23}=m_{32}=0,\ m_{24}=m_{42}=0,\ m_{25}=m_{52}=0,$$
$$m_{34}=m_{43}=0,\ m_{36}=m_{63}=0,\ m_{45}=m_{46}=0,\ m_{56}=m_{65}=0 \tag{4.1}$$

が成立する。

この形状の実機を考えた場合は、座標原点は本体の浮心位置に取っているから、静的な釣合条件より

$$y_g=0 \tag{4.2}$$

でなくてはならない。ただし、実験時は模型は拘束されているので (4.2) 式を満足している必要はない。

4.1.2 静的流体力

海中移動体模型は縦あるいは横に設置した静止状態を基準としており、海中移動体模型に与える運動はすべて水平面内にある。したがって、(2.23)式において、

$$S_1=S_2=S_3=S_4=S_5=S_6=0 \tag{4.3}$$

とおいてよい。

4.1.3 強制力

(2.23) 式の外力項では静的流体力と粘性に基づく流体力以外は考慮されていないが、今回の水槽試験のような拘束模型試験では強制力を外力項として考慮する必要がある。このような外力は直接計測される力とモーメントとして現れるから、便宜上横揺れモーメントも含めて計測される力とモーメントを $\hat{X}$, $\hat{Y}$, $\hat{Z}$, $\hat{L}$, $\hat{M}$, $\hat{N}$ とおくと、(4.3) 式も考慮して最終的に (2.23) 式の右辺はそれぞれ $[X-\hat{X},\ Y-\hat{Y},\ Z-\hat{Z}]^{\mathrm{T}}$, $[L-\hat{L},\ M-\hat{M},\ N-\hat{N}]^{\mathrm{T}}$ で置き換えられる。

4.1.4 粘性流体力の記述

粘性に基づく流体力の記述方法は各種考案されているが、ここでは定常直進状態、すなわち

$$[u,\ v,\ w,\ p,\ q,\ r]^{\mathrm{T}}=[\bar{u},\ 0,\ 0,\ 0,\ 0,\ 0]^{\mathrm{T}} \tag{4.4}$$

を基準とした流体力の Taylor 展開[5]による方法を基本にする。ここで $\bar{u}$ は定常直進時の前進速度を表す。また、海中移動体模型の上下，左右対称な形状を考慮し、横揺れ運動に関する項を除いて粘性流体力の記述を考えることとする。

海中移動体の速度成分を定常直進状態からの速度の微少変動分を Δu 等と表して、

$$[u,\ v,\ w,\ p,\ q,\ r]^{\mathrm{T}}=[\bar{u}+\Delta u,\ \Delta v,\ \Delta w,\ \Delta p,\ \Delta q,\ \Delta r]^{\mathrm{T}} \tag{4.5}$$

と表す。加速度に関する項は既に付加質量項として運動方程式中に考慮されているから、速度に関する多項式で粘性流体力を表すことにする。対称性を考慮して速度の3乗の項まで取り、

$$\begin{aligned}
X&=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u\\
&\quad+X_{vv}\Delta v^2+X_{vr}\Delta v\Delta r+X_{rr}\Delta r^2+X_{ww}\Delta w^2\\
&\quad+X_{wq}\Delta w\Delta q+X_{qq}\Delta q^2,\\
Y&=Y_v\Delta v+Y_r\Delta r+Y_{vvv}\Delta v^3+Y_{vvr}\Delta v^2\Delta r\\
&\quad+Y_{vrr}\Delta v\Delta r^2+Y_{rrr}\Delta r^3,\\
Z&=Z_w\Delta w+Z_q\Delta q+Z_{www}\Delta w^3+Z_{wwq}\Delta w^2\Delta q\\
&\quad+Z_{wqq}\Delta w\Delta q^2+Z_{qqq}\Delta q^3,\\
M&=M_w\Delta w+M_q\Delta q+M_{www}\Delta w^3+M_{wwq}\Delta w^2\Delta q\\
&\quad+M_{wqq}\Delta w\Delta q^2+M_{qqq}\Delta q^3,\\
N&=N_v\Delta v+N_r\Delta r+N_{vvv}\Delta v^3+N_{vvr}\Delta v^2\Delta r\\
&\quad+N_{vrr}\Delta v\Delta r^2+N_{rrr}\Delta r^3
\end{aligned} \tag{4.6}$$

のように各流体力微係数を用いて表す。ここで X_0 は定常直進時の前後方向の力を表し、

$$\bar{X}(\bar{u})=X_0\bar{u}^2 \tag{4.7}$$

と表すこととする。また、

$$X_u=\frac{\partial X}{\partial u},\quad X_{vv}=\frac{1}{2!}\ \frac{\partial^2 X}{\partial v^2},\quad Y_{vvv}=\frac{1}{3!}\ \frac{\partial^3 Y}{\partial v^3},\ \cdots\cdots \tag{4.8}$$

である。

さて、前述のように今回の簡易 PMM 試験装置では大振幅の Pure Yaw や Pure Pitch の運動モードが実施できないため、非線形特性を計測する意味において実験精度が不十分となると考えられる。このような実験データを解析するために (4.6) 式の定性的傾向を維持させながら次数を1つ減らした近似式として

$$\begin{aligned}
X&=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{vv}\Delta v^2+X_{ur}\Delta v\Delta r+X_{rr}\Delta r^2\\
&\quad+X_{ww}\Delta w^2+X_{wq}\Delta w\Delta q+X_{qq}\Delta q^2,
\end{aligned}$$

$$Y=Y_v\Delta v+Y_r\Delta r+Y_{v|v|}\Delta v|\Delta v|+Y_{|v|r}|\Delta v|\Delta r+Y_{v|r|}\Delta v|\Delta r|+Y_{r|r|}\Delta r|\Delta r|,$$

$$Z=Z_w\Delta w+Z_q\Delta q+Z_{w|w|}\Delta w|\Delta w|+Z_{|w|q}|\Delta w|\Delta q+Z_{w|q|}\Delta w|\Delta q|+Z_{q|q|}\Delta q|\Delta q|,$$

$$M=M_w\Delta w+M_q\Delta q+M_{w|w|}\Delta w|\Delta w|+M_{|w|q}|\Delta w|\Delta q+M_{w|q|}\Delta w|\Delta q|+M_{q|q|}\Delta q|\Delta q|,$$

$$N=N_v\Delta v+N_r\Delta r+N_{v|v|}\Delta v|\Delta v|+N_{|v|r}|\Delta v|\Delta r+N_{v|r|}\Delta v|\Delta r|+N_{r|r|}\Delta r|\Delta r| \quad (4.9)$$

を実験データ解析の基礎式とすることとした。

(4.9) 式中の絶対値を含んだ項は従来 Cross Flow Drag の考え方から導かれたものに相当すると考えられる。しかし、通常の船舶の運動方程式に用いられる操縦流体力微係数としては、たとえば y 軸方向の運動方程式において $Y_{|v|r}$ と $Y_{v|r|}$ の項が同時に用いられることはないようであるが、ここでは海中移動体の運動に一般性を持たせる意味で両方の項を同時に考慮することとする。また、このことは上述のような Taylor 展開の次数の低減化の考え方や Cross Flow Drag の考え方からも妥当であると考えられる。

4.2 実験と流体力微係数の対応

海中移動体固定の xyz 座標系は軸を前方向に、z 軸を下方向にとるものとする。空間固定の $x_0y_0z_0$ 座標系は x_0 軸を模型の曳航方向にとり、海中移動体模型が縦状態の場合は z 軸と同じく z_0 軸を鉛直下向きに、横状態の場合も z 軸と同じ方向の水平面内の向きにとるものとする。

4.2.1 抵抗試験

抵抗試験では x 方向のみの運動方程式を考えればよい。これは、

$$0=X_0\bar{u}^2-\hat{X} \quad (4.10)。$$

また、定義より

$$X_u=2\ X_0\bar{u} \quad (4.11)。$$

4.2.2 斜航試験

まず、横流れ角を変化させる斜航試験を考える。横流れ角を ψ で表し、曳航速度を $U_c(\geqq 0)$ で表すこととする。このとき

$$\begin{aligned}u&=U_c\cos\psi\\&=U_c-\frac{1}{2}U_c\psi^2+O(\psi^4),\\v&=-U_c\sin\psi\\&=-U_c\psi+\frac{1}{6}U_c\psi^3+O(\psi^5),\\w&=p=q=r=0\end{aligned} \quad (4.12)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c,\ \Delta u=-\frac{1}{2}U_c\psi^2+O(\psi^4),$$
$$\Delta v=-U_c\psi+O(\psi^3),\ \Delta w=\Delta q=\Delta r=0 \quad (4.13)。$$

x 軸方向，y 軸方向，z 軸まわりの運動方程式を考えると、

$$0=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{vv}\Delta v^2-\hat{X},$$
$$0=Y_v\Delta v+Y_{v|v|}\Delta v|\Delta v|-\hat{Y},$$
$$(m_{22}-m_{11})uv=N_v\Delta v+N_{v|v|}\Delta v|\Delta v|-\hat{N} \quad (4.14)。$$

斜航試験時は定常状態にあるから、今、ψ が正の場合を考えることとし、(4.12) 式，(4.13) 式を (4.14) 式に代入して $O(\psi^2)$ まで考慮すると、

$$\hat{X}=\bar{X}(\bar{u})+(-\frac{1}{2}X_u+U_cX_{vv})\ U_c\psi^2,$$
$$\hat{Y}=-Y_vU_c\psi-Y_{v|v|}U_c^2\psi^2,$$
$$\hat{N}=-\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}U_c\psi-N_{v|v|}U_c^2\psi^2 \quad (4.15)。$$

同様に、迎え角を変化させる斜航試験の場合は、迎え角を θ で表すと、

$$\begin{aligned}u&=U_c\cos\theta\\&=U_c-\frac{1}{2}U_c\theta^2+O(\theta^4),\\w&=U_c\sin\theta\\&=U_c\theta-\frac{1}{6}U_c\theta^3+O(\theta^5),\\v&=p=q=r=0\end{aligned} \quad (4.16)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c,\ \Delta u=-\frac{1}{2}U_c\theta^2+O(\theta^4),$$
$$\Delta w=U_c\theta+O(\theta^3),\ \Delta v=\Delta q=\Delta r=0 \quad (4.17)。$$

x 軸方向，z 軸方向，y 軸まわりの運動方程式は、

$$0=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{ww}\Delta w^2-\hat{X},$$
$$0=Z_w\Delta w+Z_{w|w|}\Delta w|\Delta w|-\hat{Z},$$
$$-(m_{33}-m_{11})uw=M_w\Delta w+M_{w|w|}\Delta w|\Delta w|-\hat{M} \quad (4.18)。$$

同じく、θ が正の場合を考えることとし、(4.16)式，(4.17) 式を (4.18) 式に代入して $O(\theta^2)$ まで考慮すると、

$$\hat{X}=\bar{X}(\bar{u})+(-\frac{1}{2}X_u+U_cX_{ww})U_c\theta^2,$$
$$\hat{Z}=Z_wU_c\theta+Z_{w|w|}U_c^2\theta^2,$$
$$\hat{M}=\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}\ U_c\theta+M_{w|w|}U_c^2\theta^2$$

(4.19)。

4.2.3 PMM試験

(1) Pure Surge 試験

Pure Surge 試験は $U_c=0$ でおこなった。強制運動の変位を

$$x=x_a sin\omega t \tag{4.20}$$

と表すと、

$$u=\dot{x}$$
$$=\omega x_a cos\omega t,$$
$$v=w=p=q=r=0 \tag{4.21}$$

すなわち、

$$\bar{u}=0,\ \Delta u=\omega x_a cos\omega t,$$
$$\Delta v=\Delta w=\Delta q=\Delta r=0 \tag{4.22}$$

x 軸方向の運動方程式を考えると、

$$(m+m_{11})\dot{u}=X_u\Delta u-\hat{X} \tag{4.23}$$

したがって、

$$\hat{X}=(m+m_{11})\omega^2 x_a sin\omega t+X_u\omega x_a cos\omega t \tag{4.24}$$

計測される力を

$$\hat{X}=\hat{X}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{X}_{si}sini\omega t-\hat{X}_{ci}cosi\omega t) \tag{4.25}$$

で表すと、

$$\hat{X}_{s1}=(m+m_{11})\omega^2 x_a、\hat{X}_{c1}=-X_u\omega x_a \tag{4.26}$$

(2) Pure Sway, Pure Heave 試験

まず、Pure Sway 試験について考える。Pure Sway 試験は海中移動体模型を一定速度 U_c で曳航しつつ、

$$y=y_a sin\omega t \tag{4.27}$$

なる変位を与えるものである。このとき、

$$u=U_c,$$
$$v=\dot{y}$$
$$=\omega y_a cos\omega t,$$
$$w=q=r=0 \tag{4.28}$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c,\ \Delta v=\omega y_a cos\omega t,$$
$$\Delta u=\Delta w=\Delta q=\Delta r=0 \tag{4.29}$$

x 軸方向，y 軸方向，z 軸まわりの運動方程式は、

$$0=\bar{X}(\bar{u})+X_{vv}\Delta v^2-\hat{X},$$
$$(m+m_{22})\dot{v}=Y_v\Delta v+Y_{v|v|}\Delta v|\Delta v|-\hat{Y},$$
$$(mx_g+m_{62})\dot{v}+(m_{22}-m_{11})uv=$$
$$N_v\Delta v+N_{v|v|}\Delta v|\Delta v|-\hat{N} \tag{4.30}$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2+\frac{1}{2}X_{vv}\omega^2y_a^2+\frac{1}{2}X_{vv}\omega^2y_a^2cos2\omega t,$$

$$\hat{Y}=(m+m_{22})\omega^2y_a sin\omega t$$
$$+\left(Y_v+\frac{8}{3\pi}Y_{v|v|}\omega y_a\right)cos\omega t+Y_{v|v|}\omega^2y_a^2f_{c|c|},$$

$$\hat{N}=(mx_g+m_{62})\omega^2y_a sin\omega t+\left\{N_v+\frac{8}{3\pi}N_{v|v|}\omega y_a\right.$$
$$\left.-(m_{22}-m_{11})U_c\right\}\omega y_a cos\omega t+N_{v|v|}\omega^2y_a^2f_{c|c|} \tag{4.31}$$

ここで、

$$f_{c|c|}=-\frac{8}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{(-1)^i cos(2i+1)\omega t}{(2i-1)\{4(i+1)^2-1\}} \tag{4.32}$$

計測される力を

$$\hat{X}=\hat{X}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{X}_{si}sini\omega t-\hat{X}_{ci}cosi\omega t),$$
$$\hat{Y}=\hat{Y}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{Y}_{si}sini\omega t-\hat{Y}_{ci}cosi\omega t),$$
$$\hat{N}=\hat{N}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{N}_{si}sini\omega t-\hat{N}_{ci}cosi\omega t) \tag{4.33}$$

で表すと、関連する項の対応より

$$\hat{X}_0=X_0U_c^2+\frac{1}{2}X_{vv}\omega^2y_a^2,\ \hat{X}_{c2}=\frac{1}{2}X_{vv}\omega^2y_a^2,$$
$$\hat{Y}_{s1}=(m+m_{22})\omega^2y_a,$$
$$\hat{Y}_{c1}=-\left(Y_v+\frac{8}{3\pi}Y_{v|v|}\omega y_a\right)\omega y_a,$$
$$\hat{N}_{s1}=(mx_g+m_{62})\omega^2y_a,$$
$$\hat{N}_{c1}=-\left\{N_v+\frac{8}{3\pi}N_{v|v|}\omega y_a-(m_{22}-m_{11})U_c\right\}\omega y_a \tag{4.34}$$

Pure Heave 試験も同様に考える。変位を、

$$z=z_a sin\omega t \tag{4.35}$$

と表す。このとき、

$$u=U_c,$$
$$w=\dot{z}$$
$$=\omega z_a cos\omega t,$$
$$v=q=r=0 \tag{4.36}$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c,\ \Delta w=\omega z_a cos\omega t,$$
$$\Delta u=\Delta v=\Delta q=\Delta r=0 \tag{4.37}$$

x 軸方向，z 軸方向，y 軸まわりの運動方程式は、

$$0=\bar{X}(\bar{u})+X_{ww}\Delta w^2-\hat{X},$$
$$(m+m_{33})\dot{w}=Z_w\Delta w+Z_{w|w|}\Delta w|\Delta w|-\hat{Z},$$
$$(-mx_g+m_{53})\dot{w}-(m_{33}-m_{11})uw=M_w\Delta w$$
$$+M_{w|w|}\Delta w|\Delta w|-\hat{M} \tag{4.38}$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2+\frac{1}{2}X_{ww}\omega^2z_a^2cos2\omega t,$$

$$\hat{Z}=(m+m_{33})\omega^2z_a sin\omega t$$

$$+\left(Z_w+\frac{8}{3\pi}Z_{w|w|}\omega z_a\right)\omega z_a\cos\omega t$$
$$+Z_{w|w|}\omega^2 z_a^2 f_{c|c|},$$
$$\hat{M}=(-mx_g+m_{53})\omega^2 z_a\sin\omega t$$
$$+\left\{M_w+\frac{8}{3\pi}M_{w|w|}\omega z_a\right.$$
$$\left.+(m_{33}-m_{11})U_c\right\}\ \omega y_a\cos\omega t+M_{w|w|}\omega^2 z_a^2 f_{c|c|} \qquad (4.39)。$$

計測される力を

$$\hat{X}=\hat{X}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{X}_{si}\sin i\omega t-\hat{X}_{ci}\cos i\omega t),$$
$$\hat{Z}=\hat{Z}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{Z}_{si}\sin i\omega t-\hat{Z}_{ci}\cos i\omega t),$$
$$\hat{M}=\hat{M}_0+\sum_{i=1}^{\infty}(\hat{M}_{si}\sin i\omega t-\hat{M}_{ci}\cos i\omega t) \qquad (4.40)$$

で表すと、関連する項の対応より、

$$X_0=X_0U_c^2+\frac{1}{2}X_{ww}\omega^2 z_a^2,\quad \hat{X}_{c2}=\frac{1}{2}X_{ww}\omega^2 z_a^2,$$
$$\hat{Z}_{s1}=(m+m_{33})\omega^2 z_a,\ \hat{Z}_{c1}=-\left(Z_w+\frac{8}{3\pi}Z_{w|w|}\omega z_a\right)\omega z_a,$$
$$\hat{M}_{s1}=(-mx_g+m_{53})\omega^2 z_a,$$
$$\hat{M}_{c1}=-\left\{M_w+\frac{8}{3\pi}M_{w|w|}\omega z_a+(m_{33}-m_{11})U_c\right\}\ \omega z_a \qquad (4.41)。$$

(3) Pure Yaw, Pure Pitch 試験

Pure Yaw 試験の場合の運動は、海中移動体模型を一定速度 U_cで曳航しながら、曳航方向に対して

$$\psi=\psi_a\sin\omega t \qquad (4.42)$$

なる角度で模型を Yawing させるとともに

$$y_0=-\frac{U_c\psi_a}{\omega}\cos\omega t \qquad (4.43)$$

なる変位も与える。このとき

$$u=U_c\cos\psi+\dot{y}_0\sin\psi$$
$$=U_c+\frac{1}{4}U_c\psi_a^2(1-\cos 2\omega t)+O(\psi_a^4),$$
$$v=O(\psi_a^3),\quad r=\omega\psi_a\cos\omega t,$$
$$w=q=0 \qquad (4.44)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c\left(1+\frac{1}{4}\psi_a^2\right),$$
$$\Delta u=-\frac{1}{4}U_c\psi_a^2\cos 2\omega t+O(\psi_a^4),$$
$$\Delta v=O(\psi_a^3),$$
$$\Delta r=\omega\psi_a\cos\omega t,$$
$$\Delta w=\Delta q=0 \qquad (4.45)。$$

x 軸方向，y 軸方向，z 軸まわりの運動方程式を O (ψ_a^2)までの項を考慮すると

$$-my_g\dot{r}-(mx_g+m_{26})r^2$$
$$=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{rr}\Delta r^2-\hat{X},$$
$$(mx_g+m_{26})\dot{r}-my_g r^2+(m+m_{11})ur$$
$$=Y_r\Delta r+Y_{r|r|}\Delta r|\Delta r|-\hat{Y},$$
$$(I_{33}+m_{66})\dot{r}+(mx_g+m_{26})ur$$
$$=N_r\Delta r+N_{r|r|}\Delta r|\Delta r|-\hat{N} \qquad (4.46)。$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2+\frac{1}{2}\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2\psi_a^2$$
$$-my_g\omega^2\psi_a\sin\omega t+\frac{1}{2}\left[\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\ \omega^2\right.$$
$$\left.-\frac{1}{2}X_uU_c\right]\psi_a^2\cos 2\omega t,$$
$$\hat{Y}=\frac{1}{2}my_g\omega^2\psi_a^2+(mx_g+m_{26})\omega^2\psi_a\sin\omega t$$
$$+\left\{Y_r+\frac{8}{3\pi}Y_{r|r|}\omega\psi_a-(m+m_{11})U_c\right\}\ \omega\psi_a\cos\omega t$$
$$+\frac{1}{2}my_g\omega^2\psi_a^2\cos 2\omega t+Y_{r|r|}\omega^2\psi_a^2 f_{c|c|},$$
$$\hat{N}=(I_{33}+m_{66})\omega^2\psi_a\sin\omega t+\left\{N_r+\frac{8}{3\pi}N_{r|r|}\omega\psi_a\right.$$
$$\left.-(mx_g+m_{26})U_c\right\}\ \omega\psi_a\cos\omega t+N_{r|r|}\omega^2\psi_a^2 f_{c|c|} \qquad (4.47)。$$

計測される力を (4.33) 式で表すと、関連する項の対応より

$$\hat{X}_0=X_0U_c^2+\frac{1}{2}\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2\psi_a^2,$$
$$\hat{X}_{c2}=\frac{1}{2}\left[\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2-\frac{1}{2}X_uU_c\right]\psi_a^2,$$
$$\hat{Y}_{s1}=(mx_g+m_{26})\omega^2\psi_a,$$
$$\hat{Y}_{c1}=-\left\{Y_r+\frac{8}{3\pi}Y_{r|r|}\omega\psi_a-(m+m_{11})U_c\right\}\omega\psi_a,$$
$$\hat{N}_{s1}=(I_{33}+m_{66})\omega^2\psi_a,$$
$$\hat{N}_{c1}=-\left\{N_r+\frac{8}{3\pi}N_{r|r|}\omega\psi_a-(mx_g+m_{26})U_c\right\}\omega\psi_a \qquad (4.48)。$$

Pure Pitch 試験の場合は、Pitch 角を

$$\theta=\theta_a\sin\omega t \qquad (4.49)$$

のように与え、同時に

$$z_0=\frac{U_c\theta_a}{\omega}\cos\omega t \qquad (4.50)$$

なる変位を与える。このとき

$$u=U_c\cos\theta-\dot{z}_0\sin\theta$$
$$=U_c+\frac{1}{4}U_c\theta_a^2(1-\cos 2\omega t)+O(\theta_a^4),$$

$$w=O(\theta_a^3),\quad q=\omega\theta_a cos\omega t,$$
$$v=r=0 \qquad (4.51)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c(1+\frac{1}{4}\theta_a^2),$$
$$\Delta u=\frac{1}{4}U_c\theta_a^2 cos2\omega t+O(\theta_a^4),$$
$$\Delta w=O(\theta_a^3),$$
$$\Delta q=\omega\theta_a cos\omega t,$$
$$\Delta v=\Delta r=0 \qquad (4.52)。$$

x 軸方向，z 軸方向，y 軸まわりの運動方程式を O (θ_a^2) までの項を考慮すると

$$mz_g\dot{q}-(mx_g-m_{35})q^2$$
$$=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{qq}\Delta q^2-\hat{X},$$
$$(-mx_g+m_{35})\dot{q}-mz_gq^2-(m+m_{11})uq$$
$$=Z_q\Delta q+Z_{q|q|}\Delta q|\Delta q|-\hat{Z},$$
$$(I_{22}+m_{55})\dot{q}+(mx_g-m_{35})uq$$
$$=M_q\Delta q+M_{q|q|}\Delta q|\Delta q|-\hat{M} \qquad (4.53)。$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2+\frac{1}{2}\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2\theta_a^2$$
$$+mz_g\omega^2\theta_a sin\omega t+\frac{1}{2}\Big[\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2$$
$$-\frac{1}{2}X_uU_c\Big]\theta_a^2cos2\omega t,$$
$$\hat{Z}=\frac{1}{2}mz_g\omega^2\theta_a^2-(mx_g-m_{35})\omega^2\theta_a sin\omega t$$
$$+\{Z_q+\frac{8}{3\pi}Z_{q|q|}\omega\theta_a+(m+m_{11})U_c\}\omega\theta_a cos\omega t$$
$$+\frac{1}{2}mz_g\omega^2\theta_a^2cos2\omega t+Z_{q|q|}\omega^2\theta_a^2 f_{c|c|},$$
$$\hat{M}=(I_{22}+m_{55})\omega^2\theta_a sin\omega t+\{M_q+\frac{8}{3\pi}M_{q|q|}\omega\theta_a$$
$$-(mx_g-m_{35})U_c\}\omega\theta_a cos\omega t+M_{q|q|}\omega^2\theta_a^2 f_{c|c|}$$
$$(4.54)。$$

計測される力を（4.40）式で表すと、関連する項の対応より、

$$\hat{X}_0=X_0U_c^2+\frac{1}{2}\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2\theta_a^2,$$
$$\hat{X}_{c2}=\frac{1}{2}\Big[\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2-\frac{1}{2}X_uU_c\Big]\theta_a^2,$$
$$\hat{Z}_{s1}=-(mx_g-m_{35})\omega^2\theta_a,$$
$$\hat{Z}_{c1}=-\{Z_q+\frac{8}{3\pi}Z_{q|q|}\omega\theta_a+(m+m_{11})U_c\}\omega\theta_a,$$
$$\hat{M}_{s1}=(I_{22}+m_{55})\omega^2\theta_a,$$
$$\hat{M}_{c1}=-\{M_q+\frac{8}{3\pi}M_{q|q|}\omega\theta_a-(mx_g-m_{35})U_c\}\omega\theta_a$$
$$(4.55)。$$

(4) Combined Motion 試験

Combined Motion 試験で海中移動体模型に与えた運動モードは2種類である。Sway と Yaw の連成モードと Heave と Pitch の連成モードである。

まず Sway と Yaw の連成モードについて考える。この運動モードでは海中移動体模型は一定速度 U_cで曳航する。この時、浮心の軌跡は直線的である。そして同時に曳航方向に対して

$$\psi=\psi_a sin\omega t \qquad (4.56)$$

なる角度で模型を Yawing させる。このとき、

$$u=U_c cos\psi$$
$$=U_c-\frac{1}{4}U_c\psi_a^2(1-cos2\omega t)+O(\psi_a^4),$$
$$v=-U_c sin\psi$$
$$=-U_c\psi_a sin\omega t+O(\psi_a^3),$$
$$r=\omega\psi_a cos\omega t,\quad w=q=0 \qquad (4.57)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c(1-\frac{1}{4}\psi_a^2),$$
$$\Delta u=\frac{1}{4}U_c\psi_a^2cos2\omega t+O(\psi_a^4),$$
$$\Delta v=-U_c\psi_a sin\omega t+O(\psi_a^3),$$
$$\Delta r=\omega\psi_a cos\omega t,$$
$$\Delta w=\Delta q=0 \qquad (4.58)。$$

x 軸方向，y 軸方向，z 軸まわりの運動方程式を O (ψ_a^2) までの項を考慮すると

$$(m+m_{11})\dot{u}-my_g\dot{r}-(m+m_{22})vr-(mx_g+m_{26})r^2$$
$$=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{vv}\Delta v^2+X_{vr}\Delta v\Delta r+X_{rr}\Delta r^2$$
$$-\hat{X},$$
$$(m+m_{22})\dot{v}+(mx_g+m_{26})\dot{r}+(m+m_{11})ur-my_gr^2$$
$$=Y_v\Delta v+Y_r\Delta r+Y_{v|r|}\Delta v|\Delta r|+Y_{|v|r}|\Delta v|\Delta r$$
$$+Y_{r|r|}\Delta r|\Delta r|-\hat{Y},$$
$$-my_g\dot{u}+(mx_g+m_{26})\dot{v}+(I_{33}+m_{66})\dot{r}$$
$$+(m_{22}-m_{11})uv+(mx_g+m_{26})ur+my_gvr$$
$$=N_v\Delta v+N_r\Delta r+N_{v|r|}\Delta v|\Delta r|+N_{|v|r}|\Delta v|\Delta r$$
$$+N_{r|r|}\Delta r|\Delta r|-\hat{N} \qquad (4.59)。$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2+\frac{1}{2}[X_{vv}U_c^2+\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2]\psi_a^2$$
$$-my_g\omega^2\psi_a sin\omega t$$
$$-\frac{1}{2}\{X_{vr}+(m_{22}-m_{11})\}U_c\omega\psi_a^2 sin2\omega t$$

$$+\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}X_uU_c-X_{vv}U_c^2\right.$$
$$\left.+\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2\right]\psi_a^2 cos2\omega t,$$

$$\hat{Y}=\frac{1}{2}my_g\omega^2\psi_a^2$$
$$+\{-Y_vU_c-\frac{8}{3\pi}Y_{v|v|}U_c^2\psi_a-\frac{4}{3\pi}Y_{v|r|}U_c\omega\psi_a$$
$$+(mx_g+m_{26})\omega^2\}\psi_a sin\omega t$$
$$+\{Y_r+\frac{8}{3\pi}Y_{r|r|}\omega\psi_a+\frac{4}{3\pi}Y_{|v|r}U_c\psi_a$$
$$+(m_{22}-m_{11})U_c\}\omega\psi_a cos\omega t$$
$$+\frac{1}{2}my_g\omega^2\psi_a^2 cos2\omega t$$
$$+(-Y_{v|v|}U_c^2f_{s|s|}+Y_{|v|r}U_c\omega f_{|s|c}-Y_{v|r|}U_c\omega f_{s|c|}$$
$$+Y_{r|r|}\omega^2 f_{c|c|})\psi_a^2$$

$$\hat{N}=\{-N_vU_c-\frac{8}{3\pi}N_{v|v|}U_c^2\psi_a-\frac{4}{3\pi}N_{v|r|}U_c\omega\psi_a$$
$$+(m_{22}-m_{11})U_c^2+(I_{33}+m_{66})\omega^2\}\psi_a sin\omega t$$
$$+\{N_r+\frac{8}{3\pi}N_{r|r|}\omega\psi_a+\frac{4}{3\pi}N_{|v|r}U_c\psi_a\}\omega\psi_a cos\omega t$$
$$+(-N_{v|v|}U_c^2f_{s|s|}+N_{|v|r}U_c\omega f_{|s|c}-N_{v|r|}U_c\omega f_{s|c|}$$
$$+N_{r|r|}\omega^2 f_{c|c|})\psi_a^2 \qquad (4.60)。$$

ここで、

$$f_{s|s|}=-\frac{8}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{(-1)^i sin(2i+1)\omega t}{(2i-1)\{4(i+1)^2-1\}},$$
$$f_{|s|c}=-\frac{4}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{cos(2i+1)\omega t}{(2i-1)(2i+3)},$$
$$f_{s|c|}=-\frac{4}{\pi}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{(-1)^i sin(2i+1)\omega t}{(2i-1)(2i+3)} \qquad (4.61)$$

であり、また $f_{c|c|}$ は（4.32）式に示すとおりである。計測される力を（4.33）式で表すと、関連する項の対応より、

$$\hat{X}_0=X_0U_c^2$$
$$+\frac{1}{2}\left[X_{vv}U_c^2+\{X_{rr}+(mx_g+m_{26})\}\omega^2\right]\psi_a^2,$$
$$\hat{X}_{s2}=-\frac{1}{2}\{X_{vr}+(m_{22}-m_{11})\}U_c\omega\psi_a^2,$$
$$\hat{X}_{c2}=-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}X_uU_c-X_{vv}U_c^2\right.$$
$$\left.+\{X_{rr}+(mx_g+m_{25})\}\omega^2\right]\psi_a^2,$$
$$\hat{Y}_{s1}=\{-Y_vU_c-\frac{8}{3\pi}Y_{v|v|}U_c^2\psi_a-\frac{4}{3\pi}Y_{v|r|}U_c\omega\psi_a$$
$$+(mx_g+m_{26})\omega^2\}\psi_a,$$
$$\hat{Y}_{c1}=-\{Y_r+\frac{8}{3\pi}Y_{r|r|}\omega\psi_a+\frac{4}{3\pi}Y_{|v|r}U_c\psi_a$$
$$+(m_{22}-m_{11})U_c\}\omega\psi_a,$$
$$\hat{N}_{s1}=\{-N_vU_c-\frac{8}{3\pi}N_{v|v|}U_c^2\psi_a-\frac{4}{3\pi}N_{v|r|}U_c\omega\psi_a$$
$$+(m_{22}-m_{11})U_c^2+(I_{33}+m_{66})\omega^2\}\psi_a,$$
$$\hat{N}_{c1}=-\{N_r+\frac{8}{3\pi}N_{r|r|}\omega\psi_a+\frac{4}{3\pi}N_{|v|r}U_c\psi_a\}\omega\psi_a$$
$$(4.62)。$$

Heave と Pitch の連成モードの場合は、Pitching 角が

$$\theta=\theta_a sin\omega t \qquad (4.63)。$$

このとき、

$$u=U_c cos\theta$$
$$=U_c-\frac{1}{4}U_c\theta_a^2(1-cos2\omega t)+O(\theta_a^4),$$
$$w=U_c sin\theta$$
$$=U_c\theta_a sin\omega t+O(\theta_a^3),$$
$$q=\omega\theta_a cos\omega t,\quad v=r=0 \qquad (4.64)。$$

すなわち、

$$\bar{u}=U_c(1-\frac{1}{4}\psi_a^2),$$
$$\Delta u=\frac{1}{4}U_c\theta_a^2 cos2\omega t+O(\theta_a^4),$$
$$\Delta w=U_c\theta_a sin\omega t+O(\theta_a^3),$$
$$\Delta q=\omega\theta_a cos\omega t,$$
$$\Delta v=\Delta r=0 \qquad (4.65)。$$

x 軸方向，z 軸方向，y 軸まわりの運動方程式を $O(\theta_a^2)$ までの項を考慮すると

$$(m+m_{11})\dot{u}+mz_g\dot{q}+(m+m_{33})wq+(-mx_g+m_{35})q^2$$
$$=\bar{X}(\bar{u})+X_u\Delta u+X_{ww}\Delta w^2+X_{wq}\Delta w\Delta q+X_{qq}\Delta q^2$$
$$-\hat{X},$$
$$(m+m_{33})\dot{w}+(-mx_g+m_{35})\dot{q}-(m+m_{11})uq-mz_gq^2$$
$$=Z_w\Delta w+Z_q\Delta q+Z_{w|q|}\Delta w|\Delta q|$$
$$+Z_{|w|q}|\Delta w|\Delta q+Z_{q|q|}\Delta q|\Delta q|-\hat{Z},$$
$$mz_g\dot{u}+(-mx_g+m_{35})\dot{w}+(I_{22}+m_{55})\dot{q}$$
$$-(m_{33}-m_{11})uw+(mx_g-m_{35})uq+mz_gwq$$
$$=M_w\Delta w+M_q\Delta q+M_{w|q|}\Delta w|\Delta q|$$
$$+M_{|w|q}|\Delta w|\Delta q+M_{q|q|}\Delta q|\Delta q|-\hat{M} \qquad (4.66)。$$

したがって、

$$\hat{X}=X_0U_c^2$$
$$+\frac{1}{2}\left[X_{ww}U_c^2+\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2\right]\theta_a^2$$
$$-mz_g\omega^2\theta_a^2 sin\omega t$$
$$+\frac{1}{2}\{X_{wq}-(m_{33}-m_{11})\}U_c\omega\theta_a^2 sin2\omega t$$

$$
\begin{aligned}
&+\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}X_uU_c-X_{ww}U_c^2\right.\\
&\left.+\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2\right]\theta_a^2cos2\omega t,\\
\hat{Z}=&\frac{1}{2}mz_g\omega^2\theta_a^2\\
&+\{Z_wU_c+\frac{8}{3\pi}Z_{w|w|}U_c^2\theta_a+\frac{4}{3\pi}Z_{w|q|}U_c\omega\psi_a\\
&-(mx_g-m_{35})\omega^2\}\theta_a sin\omega t+\{Z_q+\frac{8}{3\pi}Z_{q|q|}\omega\theta_a\\
&+\frac{4}{3\pi}Z_{|w|q}U_c\theta_a-(m_{33}-m_{11})U_c\}\omega\theta_a cos\omega t\\
&+\frac{1}{2}mz_g\omega^2\theta_a^2cos2\omega t+(Z_{w|w|}U_c^2f_{s|s|}\\
&+Z_{|w|q}U_c\omega f_{|s|c}+Z_{w|q|}U_c\omega f_{s|c|}+Z_{q|q|}\omega^2f_{c|c|})\theta_a^2,\\
\hat{M}=&\ \{M_wU_c+\frac{8}{3\pi}M_{w|w|}U_c^2\psi_a+\frac{4}{3\pi}M_{w|q|}U_c\omega\theta_a\\
&+(m_{33}-m_{11})U_c^2+(I_{22}+m_{55})\omega^2\}\ \theta_a sin\omega t\\
&+\{M_q+\frac{8}{3\pi}M_{q|q|}\omega\theta_a+\frac{4}{3\pi}M_{|w|q}U_c\theta_a\}\omega\theta_a cos\omega t\\
&+(M_{w|w|}U_c^2f_{s|s|}+M_{|w|q}U_c\omega f_{|s|c}\\
&+M_{w|q|}U_c\omega f_{s|c|}+M_{q|q|}\omega^2f_{c|c|})\theta_a^2 \qquad (4.67)。
\end{aligned}
$$

計測される力を（4.40）式で表すと、関連する項の対応より、

$$
\begin{aligned}
\hat{X}_0=&X_0U_c^2\\
&+\frac{1}{2}\ [X_{ww}U_c^2+\{X_{qq}+(mx_g-m_{35})\}\omega^2]\theta_a^2,\\
\hat{X}_{s2}=&\frac{1}{2}\{X_{wq}-(m_{33}-m_{11})\}U_c\omega\theta_a^2,\\
\hat{X}_{c2}=&-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}X_uU_c-X_{ww}U_c^2+\{X_{qq}+(mx_g\right.\\
&\left.-m_{35})\}\omega^2\right]\theta_a^2,\\
\hat{Z}_{s1}=&\{Z_wU_c+\frac{8}{3\pi}Z_{w|w|}U_c^2\theta_a+\frac{4}{3\pi}Z_{w|q|}U_c\omega\psi_a\\
&-(mx_g-m_{35})\omega^2\}\theta_a,\\
\hat{Z}_{c1}=&-\{Z_q+\frac{8}{3\pi}Z_{q|q|}\omega\theta_a+\frac{4}{3\pi}Z_{|w|q}U_c\theta_a-(m_{33}\\
&-m_{11})U_c\}\omega\theta_a,\\
\hat{M}_{s1}=&\ \{M_wU_c+\frac{8}{3\pi}M_{w|w|}U_c^2\psi_a+\frac{4}{3\pi}M_{w|q|}U_c\omega\theta_a\\
&+(m_{33}-m_{11})U_c^2+(I_{22}+m_{55})\omega^2\}\ \theta_a,\\
\hat{M}_{c1}=&-\{M_q+\frac{8}{3\pi}M_{q|q|}\omega\theta_a+\frac{4}{3\pi}M_{|w|q}U_c\theta_a\}\omega\theta_a\\
&\qquad (4.68)。
\end{aligned}
$$

5．海中移動体模型の付加質量係数

斜航試験およびPMM試験等の実験データに基づいて付加質量係数を求めた。解析にあたっては本実験の周波数範囲での付加質量の周波数依存性はないと仮定した。

また、これら付加質量係数を求めた結果を回帰分析することによって、これらの実験式を求めた。m_{11}以外の付加質量係数の実験式は、x軸に垂直な断面毎にそれぞれに対応する2次元の付加質量を求め、これを長さ方向に積分した値を基本としてこれに3次元影響係数と前進速度影響係数を乗じた形とした。

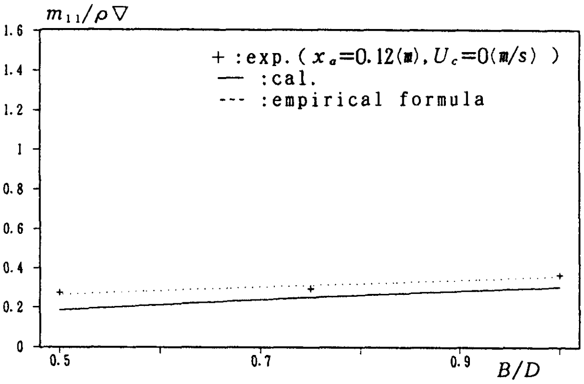

Fig. 5-1　m_{11}

5.1　m_{11}

m_{11}はPure Surge試験から求めた。(4.26）式に基づいて解析した結果をFig.5-1に示す。図中のcal.は特異点分布法による数値計算[6]の結果である。この計算結果は実験結果を良く説明しているが、ここでは次式でm_{11}を回帰することとした。

$$\frac{m_{11}}{\rho\ \nabla}=0.1814\frac{B}{D}+0.1739 \qquad (5.1)。$$

ひれの有無はm_{11}に影響しないと考えられる。また、Pure Surge試験は前進速度0 (m/s)の状態のみであり、この値に前進速度依存性がないものと仮定して後述の粘性流体力微係数を求めることとした。

5.2　m_{22}, m_{33}

m_{22}, m_{33}はPure Sway, Pure Heave試験結果をそれぞれ（4.34)，(4.41）式中の対応する式によって解析し、実験点にばらつきの見られる低周波数領域を除く部分の平均値から求めた。

5.2.1　本体単独状態のm_{22}とm_{33}

本体単独状態のm_{22}, m_{33}をそれぞれFig.5-2,

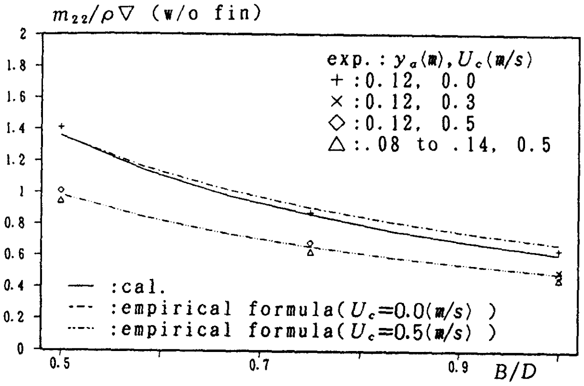

Fig. 5-2 m_{22} (w/o fin)

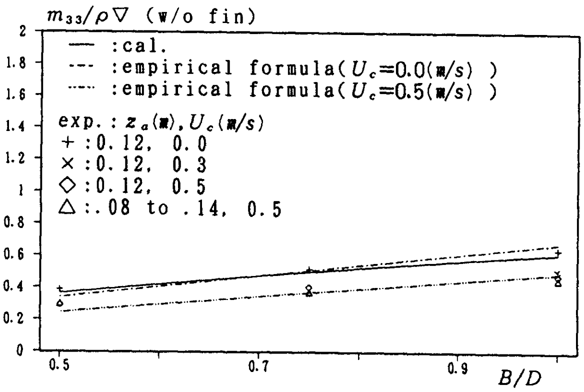

Fig. 5-3 m_{33} (w/o fin)

Fig.5-3に示す。実験点は第1回PMM試験の前進速度0.5(m/s)の1状態と第2回PMM試験の前進速度0.5(m/s)と0(m/s)の2状態、計3状態のものである。第1回と第2回のPMM試験の前進速度0.5(m/s)の結果は良い対応を示しており、実験に再現性があることを示している。cal.は特異点分布法による数値計算結果[6]である。

第1回PMM試験を終了した段階での実験結果と楕円体の付加質量計算を含む数値計算結果との比較[7]では両者の間にかなりの差がみられ、これが前進速度の影響ではないかと推測された。実際、第2回PMM試験の前進速度0(m/s)の結果と数値計算結果の対応が良いことから前記の推測が正しかったと考えられる。

また、大型本体の1点だけではあるが前進速度0.3(m/s)の結果はほぼ前進速度0.5(m/s)の結果と同じ程度の値となっている。この傾向は後述の大型ひれ付き状態でも見られるものである。

一方、実験式は次の形で求めた。

$$\frac{m_{22}}{\rho\nabla}=c_v c_3\frac{m_{22}^{(2D)}}{\rho\nabla},\quad \frac{m_{33}}{\rho\nabla}=c_v c_3\frac{m_{33}^{(2D)}}{\rho\nabla} \qquad (5.2)。$$

ここで $m_{22}^{(2D)}$, $m_{33}^{(2D)}$ は x 軸に垂直な断面毎にそれぞれに対応する2次元の付加質量を求め、これを長さ方向に積分した値である。c_3は3次元影響係数、c_vは前進速度影響係数をそれぞれ表す。

本体形状については x 軸に垂直な断面はいたるところ楕円または大型本体の場合は円であるから、形状を表す(3.2)式より、$m_{22}^{(2D)}$, $m_{33}^{(2D)}$の無次元値は最終的に次式で表される。

$$\frac{m_{22}^{(2D)}}{\rho\nabla}=\frac{D}{B},\quad \frac{m_{33}^{(2D)}}{\rho\nabla}=\frac{B}{D} \qquad (5.3)。$$

(5.3) 式を (5.2) 式に代入し、実験結果を解析した結果、本体単独状態の m_{22}, m_{33}を推定する場合のc_3, c_vについては次の値が得られた。

$$c_3=0.6773,\quad c_v=0.7254\ (for\ m_{22},\ m_{33}\ w/o\ fin) \qquad (5.4)。$$

ただし、$U_c=0$ で $c_v=1$ とした。

これらの値を用いて計算した結果はFig.5-2, Fig.5-3中の各線で示した。3次元影響係数と前進速度影響係数をほぼ0.7とすることによって m_{22}と m_{33}とを推定することができると思われる。

5.2.2 大型ひれ付き状態の m_{22} と m_{33}

大型ひれ付き状態の m_{22}, m_{33}をそれぞれFig.5-4, Fig.5-5に示す。いずれもひれの効果によって本体単独状態よりも大きな値となっている。第1回PMM試験後に、この本体単独状態からの増加分をひれの成分と考えて推定値との比較をおこない、本体との干渉効果が大きいことを報告[7]した。

ここでは本体単独状態と同じように (5.2) 式の形で実験式を求めることとした。ただし、本体単独の場合と異なり、$m_{22}^{(2D)}$, $m_{33}^{(2D)}$にはひれの効果を考慮しなくてはならない。ひれのある断面は楕円または円にひれの付いた形状となるが、楕円の場合は両側のひれの根元を結んだ線を直径とする円に置き換えてこの断面の付加質量[8]で近似することとした。実際の形状を破線で、計算対象とする形状を実線で表してFig.5-6にこれらの関係を示す。このように考えると、

$$\frac{m_{22}^{(2D)}}{\rho\nabla}=\frac{D}{B}h_0\left(\frac{s}{D/2},\ \frac{c}{L}\right),\quad \frac{m_{33}^{(2D)}}{\rho\nabla}=\frac{B}{D}h_0\left(\frac{s}{B/2},\ \frac{c}{L}\right) \qquad (5.5)$$

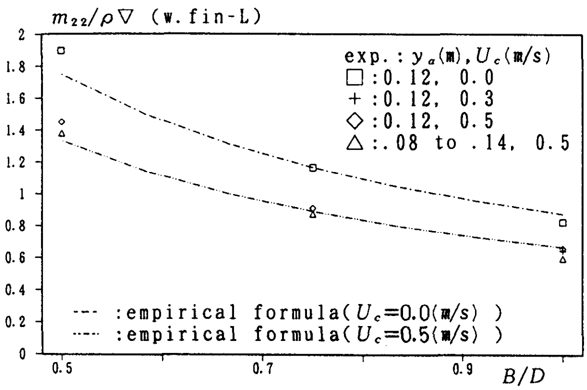

Fig. 5-4　m_{22} (w. fin-L)

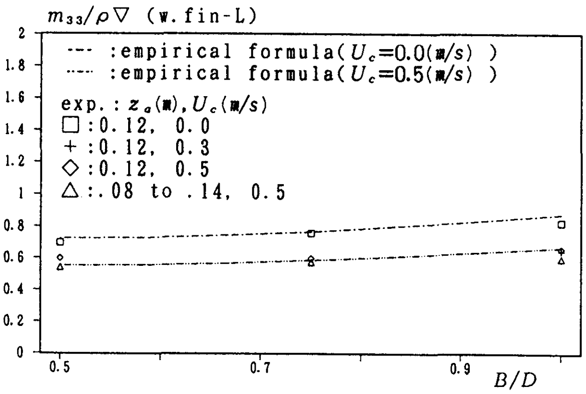

Fig. 5-5　m_{33} (w. fin-L)

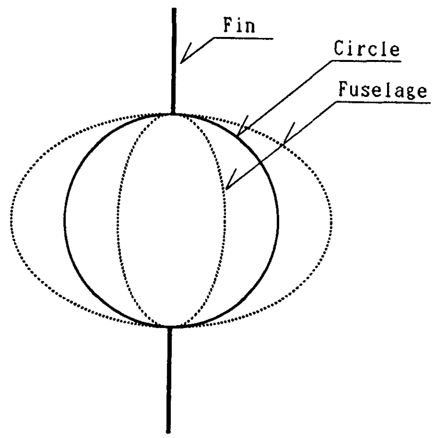

Fig. 5-6　Fin Section Approximation

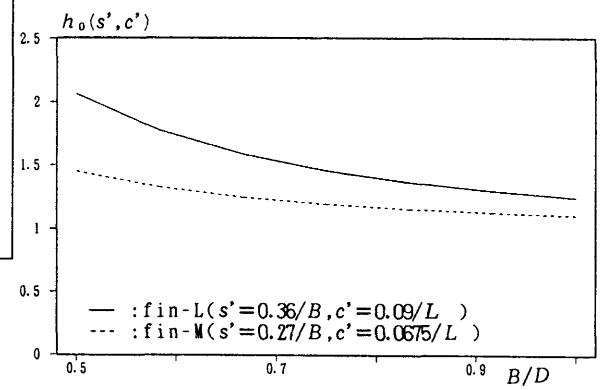

Fig. 5-7　h_0 (fin-L, fin-M)

によって$m_{22}^{(2D)}$，$m_{33}^{(2D)}$を計算することができる。ここで、s は一対のひれの幅を表し、c はひれの弦長を表す。本模型のひれ形状は台形であるが、ここでは簡単のためひれの端での弦の長さを用いることとした。

また、(5.5) 式中の h_0は、

$$h_0(s',c')=\frac{\int_0^{1-c'}f(\xi)^2d\xi+\int_{1-c'}^{1}\{f(\xi)^2+\frac{s'^2-f(\xi)^2}{s'^2}\}d\xi}{\int_0^1 f(\xi)^2d\xi} \tag{5.6}$$

で計算される。ここで$f(\xi)$は (3.2) 式で定義される本体形状を表す関数である。なお、(5.6) 式中の s'，c'はそれぞれ s, c の無次元値の意味で用いたものであるが、(5.5) 式にあるように縦ひれと横ひれに関しては s'の定義が異なることに注意を要する。後述する中型ひれ付き状態の場合も含めて h_0の計算結果をFig.5–7に示す。この図では s'の無次元化は模型の幅でおこなった。模型の深さは 3 種類とも大型本体の幅と同じであるから、模型の深さで無次元化をおこなった場合の値は $B/D=1$の値を読みとれば良い。

(5.5) 式を (5.2) 式に代入し、縦ひれ付きと横ひれ付きの実験結果を解析した結果、大型ひれ付き状態の m_{22}，m_{33}を推定する場合の c_3，c_vについては次の値が得られた。

$c_3=0.7017$，$c_v=0.7621$ (*for* m_{22}，m_{33} *with fin–L*) (5.7)。

これらの値を用いて計算した結果はFig.5–4, Fig.5–5中の各線で示した。3 次元影響係数と前進速度影響係数はともに本体単独状態の数パーセント大きな値となっており、ほぼこの手法で大型ひれ付き状態の m_{22}と m_{33}とを推定することができると思われる。

5.2.3　中型ひれ付き状態の m_{22}と m_{33}

中型ひれ付き状態では Pure Sway 試験をおこなっていないので m_{33}についてのみ Fig.5–8に示す。中型ひれ付き状態の h_0の計算結果は Fig.5–7に示すとおりである。前進速度0.5(m/s)の状態のみであるため、c_3と c_vは積の形でしか得られないが、実験結果から次の値が得られた。

$c_v c_3 = 0.5150$ (*for* m_{22}, m_{33} *with fin–M*) (5.8)。

この値を用いて推定した結果は，Fig.5–8中の線で示した。本体単独状態と大型ひれ付き状態の場合の $c_v c_3$の値はそれぞれ0.4913と0.5348であるからこの中型ひれ付き状態の値がこれらのほぼ中間値となっていることがわかる。

5.3 m_{62}, m_{53}

m_{62}, m_{53}も Pure Sway, Pure Heave 試験結果をそれぞれ (4.34), (4.41) 式中の対応する式によって解析し、実験点にばらつきの見られる低周波数領域を除く部分の平均値から求めた。理論的には m_{62}, m_{53}と m_{26}, m_{35}は同じ値となり、また本報告でもこの立場で式を展開してきている。したがって Pure Yaw, Pure pith 試験からも (4.48), (4.55) 式にあるように m_{62}, m_{53}を求めることができると考えられるが、3.2で述べたように回転運動による計測値より並進運動による計測値の方が信頼性が高く、また m_{62}, m_{53}の値自体も本体単独の場合にはかなり小さな値となると考えられるため、Pure Sway, Pure Heave 試験結果から求めた値を採用することとした。

なお、本体単独状態の m_{62}, m_{53}については前進速度0.5(m/s)の実験結果と特異点分布法による数値計算結果を第1回 PMM 試験後にも報告[7]したが、この時示した数値計算に誤りがあって m_{62}, m_{53}の数値計算結果の符合が正しい結果とは逆となっていた。本報告ではこれを修正してあらためて図示する。

5.3.1 本体単独状態の m_{62}, m_{53}

本体単独状態の m_{62}, m_{53}をそれぞれ Fig.5–9, Fig.5–10に示す。ここでも、cal. で示した特異点分布法による数値計算結果は前進速度 0 (m/s)の実験結果を良く説明している。一方、これらにも前進速度の影響が明瞭に現れており、前進速度0.5(m/s)の実験結果は前進速度 0 (m/s)とは逆の符合になっているのが特徴的である。

大型本体については前進速度0.3(m/s)の結果があるが、m_{22}, m_{33}の場合と同じくほぼ前進速度0.5(m/s)の値と同じとなっている。これについては後述の大型ひれ付き状態でも同じ傾向がみられる。

本体単独状態の m_{22}, m_{33}の場合と同じ手法で m_{62}, m_{53}を推定しようとすると、x軸に垂直な断面の2次元的付加質量の積分値である $m_{62}^{(2D)}$, $m_{53}^{(2D)}$は、座標原点が本体の浮心位置にあるためにいずれも 0 となってしまう。そこで実験値から $m_{62}/m_{22}L$, $-m_{53}/m_{33}L$ を求めることとした。これは物理的には m_{22}, m_{33}による力の着力点の x座標を L で除した値に対応する。結果として、前進速度 0 (m/s)と0.5(m/s)についてそれぞれ

$$\frac{m_{62}}{m_{22}L} = -\frac{m_{53}}{m_{33}L} = \begin{cases} -0.01437 & (U_c = 0\ m/s) \\ 0.02365 & (U_c = 0.5 m/s) \end{cases}$$

(*w/o fin condition*) (5.9)

が得られた。実際の計算にあたっては m_{22}, m_{33}の値が必要となるが、これらにも**5.2.1**で述べた実験式による推定値を用いた。その結果は Fig.5–9, Fig.5–10中に線で示した。小型本体の m_{22}に推定値と実験値に差がみ

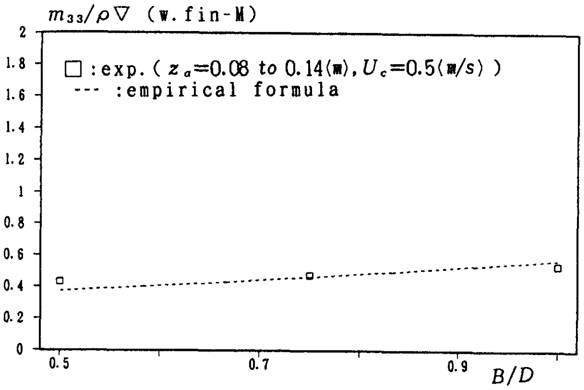

Fig. 5-8 m_{33} (w. fin-M)

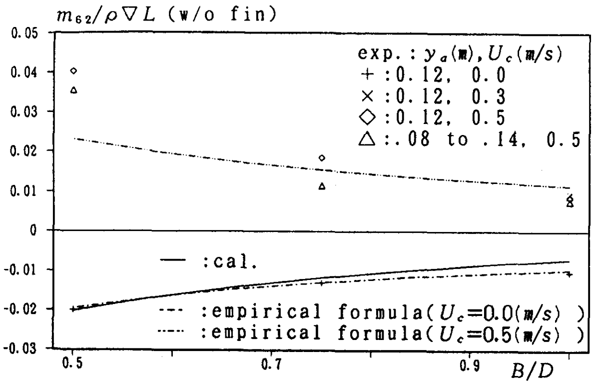

Fig. 5-9 m_{62} (w/o fin)

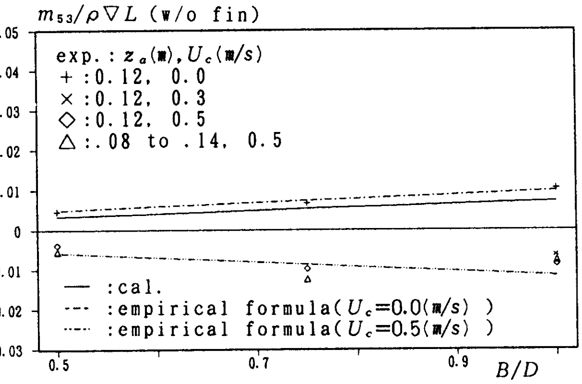

Fig. 5-10　m_{53} (w/o fin)

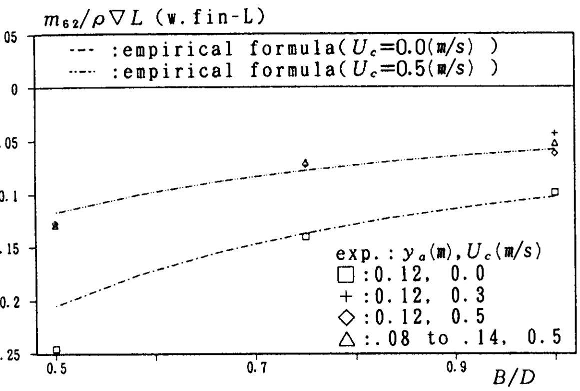

Fig. 5-11　m_{62} (w. fin-L)

られるが、その他は (5.9) 式に示した一定値を用いてもほぼ傾向を表現できていることがわかる。

5.3.2　大型ひれ付き状態の m_{62} と m_{53}

大型ひれ付き状態の m_{62}, m_{53}をそれぞれ Fig.5–11, Fig.5–12に示す。

m_{53}についても m_{33}と同じようにひれの影響を検討し、やはり本体との干渉効果が大きいことを報告[7]しているが、ここでは本体単独状態の m_{22}, m_{33}の場合と同じ手法で m_{62}, m_{53}を推定することとする。実験式は (5.2) 式と同じように考えて、

$$\frac{m_{62}}{\rho\nabla L}=c_v c_3\frac{m_{62}^{(2D)}}{\rho\nabla L},\quad \frac{m_{53}}{\rho\nabla L}=c_v c_3\frac{m_{53}^{(2D)}}{\rho\nabla L} \tag{5.10}$$

とおく。上式中、x 軸に垂直な断面の 2 次元的付加質量から求められる $m_{62}^{(2D)}$, $m_{53}^{(2D)}$は、ひれ付き状態の m_{22}, m_{33}の場合と同様に考えると、

$$\frac{m_{62}^{(2D)}}{\rho\nabla L}=\frac{D}{B}h_1\left(\frac{s}{D/2},\frac{c}{L}\right),\quad \frac{m_{53}^{(2D)}}{\rho\nabla L}=-\frac{B}{D}h_1\left(\frac{s}{B/2},\frac{c}{L}\right) \tag{5.11}$$

と表される。ただし、

$$h_1(s',c')=-\frac{\int_0^{1-c'}f(\xi)^2(\xi-\xi_0)d\xi+\int_{1-c'}^{1}\{f(\xi)^2+\frac{s'^2-f(\xi)^2}{s'^2}\}(\xi-\xi_0)d\xi}{L\int_0^1 f(\xi)^2 d\xi} \tag{5.12}$$

である。ここで、ξ_0は座標原点の ξ 座標を表し、本模型形状の場合は

$$\frac{\xi_0}{L}=\frac{\int_0^1 f(\xi)^2\xi d\xi}{L\int_0^1 f(\xi)^2 d\xi}=0.4317 \tag{5.13}$$

となる。

後述する中型ひれ付き状態の場合も含めて h_1の計算結果を Fig.5–13に示す。ここでもはひれの端での弦の長さを用い、s'の無次元化は模型の幅でおこなった。

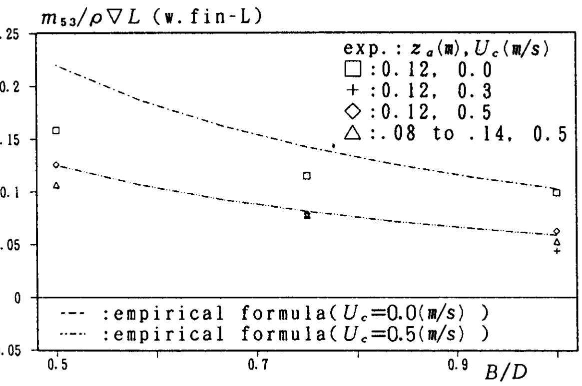

Fig. 5-12　m_{53} (w. fin-L)

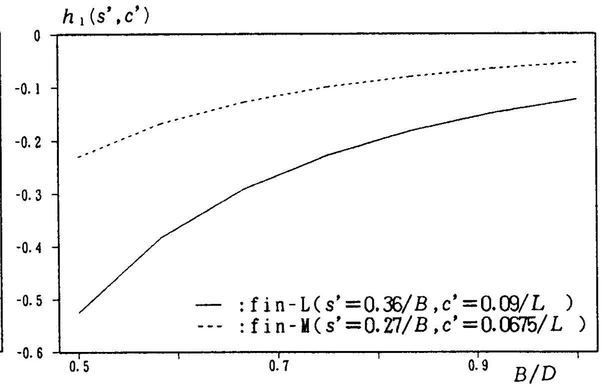

Fig. 5-13　h_1 (fin-L, fin-M)

なお、(5.11) 式で c'を1とすると本体単独状態の $m_{62}^{(2D)}$, $m_{53}^{(2D)}$の定義式となるが、ξ_0の定義が (5.13) 式であるから、5.3.1で述べたようにこの場合$m_{62}^{(2D)}$, $m_{53}^{(2D)}$の値はいずれも 0 となる。

(5.11) 式を (5.10) 式に代入し、実験結果を解析した結果、大型ひれ付き状態の m_{62}, m_{53}を推定する場合の c_3, c_vについては実験結果より次の値が得られた。

$c_3=0.8360,\ c_v=0.5760$ (*for* m_{62}, m_{53}, *with fin-L*) (5.14)。

これらの値を用いた計算結果は Fig.5-11, Fig.5-12中の各線で示した。小型本体の前進速度 0 (m/s)の場合に推定値と実験値の差が大きいようである。このような細部の傾向を表現するには3次元影響係数と前進速度影響係数だけでは不十分と思われるが、この実験式によっても概略の推定はできると思われる。

5.3.3 中型ひれ付き状態の m_{53}

Pure Heave 試験結果の m_{53}について Fig.5-14に示す。この場合の h_1の計算結果は Fig.5-13示すとおりである。前進速度0.5(m/s)の状態のみであるため、c_3と c_vは積の形でしか得られないが、実験結果から次の値が得られた。

$c_v c_3=0.5390$ (*for* m_{62}, m_{53}, *with fin-M*) (5.15)。

この値を用いて計算した結果は, Fig.5-14中の線で示した。なお、大型ひれ付き状態の場合の $c_v c_3$の値は0.4770である。

5.4 m_{66}, m_{55}

m_{66}, m_{55}は Pure Yaw, Pure Pitch 試験結果をそれぞれ (4.48), (4.55) 式中の対応する式によって解析し、実験点にばらつきの見られる低周波数領域を除く部分の平均値から求めた。

5.4.1 本体単独状態の m_{66}と m_{55}

本体単独状態の m_{66}, m_{55}をそれぞれ Fig.5-15, Fig.5-16に示す。小型本体と中型本体の m_{66}、そして大型本体の前進速度 0 (m/s)の場合の m_{66}, m_{55}以外は負の値を示しており、これは物理的に考えて不合理である。この原因は3.2で述べた模型内部の水の影響であると考えられ、かつ本体単独の m_{66}, m_{55}がかなり小さい値であるためこのような解析結果となったと思われる。cal.で示した特異点分布法による数値計算結果は m_{22}, m_{33}や m_{62}, m_{53}で見てきたように前進速度 0 (m/s)の実験結果を良く説明していることから、この m_{66}, m_{55}についても前進速度 0 (m/s)の場合は数値計算値

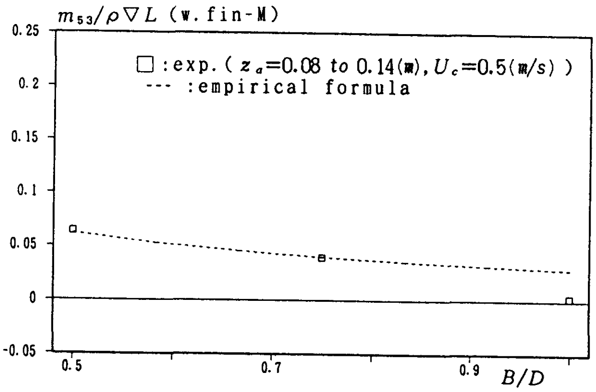

Fig. 5-14 m_{53} (w. fin-M)

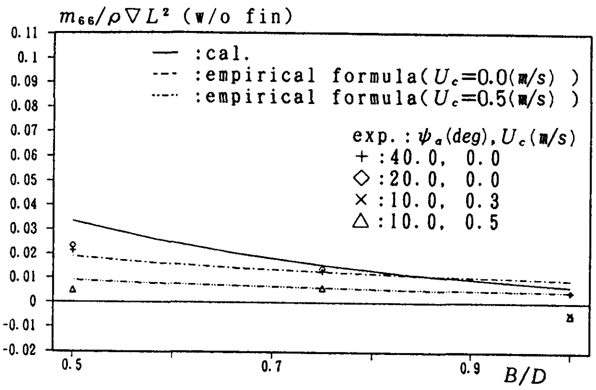

Fig. 5-15 m_{66} (w/o fin)

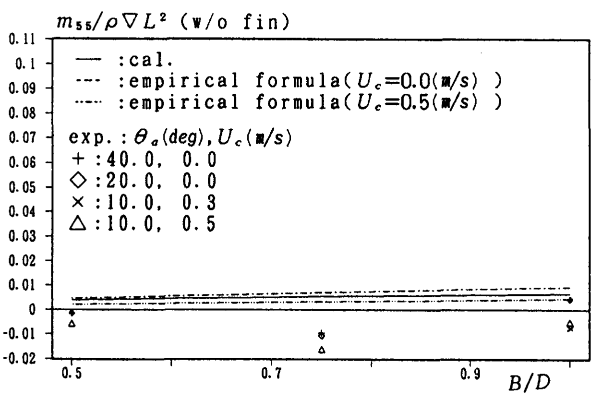

Fig. 5-16 m_{55} (w/o fin)

の付近に真の値があると考えられる。

実験式に関しては、ここでも

$$\frac{m_{66}}{\rho \bigtriangledown L^2} = c_v c_3 \frac{m_{66}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2},\quad \frac{m_{55}}{\rho \bigtriangledown L^2} = c_v c_3 \frac{m_{55}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} \quad (5.16)$$

の形でおこなうこととする。上式中、x 軸に垂直な断面の 2 次元的付加質量から求められる $m_{66}^{(2D)}$, $m_{55}^{(2D)}$ は、

$$\frac{\int_0^1 f(\xi)^2(\xi-\xi_0)^2 d\xi}{L^2 \int_0^1 f(\xi)^2 d\xi} = 0.03804 \quad (5.17)$$

より、

$$\frac{m_{66}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} = 0.03804\frac{D}{B},\quad \frac{m_{55}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} = 0.03804\frac{B}{D} \quad (5.18)$$

と表される。

(5.18) 式を (5.16) 式に代入し、実験結果を解析した結果、本体単独状態の m_{66}, m_{55} を推定する場合の c_3, c_v については次の値が得られた。

$c_3 = 0.2466$, $c = 0.4738$ (*for* m_{66}, m_{55} *w/o fin*) (5.19)。

ただし、実験値の信頼性が低いので、これらの値は c_3 については m_{66} の前進速度 0 (m/s) の結果から求め、c_v については m_{66} の前進速度0.5(m/s)、$B/D=0.75$ の実験点から求め、さらにそれを m_{55} にも適用したものである。

これらの値を用いた計算結果は Fig.5–15, Fig.5–16 中の各線で示した。この模型形状の場合本体単独状態の m_{66}, m_{55} は小さな値であって、推定値に誤差があっても工学的には大きな問題はないと考えられる。

5.4.2 大型ひれ付き状態の m_{66} と m_{55}

大型ひれ付き状態の m_{66}, m_{55} をそれぞれ Fig.5–17, Fig.5–18に示す。本体単独状態の結果と比較するとひれによる成分が m_{66}, m_{55} のほとんどを占めていることがわかる。

ここでも大きな前進速度影響が見られる。また m_{22}, m_{33} や m_{62}, m_{53} では前進速度0.3(m/s)の実験点が前進速度0.5(m/s)とほぼ同じ値を示していたのに対し、ここでは前進速度0.3(m/s)の実験点は前進速度0.5(m/s)と 0 (m/s)の実験点の中間的な値を示している。1 点だけのため確かなことは言えないが、成分によって前進速度影響の程度が異なる可能性がある。

実験式は他の付加質量係数と同様に、

$$\frac{m_{66}}{\rho \bigtriangledown L^2} = c_v c_3 \frac{m_{66}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2},\quad \frac{m_{55}}{\rho \bigtriangledown L^2} = c_v c_3 \frac{m_{55}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} \quad (5.20)$$

とおく。上式中の、x 軸に垂直な断面の 2 次元的付加質量から求められる $m_{66}^{(2D)}$, $m_{55}^{(2D)}$ は、他のひれ付き状態の付加質量係数と同様に、

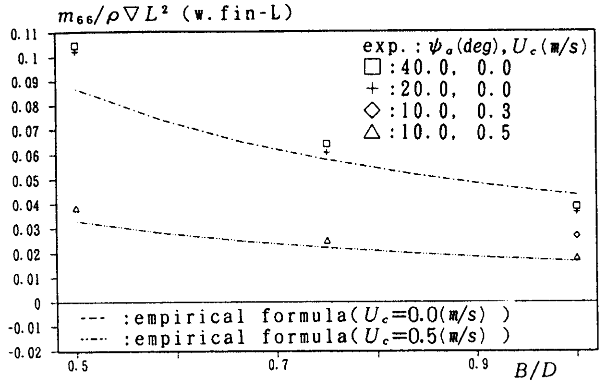

Fig. 5-17 m_{66} (w. fin-L)

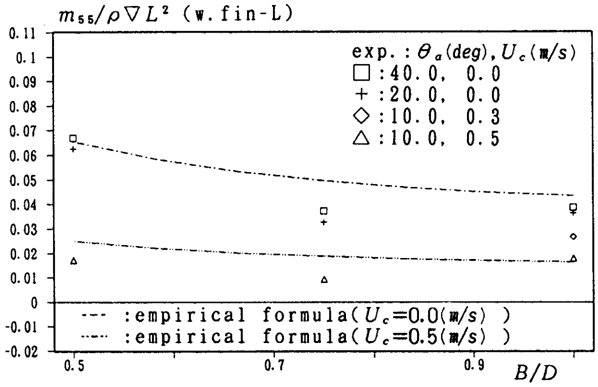

Fig. 5-18 m_{55} (w. fin-L)

$$\frac{m_{66}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} = \frac{D}{B}\, h_2\left(\frac{s}{D/2},\ \frac{c}{L}\right),$$

$$\frac{m_{55}^{(2D)}}{\rho \bigtriangledown L^2} = -\frac{B}{D}\, h_2\left(\frac{s}{B/2},\ \frac{c}{L}\right) \quad (5.21)$$

と表される。ここで、

$$h_2(s',c') = \frac{\int_0^{1-c'} f(\xi)^2(\xi-\xi_0)^2 d\xi + \int_{1-c'}^{1}\{f(\xi)^2 + \frac{s'^2 - f(\xi)^2}{s'^2}\}(\xi-\xi_0)^2 d\xi}{L^2 \int_0^1 f(\xi)^2 d\xi} \quad (5.22)$$

である。

大型ひれ付き状態に対応する h_2 の計算結果を Fig.5–19に示す。ここでも c はひれの端での弦の長さを用い、s' の無次元化は模型の幅でおこなった。

(5.21) 式を (5.20) 式に代入し、実験結果を解析した結果、大型ひれ付き状態の m_{66}, m_{55} を推定する場合の c_3, c_v については実験結果より次の値が得られた。

$c_3 = 0.4370$, $c_v = 0.3787$ (*for* m_{66}, m_{55} *with fin–L*)

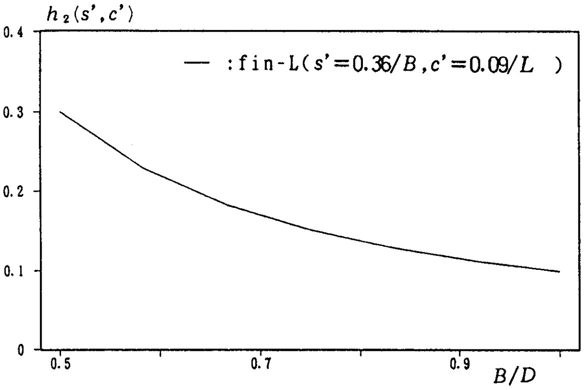

Fig. 5-19　h_2 (fin-L)

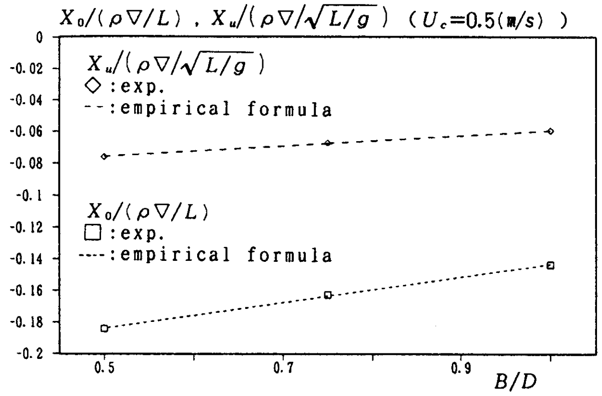

Fig. 6-1　X_0, X_u (U_c= 0.5(m/s))

(5.23)。

これらの値を用いた計算結果は Fig.5–17, Fig.5–18 中の各線で示した。3.2で述べた誤差が含まれていると考えられるが、上記の値でほぼ推定できていると思われる。

6．海中移動体模型の粘性流体力微係数

4 で示した粘性流体力微係数を斜航試験および PMM 試験等の実験データから求めた。**4** で示したように付加質量係数の場合は各係数毎に一対一に対応する実験結果が得られていた。しかし、粘性流体力微係数の場合は線形と非線形の流体力微係数やさらには付加質量を含んだ項との和あるいは差の形で実験結果が得られるものがほとんどであるため、各流体力微係数に対応した実験データを選ぶだけではなく、ある実験結果によって求めた流体力微係数を他の実験結果に適用して別の流体力微係数を求めるという手順をとった。付加質量の場合とは異なり、いずれも前進速度0.5(m/s)の状態のみで各粘性流体力微係数を求めた。また、ここでも本実験の周波数範囲で粘性流体力微係数に周波数依存性はないものと仮定して解析した。

安定性を判断する上でも重要な線形の粘性流体力微係数については実験結果をもとに実験式を求めた。実験式は揚力線理論を基本にして、これに各状態の形状を表す係数を乗ずる形をとった。

なお、粘性流体力微係数を求めるにあたっては5で求めた付加質量係数を用いる必要があるが、このうち、m_{11}については**5.1**で述べたように前進速度影響がないと仮定した。m_{11}以外の付加質量係数には **5** で見たように比較的大きな前進速度影響が見られたが、m_{11}は前進方向そのものの付加質量という点で他の付加質量とは性質が異なると思われ、またその値も大きなものではないため、上記のように仮定してもよいと思われる。

6.1　X_0, X_u

X_0, X_uは Pure Surge 試験等他の実験結果にも含まれる成分であるが、最も精度が高いと思われる抵抗試験から求めた。まず、前進速度0.4(m/s)から0.6(m/s)の範囲で抵抗値を (4.10) 式に基づいて X_0を求めた。次に前進速度0.5(m/s)の状態の X_uを (4.11) 式によって求めた。

結果を無次元化して Fig.6–1に示す。この場合ひれの有無は無視できると仮定した。

X_0の実験式はここでは幅深さ比を用いて

$$\frac{X_0}{\rho \bigtriangledown / L} = 0.0809\frac{B}{D} - 0.2243 \qquad (6.1)$$

とした。X_uの実験式はこの式と (4.11) 式から得られ、これらの計算結果は Fig.6–1中の各線で示した。

6.2　X_{vv}, X_{ww}

斜航試験の斜航角－10度から45度の範囲の前後力の結果より X_{vv}, X_{ww}を求めた。結果を無次元化してそれぞれ Fig.6–2, Fig.6–3に示す。これらは(4.15), (4.19) 式のそれぞれ第1式の ψ^2, θ^2に比例する項の係数を求め、さらにこれから**6.1**で求めた実験式を使って X_uの成分を差し引いて求めたものである。

本体単独状態では小型本体の X_{vv}以外はいずれもこの項は抵抗としてよりは推進力となっている。一方ひれは抵抗側に働き、特に縦ひれ状態でその傾向が著し

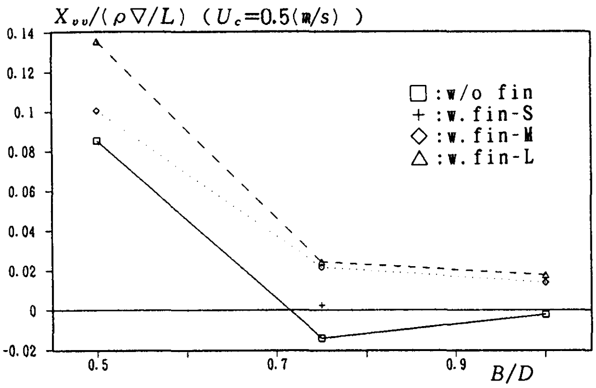

Fig. 6-2 X_{vv} (U_c= 0.5(m/s))

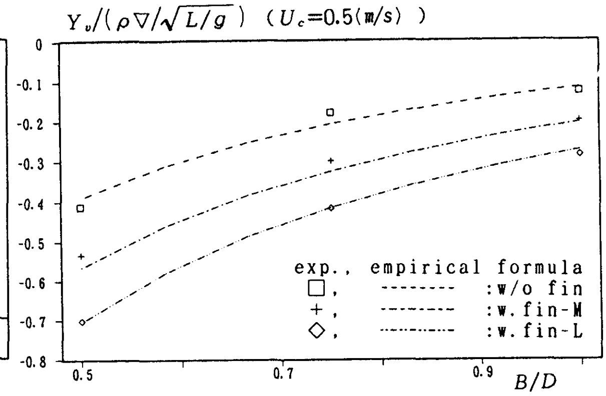

Fig. 6-4 Y_v (U_c= 0.5(m/s))

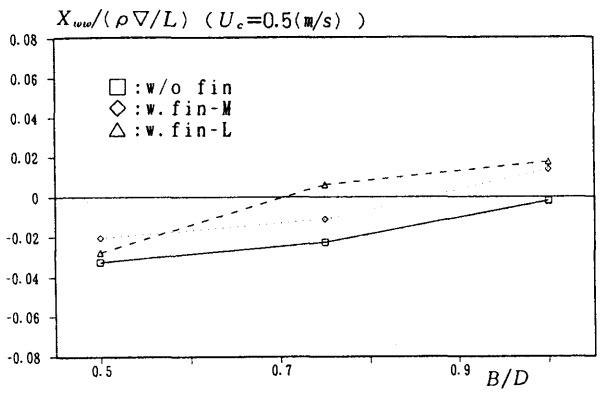

Fig. 6-3 X_{ww} (U_c= 0.5(m/s))

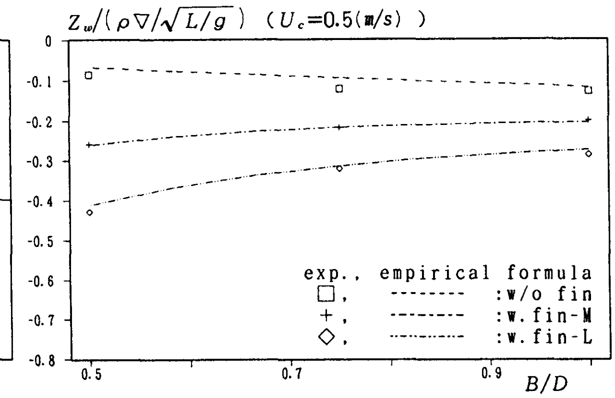

Fig. 6-5 Z_w (U_c= 0.5(m/s))

く、縦ひれ付き状態の X_{vv} はいずれも正の値を示している。横ひれ状態ではこのひれの影響は縦ひれほどではない。

6.3 Y_v, N_v, Z_w, M_w

Y_v, N_v, Z_w, M_w は斜航試験の±10度の範囲の結果から求めることとした。(4.15), (4.19)式の対応する式には非線形の粘性流体力微係数が含まれているが、この斜航角範囲ではこれらの項は無視できるとして解析した。

また、N_v と M_w を求める際には付加質量で表される不安定モーメントが同類項として含まれている。後述するように、実験式もこれらの項を含んだ形で求めるため、まずはこの不安定モーメントを含んだ形で考えることとした。

6.3.1 Y_v, $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$, Z_w, $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$

これらの項は Pure Sway, Pure Heave 試験結果を (4.34), (4.41) 式中の対応する式を用いて解析しても求めることができる。これら斜航試験解析結果から求めたものと PMM 試験結果から求めたものの対応は良い一致を示していることは既に報告[2]した。本報告では、非線形項を求める際に後述するように斜航試験結果を用いることとしたため、これとの整合性をとる上でこれら線形項も同種の実験結果を用いる方が適当と考えて斜航試験結果を用いることとした。

それぞれの係数の本体単独状態と中型, 大型ひれ付き状態の結果を Fig.6-4, Fig.6-5, Fig.6-6, Fig.6-7 に無次元化して点で示す。方向の静安定性に関してはひれ面積と関連づけて斜航試験を終了した段階で報

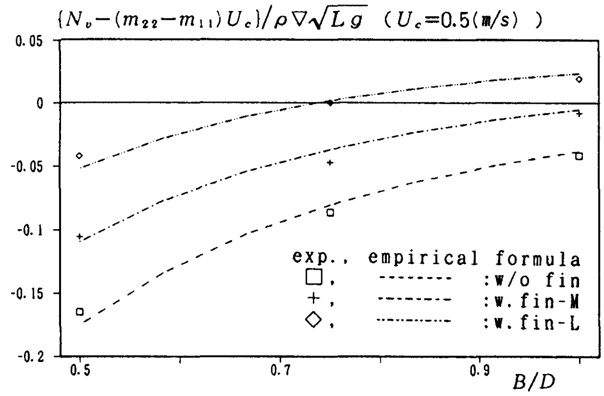

Fig. 6-6 $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

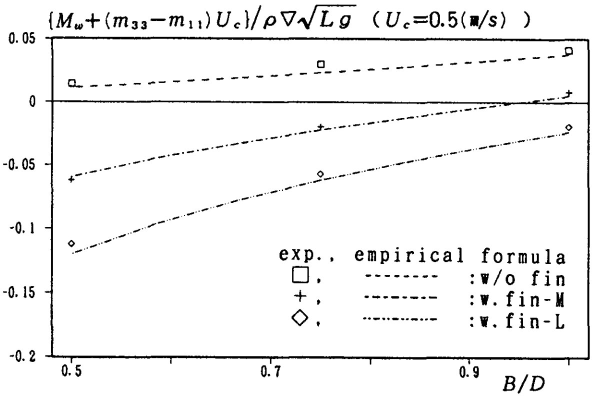

Fig. 6-7 $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

告[9]しているが、本報告での表示に従えば、方向と縦の静安定性にとって重要な $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$ と $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$ は前者が正、後者が負であれば安定と判断される。したがって、本模型の本体およびひれの形状に限れば、方向と縦の両方の静安定性を得るためには、大型本体に大型の縦ひれと横ひれを付けなくてはならないことがわかる。

(1) 本体単独状態の実験式

本体単独状態のこれらの線形粘性流体力微係数については相当楕円平板による計算値と比較した例[9]があるが、本報告では揚力線理論を基本として実験式を構成することとした。まず本体単独状態の Y_v と Z_w を次のように表すこととした。

$$\frac{Y_v^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}=-C_L(\Lambda_y^{(b)})\ k(A_y^{(b)})\ C_t(B/L)$$
$$\frac{Z_w^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}=-C_L(\Lambda_z^{(b)})\ k(A_z^{(b)})\ C_t(D/L) \qquad (6.2)。$$

ここで $Y_v^{(b)}$ と $Z_w^{(b)}$ の添字 (b) は本体単独状態であることを表す。また、$\Lambda_y^{(b)}$、$\Lambda_z^{(b)}$ は本体の縦と横の状態でのそれぞれの縦横比を表し、

$$\Lambda_y^{(b)}=D^2/A_y^{(b)},\ \Lambda_z^{(b)}=B^2/A_z^{(b)} \qquad (6.3)$$

で定義される。$A_y^{(b)}$, $A_z^{(b)}$ は本体のそれぞれ xz 平面, xy 平面への投影面積である。C_L は無次元の揚力傾斜を表し、

$$C_L(\Lambda)=\frac{6.13}{1+2.25/\Lambda} \qquad (6.4)$$

とする[10]。$k(A)$ は無次元化を調整する係数で、

$$k(A)=\frac{1}{2}\frac{A}{\nabla/L}\frac{U_c}{\sqrt{Lg}} \qquad (6.5)$$

である。C_t は幅あるいは深さの影響を表す係数で、実験結果より、

$$C_t(t)=-0.5676t+0.5881 \qquad (6.6)$$

のように表すこととした。本模型形状の場合、C_t は0.4178から0.2475の範囲で変化する。

次に $\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(b)}$ と $\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(b)}$ については

$$\frac{\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{L/g}}=\frac{Y_v^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_b(B/L,\ \Lambda_y^{(b)})}{L},$$
$$\frac{\{M_v+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{L/g}}=\frac{-Z_w^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_b(D/L,\ \Lambda_z^{(b)})}{L} \qquad (6.7)$$

と表すこととした。l_b は $Y_v^{(b)}$, $Z_w^{(b)}$ の着力点の x 座標を表す。具体的には、実験結果から

$$\frac{l_b(t,\ \Lambda)}{L}=-0.3994t+0.3664\Lambda+0.2467 \qquad (6.8)$$

とした。本模型形状の場合、l_b/L は v に関する流体力微係数の場合は t の項の寄与により、0.4490から0.3291の範囲で変化する。一方、w に関する流体力微係数の場合は Λ の項の寄与により、0.1681から0.3291の範囲で変化する。

これらによって計算した本体単独状態の Y_v, Z_w, $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$, $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$ は Fig.6-4, Fig.6-5, Fig.6-6, Fig.6-7中の破線で表した。4種の係数の傾向をほぼとらえていると思われる。

(2) ひれ付き状態の実験式

ひれ付き状態の流体力微係数は本体単独状態の値に

ひれの成分が足し合わされた形で表現することとした。添字の (f) でひれの成分を表すとすると、まず $Y_v^{(f)}$, $Z_w^{(f)}$ は、本体単独の場合と基本的には同じに考えて、

$$\frac{Y_v^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}=-C_L(\Lambda_v^{(f)})\ k(A_v^{(f)})\ c_1$$

$$\frac{Z_w^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}=-C_L(\Lambda_h^{(f)})\ k(A_h^{(f)})\ c_1 \qquad (6.9)。$$

ここで $A_v^{(f)}$, $A_h^{(f)}$ はそれぞれ縦, 横ひれの面積を表し、$\Lambda_v^{(f)}$, $\Lambda_h^{(f)}$ は、それぞれ縦, 横ひれの縦横比で、s を対応するひれの幅とすると、

$$\Lambda_v^{(f)}=\frac{s^2}{A_v^{(f)}},\quad \Lambda_h^{(f)}=\frac{s^2}{A_h^{(f)}} \qquad (6.10)$$

で定義される。c_1 は本体との干渉効果等を表す係数で、実験結果から大型ひれと中型ひれのそれぞれの場合について

$$c_1=\begin{cases}0.7310 & (fin\text{-}L)\\ 0.6158 & (fin\text{-}M)\end{cases} \qquad (6.11)$$

が得られた。

次に、$\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(f)}$, $\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(f)}$ については

$$\frac{\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{Y_v^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_f}{L}c_2,$$

$$\frac{\{M_v+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{-Z_w^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_f}{L}c_2 \qquad (6.12)$$

と表すこととした。l_f は幾何学的なひれの位置の x 座標で、対応するひれの弦長を c として、(5.13)式等より

$$\frac{l_f}{L}=-(1-0.4317)+\frac{3}{4}\frac{c}{L} \qquad (6.13)$$

で定義する。ただし、c は対応するひれの面積：$A^{(f)}$ と幅：s を用いて

$$c=\frac{A^{(f)}}{s} \qquad (6.14)$$

で定義する。c_2 は l_f に対する本体との干渉影響を表す係数で、実験結果より

$$c_2=\begin{cases}0.8383 & (fin\text{-}L)\\ 0.7550 & (fin\text{-}M)\end{cases} \qquad (6.15)$$

が得られた。

以上の手順で $Y_v^{(f)}$, $Z_w^{(f)}$, $\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(f)}$, $\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(f)}$ を計算し、最終的なひれ付き状態の値は、(1)で求めた本体単独状態の実験式を用いて、

$$Y_v=Y_v^{(b)}+Y_v^{(f)},$$
$$N_v-(m_{22}-m_{11})U_c=\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(b)}+\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(f)},$$
$$Z_w=Z_w^{(b)}+Z_w^{(f)},$$
$$M_w+(m_{33}-m_{11})U_c=\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(b)}+\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(f)} \qquad (6.16)$$

のように求めた。計算した結果は Fig.6–4, Fig.6–5, Fig.6–6, Fig.6–7中の一点鎖線と二点鎖線で示した。いずれも実験点の傾向を表現していると言って良いと思われる。

6.3.2 N_v, M_w

モーメントに関する流体力微係数である N_v, M_w については前項まで不安定モーメントを含んだ $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$, $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$ の形で実験式を考

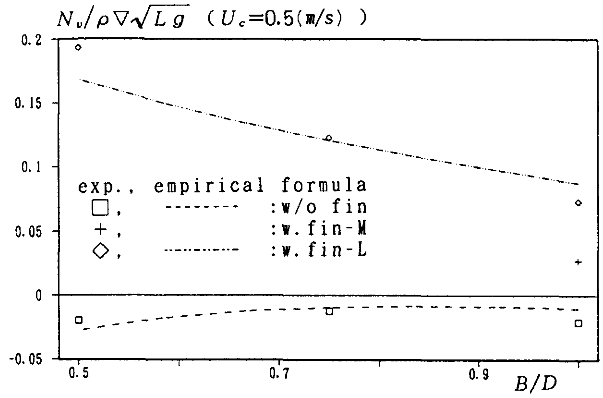

Fig. 6-8 N_v (U_c= 0.5(m/s))

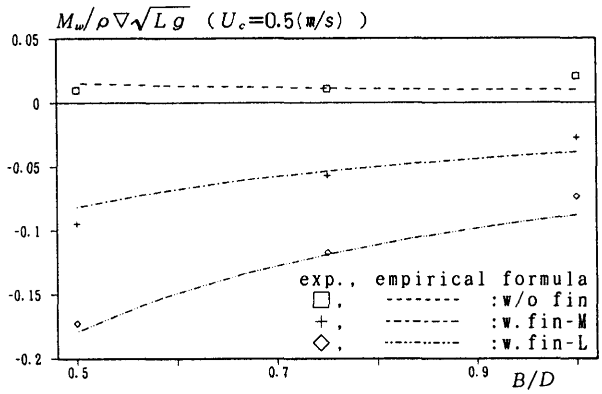

Fig. 6-9 M_w (U_c= 0.5(m/s))

え、実験結果と比較してきたが、**5** で求めた付加質量係数を用いて最終的に不安定モーメント成分を除いて N_v, M_wの形で比較したのが Fig.6–8, Fig.6–9である。差し引く付加質量としては実験結果には対応する実験結果の値を、実験式による計算結果には対応する計算結果を用いた。N_vだけは対応する中型ひれ付き状態の付加質量の実験結果がないためこの状態は比較の対象から除いた。

ここまで流体力微係数を分解しても実験式を用いて計算した値はほぼ実験値の傾向をとらえていると思われる。

6.4 $Y_{v|v|}$, $N_{v|v|}$, $Z_{w|w|}$, $M_{w|w|}$

v と w に関する非線形項：$Y_{v|v|}$, $N_{v|v|}$, $Z_{w|w|}$, $M_{w|w|}$ は斜航試験結果から求めた。(4.34), (4.41)式中の対応する式において加質量係数と線形流体力微係数に **5** と **6.3**で求めた値を代入し、残る非線形の流体力微係数を斜航角が−10度から45度の範囲で求めたものである。Pure Sway, Pure Heave 試験結果からも対応する流体力微係数を求めることはできるが、これらの実験状態では斜航角が最大でも23度程度である。したがってより広い斜航角範囲での平均的な非線形流体力微係数を求めるためには斜航試験結果を用いる方が適当と考えられる。最大斜航角の45度は失速現象が発生していない範囲である。

結果を無次元化して Fig.6–10, Fig.6–11, Fig.6–12, Fig.6–13に示す。高次の項ではあるがいずれも比較的傾向をつかみやすい結果となっている。$Y_{v|v|}$と $N_{v|v|}$へのひれの影響は中型縦ひれ付き状態の結果はほとんど本体単独状態と有意な差はないが、大型縦ひれ付き状

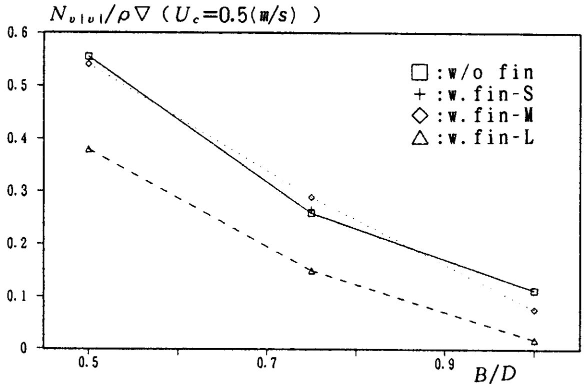

Fig. 6-11　$N_{v/v/}$ (U_c= 0.5(m/s))

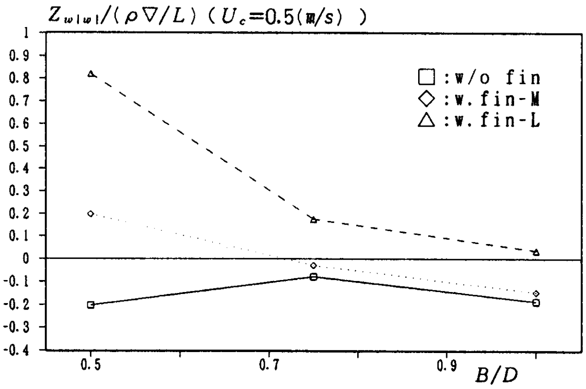

Fig. 6-12　$Z_{w/w/}$ (U_c= 0.5(m/s))

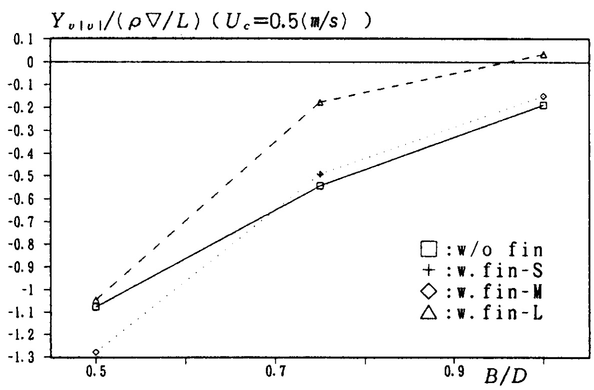

Fig. 6-10　$Y_{v/v/}$ (U_c= 0.5(m/s))

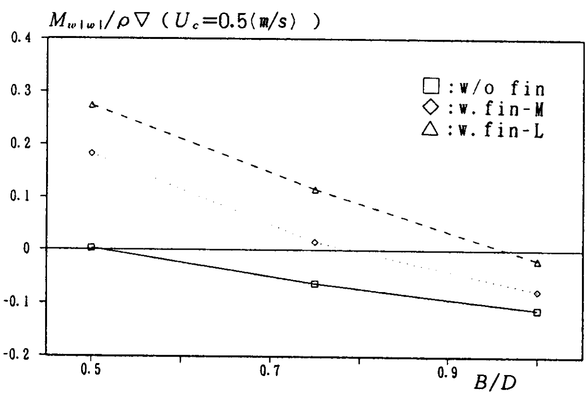

Fig. 6-13　$M_{w/w/}$ (U_c= 0.5(m/s))

態ではひれの影響がはっきり出ている。このことは、ひれの大きさによってその影響の大きさが変化した線形の流体力微係数：Y_v, $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$の傾向とは対照的である。$Z_{w|w|}$, $M_{w|w|}$には幅の小さい本体ほど横ひれの影響が大きく、この傾向は特にで顕著である。これは縦ひれの場合と異なり、幅の小さい本体の場合はひれの幅の方が大きくなる状態となり本体の後流にさらされる部分が相対的に小さくなるためと考えられる。

6.5 Y_r, N_r, Z_q, M_q

回転運動に関する Y_r, N_r, Z_q, M_qは Pure Yaw と Pure Pitch 試験結果から求めた。Pure Yaw, Pure Pitch 試験の場合、(4.48), (4.55) 式中の対応する式には $Y_{r|r|}$, $N_{r|r|}$, $Z_{q|q|}$, $M_{q|q|}$という非線形項が含まれているが振幅が10度と小さいため、これらの非線形項は無視して解析しても良いと考えられる。また、(4.48), (4.55) 式中の対応するは式には非線形項を無視し、さらに既知の量である模型の質量と重心位置に関する項を除いても付加質量に関する同類項が残る。後述の実験式もこれら付加質量に関する項を含んだ形で考えることから、まず $Y_r-m_{11}U_c$, $N_r-m_{26}U_c$, $Z_q+m_{11}U_c$, $M_q+m_{35}U_c$の形で解析結果を示すこととする。

6.5.1 $Y_r-m_{11}U_c$, $N_r-m_{26}U_c$, $Z_q+m_{11}U_c$, $M_q+m_{35}U_c$

これらの解析結果を無次元化して Fig.6–14, Fig.6–15, Fig.6–16, Fig.6–17に実験点として示す。いずれも本体単独状態と大型ひれ付き状態である。$Z_q+m_{11}U_c$の中型本体単独状態の結果だけが他の点の傾向をはずれるように見えるが、その他の流体力微係数の結果も含めて全体としての傾向はまとまっており、本体形状の変化やひれの影響をつかみやすい結果となっている。

(1) 本体単独状態の実験式

本体単独状態の回転角速度に関する流体力微係数：$Y_r-m_{11}U_c$, $N_r-m_{26}U_c$, $Z_q+m_{11}U_c$, $M_q+m_{35}U_c$の実験式は同じく本体単独状態の Y_v, $N_v-(m_{22}-m_{11})U_c$, Z_w, $M_w+(m_{33}-m_{11})U_c$と関連づけて考える。すなわち、r, q をこれらと等価な v, w で置き換えて実験式を構成することとする。r, q の回転中心が本体から大きく離れている場合はその距離からこれらと v, w の関係はある程度推定できると思われるが、r, q の回転中心はほぼ本体中央部にあるため、実験結果から

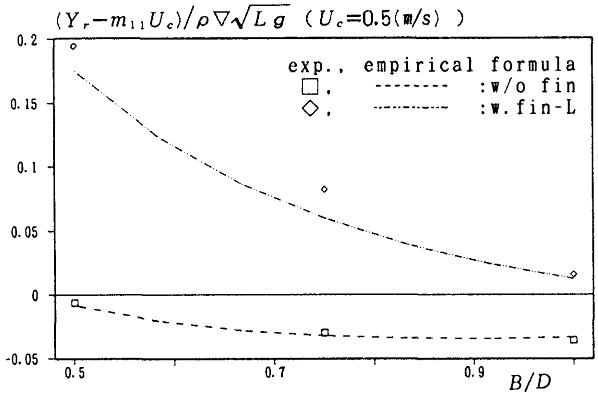

Fig. 6-14 $Y_r-m_{11}U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

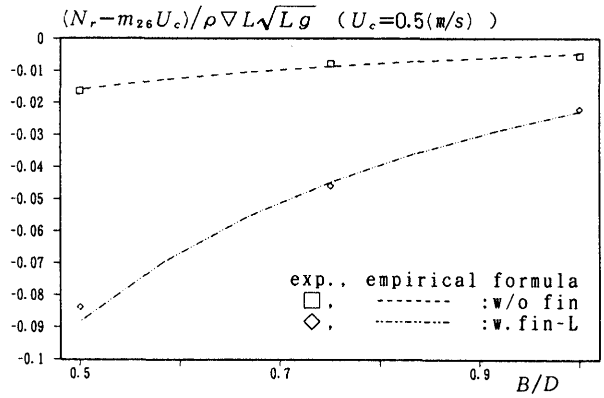

Fig. 6-15 $N_r-m_{26}U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

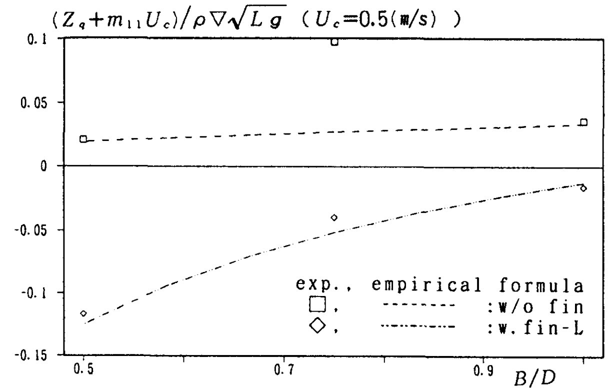

Fig. 6-16 $Z_q+m_{11}U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

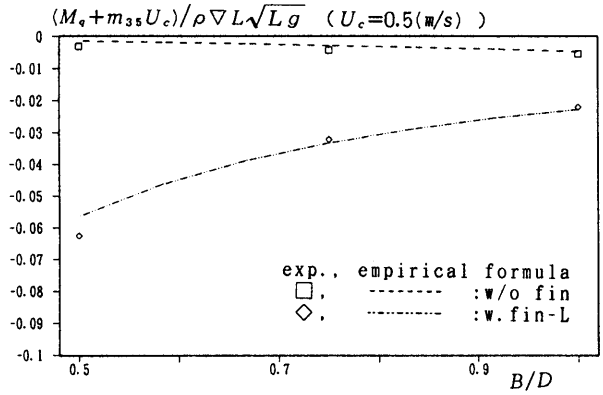

Fig. 6-17　$M_q+m_{35}U_c$ (U_c= 0.5(m/s))

これらの関係を直接求めることとする。その結果、力とモーメントに関してそれぞれ幅，深さを変数とする別々の結果となり、最終的な流体力微係数の関係で示すと、

$$\frac{\{Y_r-m_{11}U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{Y_v^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}f_1(B/L),$$
$$\frac{\{N_r-m_{26}U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla L\sqrt{Lg}}=\frac{\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}f_2(B/L),$$
$$\frac{\{Z_q+m_{11}U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{Z_w^{(b)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}f_1(D/L),$$
$$\frac{\{M_q+m_{35}U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla L\sqrt{Lg}}=\frac{\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(b)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}f_2(D/L) \tag{6.17}$$

となった。添字の (b) は本体単独状態であることを表す。ここで、

$$f_1(t)=0.8933t-0.2467,\ f_2(t)=0.1008t+0.0608 \tag{6.18}$$

である。本模型の場合、f_1は0.0213から0.2893、f_2は0.0910から0.1213の範囲で変化するような関数である。モーメントよりも力の方が厚みの影響が大きいことがわかる。本体単独状態の実験式による計算結果はFig.6–14, Fig.6–15, Fig.6–16, Fig.6–17中の破線で示した。

(2)　ひれ付き状態の実験式

大型ひれ付き状態の回転角速度に関する線形流体力微係数は，に関する線形流体力微係数の場合と同様に本体単独状態の値にひれの成分が足し合わされた形で考えることとした。

ひれの成分を考える場合も r，q をこれらと等価な v，w で置き換えることを考える。v，w に関する線形流体力微係数の実験式の場合はひれに働く力の着力点の座標は(6.12)式から l_fc_2のように表されている。したがって、座標原点からある程度離れたひれに対しては r，q に等価な流速を v_f，w_fで表すと、

$$v_f=l_fc_2r,\ w_f=-l_fc_2q \tag{6.19}$$

で概略推定できると考えられる。r，q に関する流体力微係数のひれの成分を添字の (f) で表すとすると、(6.19) 式の関係よりこれらを

$$\frac{\{Y_r-m_{11}U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{Y_v^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_f}{L}c_2g(B/L,\ D/L),$$
$$\frac{\{N_r-m_{26}U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla L\sqrt{Lg}}=\frac{\{N_v-(m_{22}-m_{11})U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}\times\left(\frac{l_f}{L}c_2\right)^2g(B/L,\ D/L),$$
$$\frac{\{Z_q+m_{11}U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}=\frac{Z_w^{(f)}}{\rho\nabla/\sqrt{L/g}}\frac{l_f}{L}c_2g(D/L,\ B/L),$$
$$\frac{\{M_q+m_{35}U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla L\sqrt{Lg}}=\frac{\{M_w+(m_{33}-m_{11})U_c\}^{(f)}}{\rho\nabla\sqrt{Lg}}\times\left(\frac{l_f}{L}c_2\right)^2g(D/L,\ B/L) \tag{6.20}$$

で表すこととした。ここで、g は r，q と v，w の関係に対するひれと本体との干渉影響を表す係数である。実験結果から g は大型ひれの場合

$$g(t_1,\ t_2)=-2.478t_1-1.191t_2+2.944\ (fin\text{-}L) \tag{6.21}$$

と表すこととした。本模型形状では g は、r に関する流体力微係数の場合は、t_1の項の寄与により1.486から0.7426の範囲で変化する。一方、q に関する流体力微係数の場合は、t_2の項の寄与により0.7426から1.100の範囲で変化する。

以上の手順で $\{Y_r-m_{11}U_c\}^{(f)}$，$\{N_r-m_{26}U_c\}^{(f)}$，$\{Z_q+m_{11}U_c\}^{(f)}$，$\{M_q+m_{35}U_c\}^{(f)}$を計算し、最終的なひれ付き状態の値は(1)で求めた本体単独状態の実験式を用いて、

$$Y_r-m_{11}U_c=\{Y_r-m_{11}U_c\}^{(b)}+\{Y_r-m_{11}U_c\}^{(f)},$$
$$N_r-m_{26}U_c=\{N_r-m_{26}U_c\}^{(b)}+\{N_r-m_{26}U_c\}^{(f)},$$
$$Z_q+m_{11}U_c=\{Z_r+m_{11}U_c\}^{(b)}+\{Z_q+m_{11}U_c\}^{(f)},$$
$$M_q+m_{35}U_c=\{M_q+m_{35}U_c\}^{(b)}+\{M_q+m_{35}U_c\}^{(f)} \tag{6.22}$$

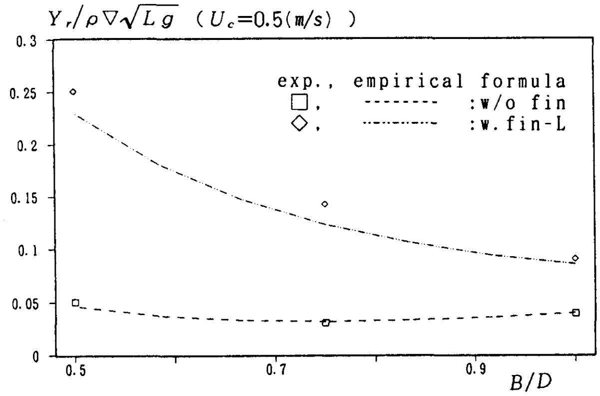

Fig. 6-18 Y_r (U_c= 0.5(m/s))

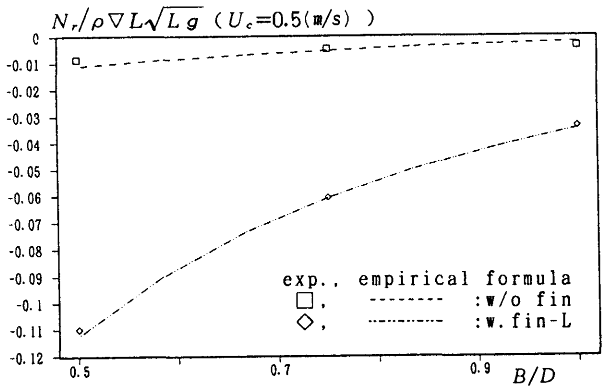

Fig. 6-19 N_r (U_c= 0.5(m/s))

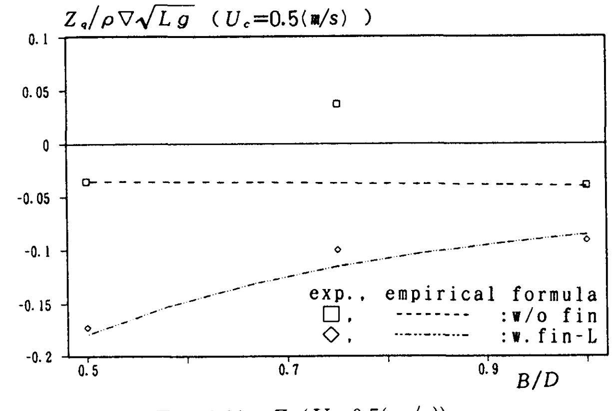

Fig. 6-20 Z_q (U_c= 0.5(m/s))

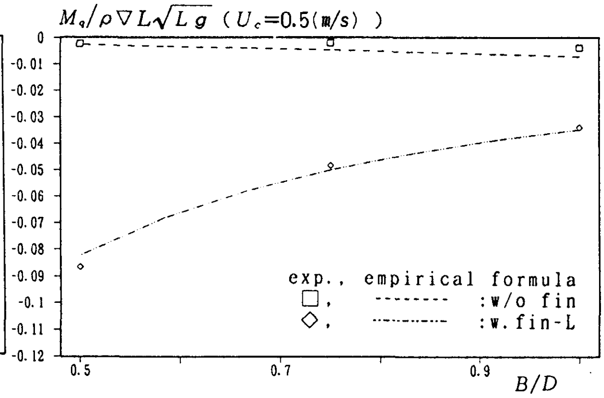

Fig. 6-21 M_q (U_c= 0.5(m/s))

のように求めた。計算した結果は Fig.6–14, Fig.6–15, Fig.6–16, Fig.6–17中の二点鎖線で示した。実験結果の傾向をほぼ表していると思われる。

6.5.2 Y_r, N_r, Z_q, M_q

r と q に関する流体力微係数を付加質量に係る項を除いて実験結果と推定結果を比較したものが Fig.6–18, Fig.6–19, Fig.6–20, Fig.6–21である。差し引く付加質量としては実験結果には対応する実験結果の値を、実験式による計算結果には対応する計算結果を用いた。

ここまで流体力微係数を分解しても実験結果と推定結果は良く対応している。また、モーメントに関してはひれの成分が全体のほとんどを占めていることがわかる。

6.6 X_{vr}, X_{rr}, X_{wq}, X_{qq}

これまで求めた付加質量係数と粘性流体力微係数を用いて、Combined Motion 試験の Sway と Yaw の連成モードの結果から X_{vr}, X_{rr}を、Heave と Pitch の連成モードの結果から X_{wq}, X_{qq}を求めた。Combined Motion は前進速度0.5(m/s)の本体単独状態と大型ひれ付き状態である。振幅は20度と40度の２種類である。

X_{vr}は (4.62) 式の第２式から、X_{rr}は同じく第３式から既知の付加質量を差し引いて求めた。X_{wq}と X_{qq}についても同様に、(4.68)式の第２式と第３式から求めた。いずれも強制運動の周波数の倍の周波数成分の実験データから求めたものである。

結果を無次元化して Fig.6–22, Fig.6–23, Fig.6–24, Fig.6–25に示す。X_{vr}と X_{wq}にはひれの影響のみで振幅の影響はほとんど見られない。このうち X_{wq}に関し

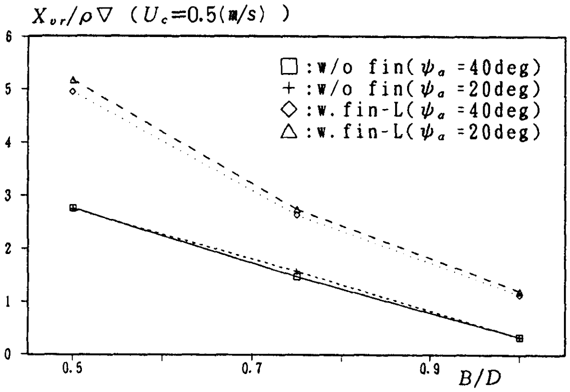

Fig. 6-22 X_{vr} (U_c= 0.5(m/s))

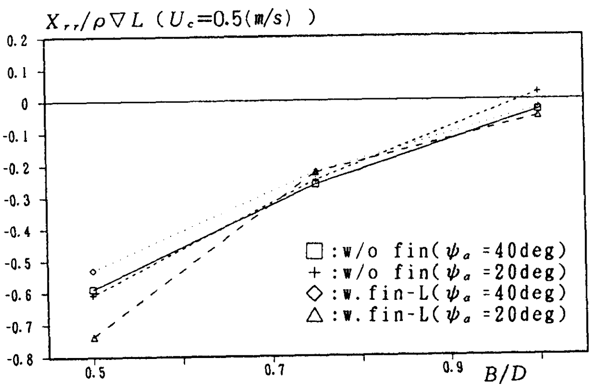

Fig. 6-23 X_{rr} (U_c= 0.5(m/s))

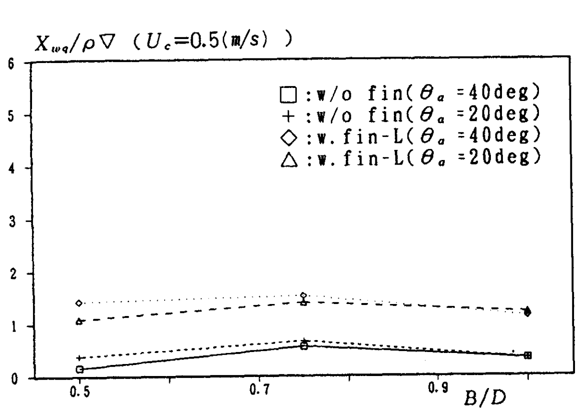

Fig. 6-24 X_{wq} (U_c= 0.5(m/s))

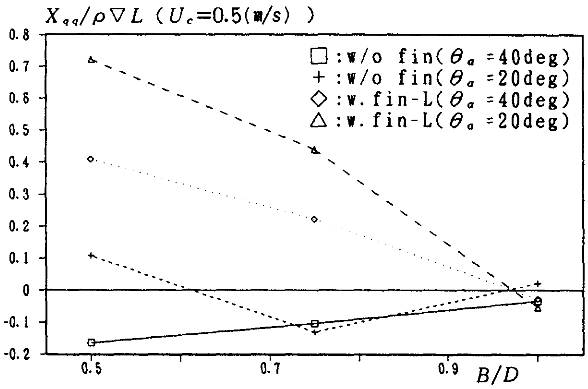

Fig. 6-25 X_{qq} (U_c= 0.5(m/s))

ては本体単独状態でも大型ひれ付き状態でもこの無次元値では B/D にほとんど依存せずにほぼ一定値になっているのに対し、X_{vr}には B/D の影響が現れている。

X_{rr}に関しては、振幅の影響，ひれの有無の影響ともに小さい。X_{qq}に関しては、B/D が小さくなるほど振幅，ひれの影響ともに大きくなるという傾向を示している。

以上のような傾向は線形の粘性流体力微係数の結果に見られた傾向よりも複雑な傾向である。

6.7 $Y_{v|r|}$, $Y_{|v|r}$, $Y_{r|r|}$, $N_{v|r|}$, $N_{|v|r}$, $N_{r|r|}$, $Z_{w|q|}$, $Z_{|w|q}$, $Z_{q|q|}$, $M_{w|q|}$, $M_{|w|q}$, $M_{q|q|}$

これらの流体力微係数も、これまで求めた付加質量係数と粘性流体力微係数を用いて、Combined Motion 試験の Sway と Yaw および Heave と Pitch の連成モードの結果から求めた。これらも前進速度0.5(m/s)の本体単独状態と大型ひれ付き状態であり、振幅は20度と40度の２種類である。

具体的には次のとおりである。(4.62) 式と (4.68) 式の第４式と第６式から既知の項を差し引いてそれぞれ $Y_{v|r|}$, $N_{v|r|}$と $Z_{w|q|}$, $M_{w|q|}$を求めた。また、(4.62) 式と (4.68) 式の第５式と第７式から既知の項を差し引いて、定数成分からそれぞれ $Y_{|v|r}$, $N_{|v|r}$と $Z_{|w|q}$, $M_{|w|q}$を求め、ω に比例する成分からそれぞれ $Y_{r|r|}$, $N_{r|r|}$と $Z_{q|q|}$, $M_{q|q|}$を求めた。

結果を無次元値の形で Fig.6-26から Fig.6-37に示す。高次の項ではあるが本体形状の影響等が現れているほか、この回転運動に関する項には振幅の依存性も大きく現れているようである。

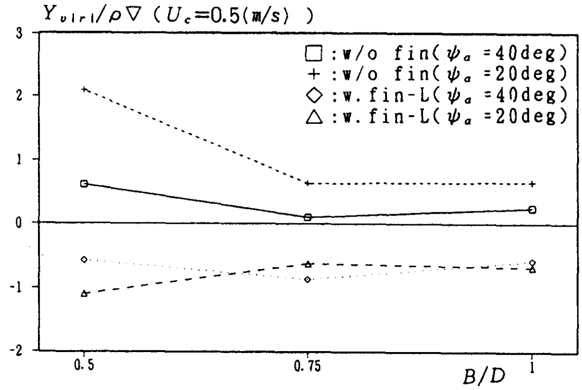

Fig. 6-26 $Y_{v|r|}$ (U_c= 0.5(m/s))

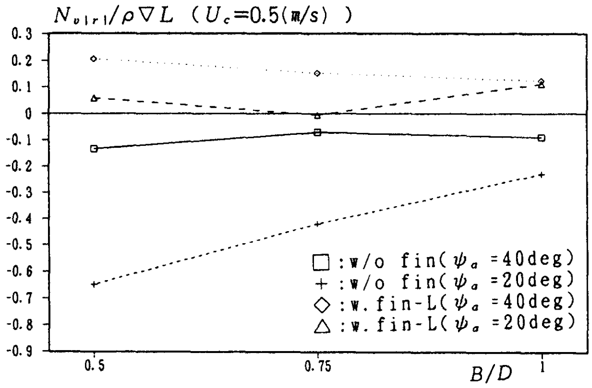

Fig. 6-29 $N_{v|r|}$ (U_c= 0.5(m/s))

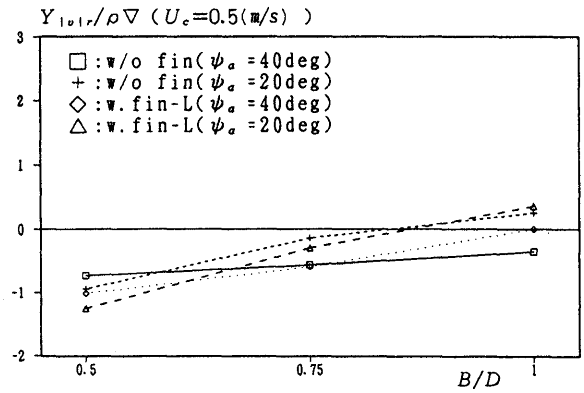

Fig. 6-27 $Y_{|v|r}$ (U_c= 0.5(m/s))

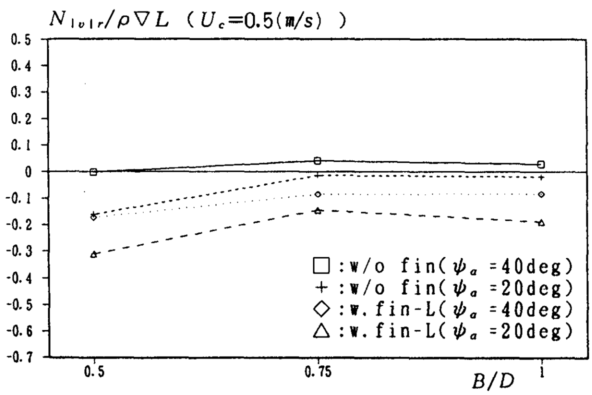

Fig. 6-30 $N_{|v|r}$ (U_c= 0.5(m/s))

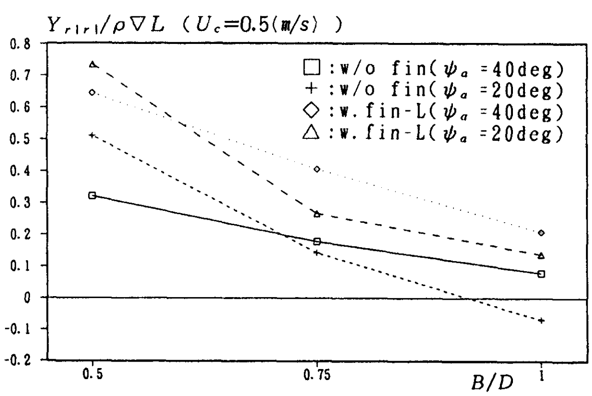

Fig. 6-28 $Y_{r|r|}$ (U_c= 0.5(m/s))

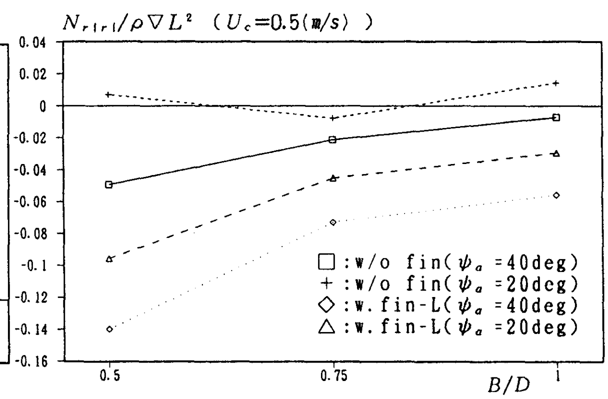

Fig. 6-31 $N_{r|r|}$ (U_c= 0.5(m/s))

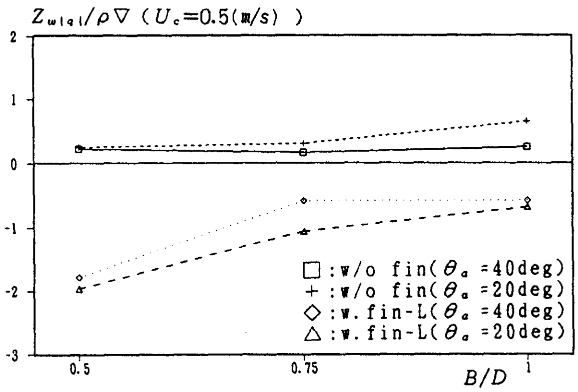

Fig. 6-32 $Z_{w/q/}$ (U_c= 0.5(m/s))

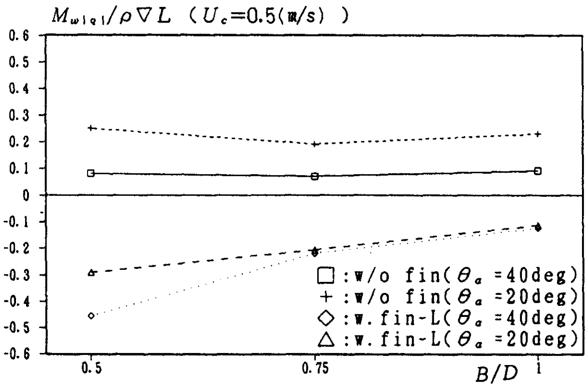

Fig. 6-35 $M_{w/q/}$ (U_c= 0.5(m/s))

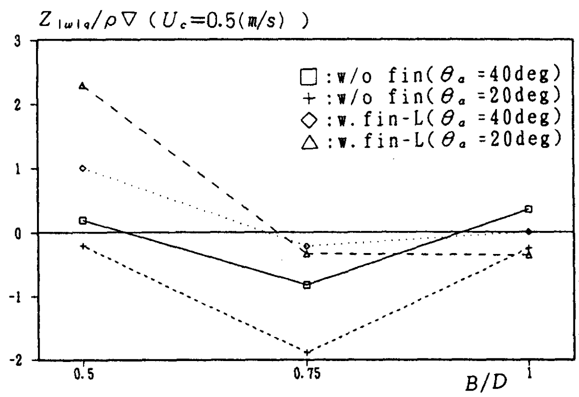

Fig. 6-33 $Z_{/w/q}$ (U_c= 0.5(m/s))

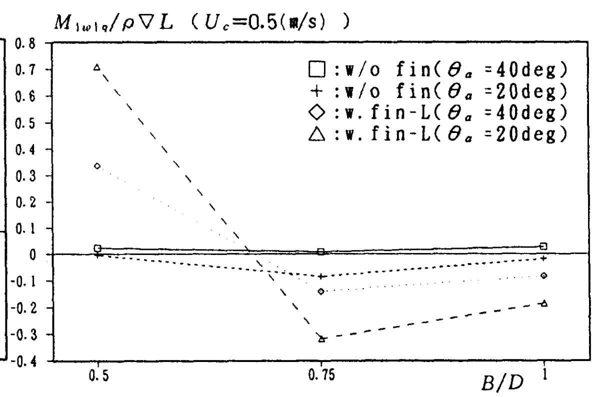

Fig. 6-36 $M_{/w/q}$ (U_c= 0.5(m/s))

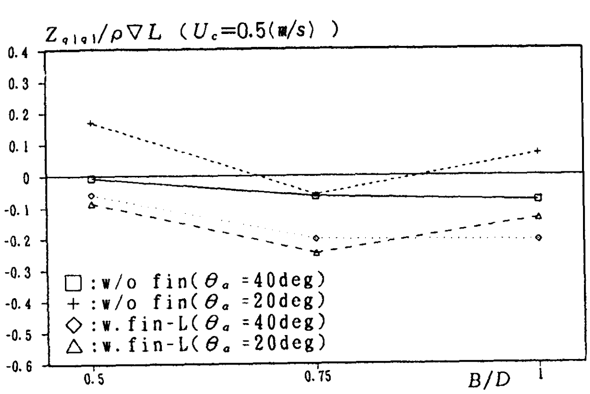

Fig. 6-34 $Z_{q/q/}$ (U_c= 0.5(m/s))

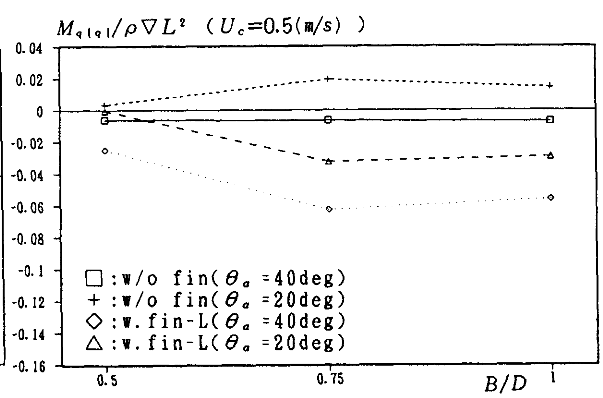

Fig. 6-37 $M_{q/q/}$ (U_c= 0.5(m/s))

7. 結　言

海中移動体の模型を形状を系統的に変えて本体3種類，ひれ3種類製作し、斜航試験とPMM試験を中心に海中移動体模型の形状，構成および実験状態を変化させて一連の水槽実験を実施した。

そして、非線形の粘性流体力微係数を含む海中移動体の3次元の運動方程式を示した上で、1状態あたり7個の付加質量係数と32個の粘性流体力微係数を、各種の形状，構成および実験状態にある海中移動体模型に関してそれぞれ求めた。これらの結果から、本体の幅深さ比やひれの有無といった海中移動体模型の形状，構成の違いや前進速度の有無といった実験状態の変化が付加質量係数と粘性流体力微係数におよぼす影響が明かとなった。特に付加質量係数については前進速度影響が比較的大きいこと、また粘性流体力微係数については本体とひれとの干渉影響が大きいこと等が明かとなった。

さらに、付加質量係数と線形の粘性流体力微係数を実験によらずに推定することは海中移動体の運動特性を判断する上で重要であるとの考えから、今回の広範な実験結果をもとにこれらを推定するための実験式を提示した。付加質量係数に関しては長さ方向の断面の2次元的な付加質量を積分した値に3次元影響係数と前進速度影響係数を乗じた形で実験式を構成した。線形の粘性流体力微係数に関しては、並進運動の項については揚力線理論を基本として考え、また回転運動の項については並進運動の項との関連を基本として考え、いずれも本体やひれの形状を表す係数を乗じた形で実験式を構成した。その結果、付加質量係数も線形の粘性流体力係数もほぼこれらの実験式で傾向を表すことができることが確認された。また、これらの実験式によって、上述の付加質量の前進速度影響や粘性流体力微係数に対する本体とひれの干渉影響等を定量的な形で表現することができた。

本体3種類とひれの組み合わせを変化させておこなった今回の実験の一連のデータとそれらから得られた実験式は、ある程度の海中移動体形状，構成等の変化にも対応し得るものであると考えられ、今後の潜水艇開発にとって有用な情報になると考えられる。

参考文献

1)　渡辺巖，上野道雄，沢田博史，安藤定雄，大川豊，田村兼吉：有索式ROVの実海域実験について，第56回船舶技術研究所研究発表会講演集（1990.11.），pp.113-116

2)　D. R. Yoerger, The Autonomous Benthic Explorer (ABE) :A Deep Ocean AUV for Scientific Seafloor Survey, Seminar on Autonomous Underwater Vehicles (Nov., 1990), pp.G1

3)　L. M. Milne-Thomson : Theoretical Hydrdynamics, Fifth Edition, Macmillan & Co. Ltd., pp.545-552

4)　守屋富次郎：空気力学序論，培風館，pp.126-127

5)　小川陽弘，浜本剛実：操縦運動の数学モデルの基礎，日本造船学会，第3回操縦性シンポジウム（1981.12.），pp. 9-26

6)　菅信：3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響－K＝0とK＝∞の場合（その2：一般船型への適用）－，船舶技術研究所報告，第22巻第2号（1985.3.），pp. 21-41

7)　上野道雄，渡辺巌，沢田博史：海中移動体に働く非定常流体力について－PMM試験による流体力の計測－，第58回船舶技術研究所研究発表会講演集（1991.12.），pp. 11-14

8)　J. N. Newman : Marine Hydrodynamics, The MIT Press, pp. 144-148

9)　上野道雄，渡辺巌，沢田博史：海中移動体に働く定常流体力について，第56回船舶技術研究所研究発表会講演集（1990.11.），pp. 117-120

10)　藤井斉，津田達雄：自航模型による舵特性の研究(2)，造船協会論文集，第110号（1961），pp. 31-42

付　録

A　実験結果

実験データを流体力微係数に分解する前の形でいくつか例をとって報告する。ここでは流体力微係数に分解した後では現れてこない流体力の特性、すなわち斜航試験に関しては後進状態も含む大斜航角状態での特性やPMM試験に関しては振幅依存性や周波数依存性等の特性についても記すこととする。

4.1.4で述べた粘性流体力の特に非線形成分の数学的表現を変えた場合にはそれらを構成する流体力微係数を求めるための実験解析手順が本論で示したものとは変わってくるため、その場合はここに例示する各種のデータが不可欠となると考えられる。

A.1　抵抗試験結果

最も基本的な直進状態での抵抗試験の場合（4.10）式より、

$$\hat{X}=X_0\bar{u}^2 \quad \text{(A.1)}$$

前述のように模型を治具に取り付けるにあたって中型と小型本体については縦状態と横状態があるのでこれら両方について抵抗試験をおこなった。また、各模型についてひれなし状態と大型ひれ付き状態とをおこなった。前進速度は0.2(m/s)から0.6(m/s)である。

結果を小型本体を例にとってFig. A−1に示す。ここでは計測値：$\hat{X}$ を有次元値で示している。縦状態と横状態あるいはひれの有無の差は有意なものではないことがわかる。中型本体の場合には縦状態と横状態で若干の差がみられたが、これは模型の製作および設置精度の問題であると考えられる。

A.2 斜航試験結果

計測結果は小型本体の横流れ角を変化させた場合を例にとってFig. A−2に示す。斜航状態にある海中移動体模型に働く流体力の計測値 $\hat{X}$, $\hat{Y}$, $\hat{N}$ を無次元化して示したものである。これらは斜航角のある程度の範囲までは（4.15）式と（4.19）式のように流体力微係数を用いて表されると考えられる。

縦状態で横流れ角を変化させた場合には B/D の小さい小型本体ほど揚力体としての性質がよく現れており、その失速現象が特に $\hat{X}$、$\hat{Y}$ に明瞭に現れていた。特に小型本体の $\hat{X}$ の結果では40度程度の横流れによって大きな推力が発生していた状態が少し斜航角が大きくなっただけで失速現象によって急激に抵抗に変化しているのがわかる。横状態で迎え角を変化させた

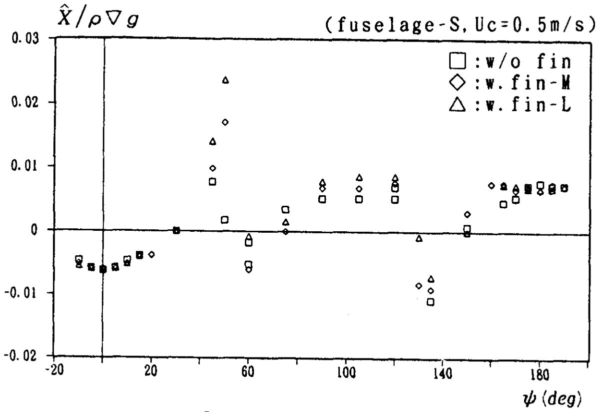

Fig. A-2-1 $\hat{X}$ (Oblique Angle : ψ, fuselage-S)

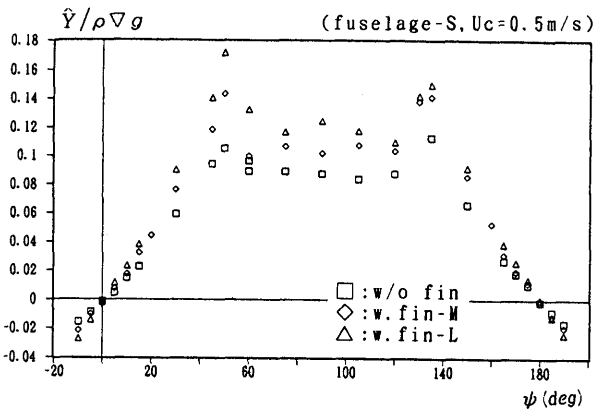

Fig. A-2-2 $\hat{Y}$ (Oblique Angle : ψ, fuselage-S)

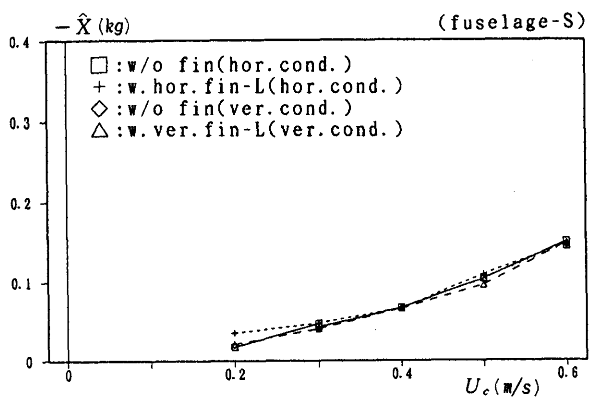

Fig. A-1 Resistance test (fuselage-S)

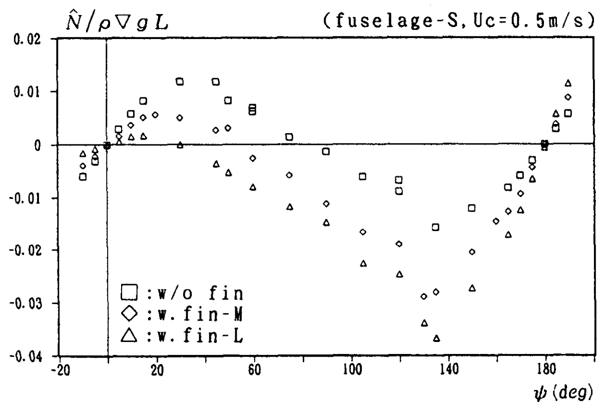

Fig. A-2-3 $\hat{N}$ (Oblique Angle : ψ, fuselage-S)

場合はいずれの本体においてもこの種の現象は斜航角が90度を越えたあたりから発生していたが、海中移動体の制御をする上でこのように流体力特性が不連続に近い形で現れるのは好ましいこととは言えないと思われる。

方向の静安定性は横流れ角を変化させた場合のの結果から知ることができる。大型本体に大型縦ひれをつけた状態のみが方向安定、中型本体に大型縦ひれをつけた状態が限界安定、その他の状態はすべて方向が静的に不安定な結果となっていた。縦の静安定は迎え角を変化させた場合のの結果から知ることができる。この場合は3種類の本体単独の場合と大型本体に中型横ひれをつけた場合のみが不安定で、その他はすべて安定を示していた。結果として、縦の静安定性にとってよりも方向の静安定性にとって今回製作したひれの大きさは不足している状態が多いと言える。

A.3 PMM試験結果

PMM試験結果は得られた流体力をフーリエ解析することによって必要とする成分を求めた。フーリエ解析にあたっての基本周波数には強制運動の周波数を用いた。

A.3.1 Pure Surge試験結果

Pure Surge試験は前進速度なしの状態のみでおこなった。振幅は0.12(m)、周波数は0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5(rad/s)である。小型本体と中型本体はひれなしの状態、大型本体のみ大型縦ひれがついた状態であるが、この運動モードの場合、ひれの影響は無視できる程度であると考えられる。

結果は、(4.26) 式より、既知の成分を差し引いた

$$\hat{X}_{s1}/\omega^2 x_a - m = m_{11},\ -\hat{X}_{c1}/\omega x_a = X_u \qquad (\mathrm{A}.2)$$

の無次元値で表す。大型本体を例にとって結果をFig. A-3に示す。この運動モードは海中移動体模型の主流方向であるため計測される力は小さい。若干データのばらつきはあるもののは求めることができると思われる。しかし、X_uを決めるには精度が不足していると思われる。

A.3.2 Pure Sway, Pure Heave試験結果

Pure Sway試験とPure Heave試験は第1回PMM試験と第2回PMM試験の両方で実施した。実験状態はTable 3-5,Table 3-6に示すとおりであるが、計測される力が非常に小さくなる周波数の小さいところでは一部計測を省略した部分もある。

振幅が比較的小さいため、非定常流体力としては高

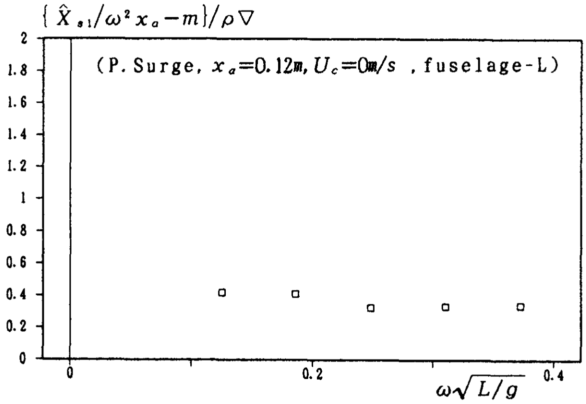

Fig. A-3-1 $\hat{X}_{s1}/\omega^2 x_a - m$ (fuselage-L, P. Surge)

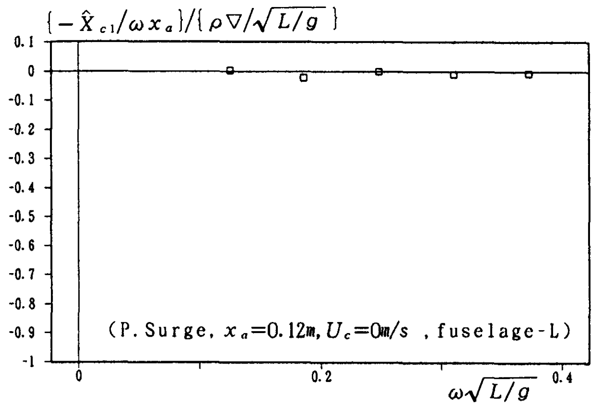

Fig. A-3-2 $-\hat{X}_{c1}/\omega x_a$ (fuselage-L, P. Surge)

次の項となる$\hat{X}$を除く$\hat{Y}$, $\hat{N}$と$\hat{Z}$, $\hat{M}$に付いて、(4.34), (4.41) 式より、それぞれ

$$\hat{Y}_{s1}/\omega^2 y_a - m = m_{22},$$
$$-\hat{Y}_{c1}/\omega y_a = Y_v + \frac{8}{3\pi} Y_{v|v|}\omega y_a,$$
$$\hat{N}_{s1}/\omega^2 y_a - m x_g = m_{62},$$
$$-\hat{N}_{c1}/\omega y_a = N_v + \frac{8}{3\pi} N_{v|v|}\omega y_a - (m_{22} - m_{11})U_c \qquad (\mathrm{A}.3)$$

$$\hat{Z}_{s1}/\omega^2 z_a - m = m_{33},$$
$$-\hat{Z}_{c1}/\omega z_a = Z_w + \frac{8}{3\pi} Z_{w|w|}\omega z_a,$$
$$\hat{M}_{s1}/\omega^2 z_a + m x_g = m_{53},$$

$$-\hat{M}_{c1}/\omega z_a = M_w + \frac{8}{3\pi} M_{w|w|}\omega y_a + (m_{33} - m_{11})U_c \tag{A.4}$$

が得られる。

大型ひれ付き大型本体の Pure Sway 試験結果を例にとって Fig. A−4に示す。一部に若干のデータのばらつきはあるものの第 1 回 PMM 試験の結果と第 2 回 PMM 試験の結果はよく対応しており、実験装置の違いや水深の違いによる差は認められず、本実験はよい再現性を示していることがわかる。また第 2 回 PMM 試験の水深1.2m でも自由表面の影響を避けるには十分であると言える。

周波数の小さいところでは精度が低いこともあってデータが若干ばらつく傾向も見られるが、前進速度のある場合は周波数依存性，振幅依存性が小さいことを示している。(A.3)，(A.4)式より、この程度の振幅では線形項が支配的となっており、非線形項を求めるには不十分であると考えられる。

また、前進速度のある場合にもその前進速度の大きさによって結果に差がみられる。(A.3)，(A.4)式のモーメントの cos 成分のように明らかに前進速度依存項がある場合はもちろんであるが、それ以外の項にも差がみられるのは流体力微係数に展開する場合の基準状態が異なるためであると考えられる。すなわち、同じ流体力微係数でも前進速度が異なる場合は定義自体が異なるということである。

前進速度がない場合、cos 成分に周波数の変化に対してほぼ直線的に変化する様子が見られるのは (A.3)，(A.4) 式中の粘性流体力の非線形項に対応する成分があることを示していると考えられる。

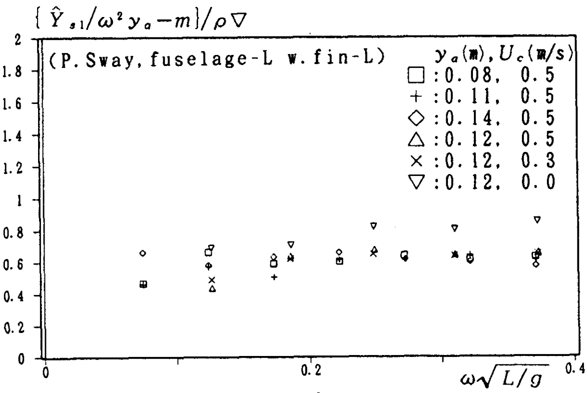

Fig. A-4-1 $\hat{Y}_{s1}/\omega^2 y_a - m$
(fuselage-L, w. fin-L, P. Sway)

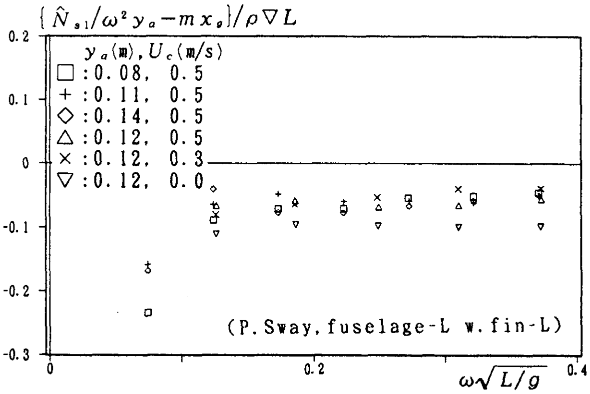

Fig. A-4-3 $\hat{N}_{s1}/\omega^2 y_a - mx_g$
(fuselage-L w. fin-L, P. Sway)

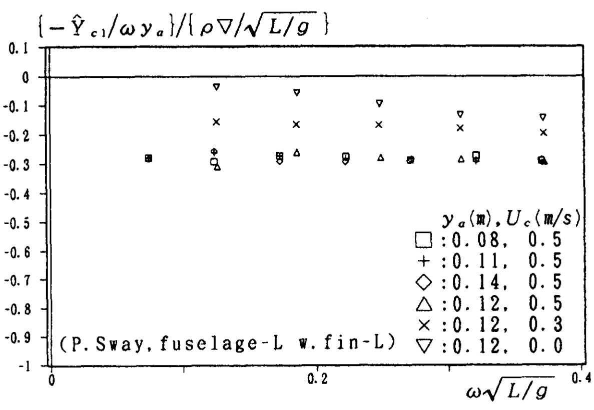

Fig. A-4-2 $-\hat{Y}_{c1}/\omega y_a$
(fuselage-L w. fin-L, P. Sway)

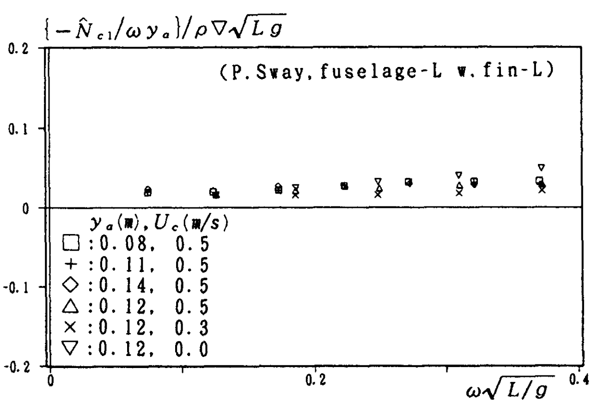

Fig. A-4-4 $-\hat{N}_{c1}/\omega y_a$
(fuselage-L w. fin-L, P. Sway)

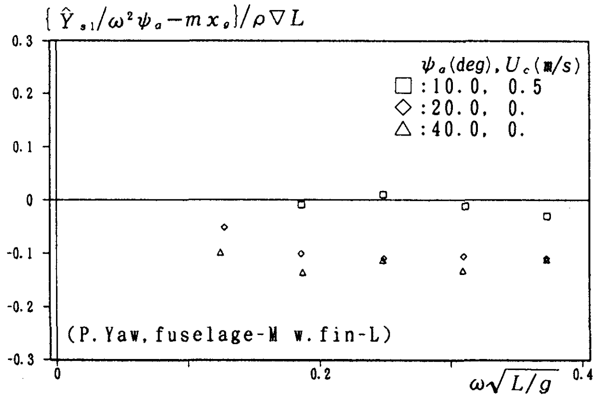

Fig. A-5-1 $\hat{Y}_{s1}/\omega^2\psi_a - mx_g$
(fuselage-M w. fin-L, P. Yaw)

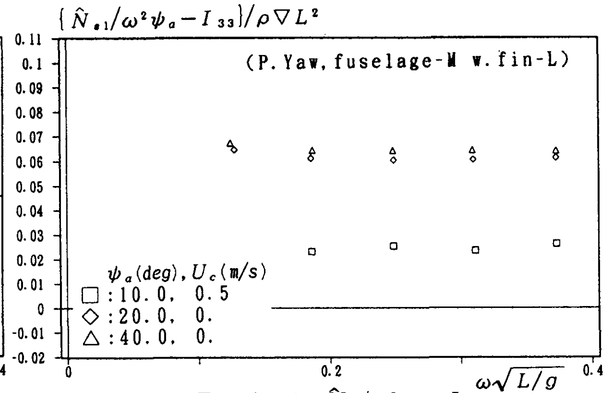

Fig. A-5-3 $\hat{N}_{s1}/\omega^2\psi_a - I_{33}$
(fuselage-M w. fin-L, P. Yaw)

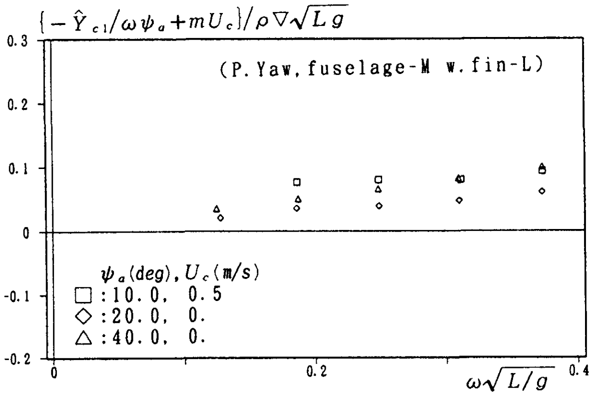

Fig. A-5-2 $-\hat{Y}_{c1}/\omega\psi_a + mU_c$
(fuselage-M w. fin-L, P. Yaw)

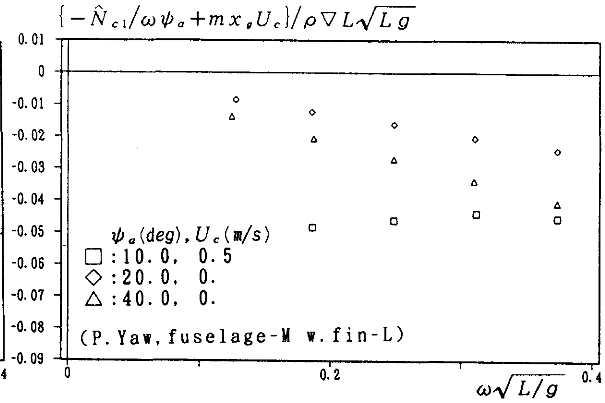

Fig. A-5-4 $-\hat{N}_{c1}/\omega\psi_a + mx_gU_c$
(fuselage-M w. fin-L, P. Yaw)

A.3.3 Pure Yaw, Pure Pitch 試験結果

実験状態は Table 3–6に示すとおりである。ここでも周波数の低いところでは計測される力が小さくなるため一部計測を省略した。前進速度のある場合は振幅が小さいため、ここでも非定常流体力としては高次の項となる $\hat{X}$ を除くと、$\hat{Y}$, $\hat{N}$ と $\hat{Z}$, $\hat{M}$ に付いてそれぞれ (4.48), (4.55) 式より、

$$\hat{Y}_{s1}/\omega^2\psi_a - mx_g = m_{26},$$
$$-\hat{Y}_{c1}/\omega\psi_a + mU_c = Y_r + \frac{8}{3\pi} Y_{r|r|}\omega\psi_a - m_{11}U_c,$$
$$\hat{N}_{s1}/\omega^2\psi_a - I_{33} = m_{66},$$
$$-\hat{N}_{c1}/\omega\psi_a + mx_gU_c = N_r + \frac{8}{3\pi} N_{r|r|}\omega\psi_a - m_{26}U_c, \tag{A.5}$$

$$\hat{Z}_{s1}/\omega^2\theta_a + mx_g = m_{35},$$
$$-\hat{Z}_{c1}/\omega\theta_a - mU_c = Z_q + \frac{8}{3\pi} Z_{q|q|}\omega\theta_a + m_{11}U_c,$$
$$\hat{M}_{s1}/\omega^2\theta_a - I_{22} = m_{55},$$
$$-\hat{M}_{c1}/\omega\theta_a + mx_gU_c = M_q + \frac{8}{3\pi} M_{q|q|}\omega\theta_a + m_{35}U_c \tag{A.6}$$

が得られる。

大型ひれ付き中型本体の Pure Yaw 試験結果を例にとって Fig. A–5に示す。

前進速度のある場合はいずれの状態に置いても周波数依存性は小さく、振幅が小さいこともあって、(A.5), (A.6) 式の粘性流体力の非線形項の影響は無視できる程度であると考えられる。前進速度の大きさの影響は大型本体で見られるだけであるが、本体単独では顕著ではなく、大型縦ひれを付けた状態でのみ

差が現れていた。

一方、前進速度のない場合は、Pure Sway, Pure Heave の場合と同様に、特に大型ひれを付けた状態の成分に周波数の変化に対してほぼ直線的に変化する様子が見られ、(A.5), (A.6)式中の粘性流体力の非線形項に対応する成分があることを示していると考えられる。

A.3.4 Combined Motion 試験結果

Sway と Yaw の連成モードの場合は(4.62)式より、

$$
\begin{aligned}
&2\hat{X}_{s2}/\omega\psi_a^2 = -\{X_{vr} + (m_{22} - m_{11})\}U_c,\\
&-2\hat{X}_{c2}/\psi_a^2 - mx_g\omega^2 = \frac{1}{2}X_uU_c - X_{vv}U_c^2\\
&\quad + (X_{rr} + m_{26})\omega^2,\\
&\hat{Y}_{s1}/\psi_a - mx_g\omega^2 = -Y_uU_c - \frac{8}{3\pi}Y_{v|v|}U_c^2\psi_a\\
&\quad - \frac{4}{3\pi}Y_{v|r|}U_c\omega\psi_a + m_{26}\omega^2,\\
&-\hat{Y}_{c1}/\omega\psi_a = Y_r + \frac{8}{3\pi}Y_{r|r|}\omega\psi_a + \frac{4}{3\pi}Y_{|v|r}U_c\psi_a\\
&\quad + (m_{22} - m_{11})U_c,\\
&\hat{N}_{s1}/\psi_a - I_{33}\omega^2 = -N_vU_c - \frac{8}{3\pi}N_{v|v|}U_c^2\psi_a\\
&\quad - \frac{4}{3\pi}N_{v|r|}U_c\omega\psi_a + (m_{22} - m_{11})U_c^2 + m_{66}\omega^2,\\
&-\hat{N}_{c1}/\omega\psi_a = N_r + \frac{8}{3\pi}N_{r|r|}\omega\psi_a + \frac{4}{3\pi}N_{|v|r}U_c\psi_a
\end{aligned}
\tag{A.7}
$$

Heave と Pitch の連成モードの場合は (4.68) 式より、

$$
\begin{aligned}
&2\hat{X}_{s2}/\omega\theta_a^2 = -\{X_{wq} - (m_{33} - m_{11})\}U_c,\\
&-2\hat{X}_{c2}/\theta_a^2 - mx_g\omega^2 = \frac{1}{2}X_uU_c - X_{ww}U_c^2\\
&\quad + (X_{qq} - m_{35})\omega^2,\\
&\hat{Z}_{s1}/\theta_a + mx_g\omega^2 = Z_wU_c + \frac{8}{3\pi}Z_{w|w|}U_c^2\theta_a\\
&\quad + \frac{4}{3\pi}Z_{w|q|}U_c\omega\psi_a + m_{35}\omega^2,\\
&-\hat{Z}_{c1}/\omega\theta_a = Z_q + \frac{8}{3\pi}Z_{q|q|}\omega\theta_a + \frac{4}{3\pi}Z_{|w|q}U_c\theta_a\\
&\quad - (m_{33} - m_{11})U_c,\\
&\hat{M}_{s1}/\theta_a - I_{22}\omega^2 = M_wU_c + \frac{8}{3\pi}M_{w|w|}U_c^2\psi_a\\
&\quad + \frac{4}{3\pi}M_{w|q|}U_c\omega\theta_a + (m_{33} - m_{11})U_c^2 + m_{55}\omega^2,\\
&-\hat{M}_{c1}/\omega\theta_a = M_q + \frac{8}{3\pi}M_{q|q|}\omega\theta_a + \frac{4}{3\pi}M_{|w|q}U_c\theta_a
\end{aligned}
\tag{A.8}
$$

となる。

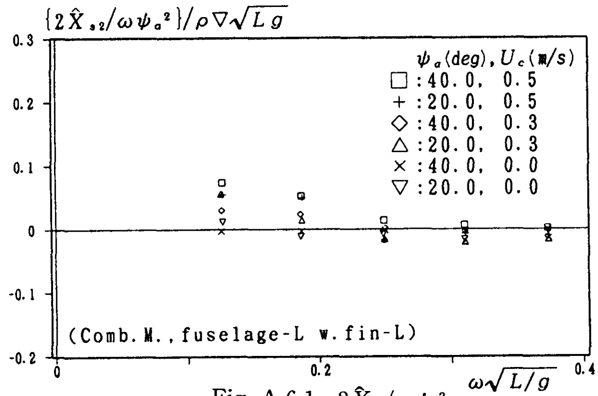

Fig. A-6-1 $2\hat{X}_{s2}/\omega\psi_a^2$
(fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

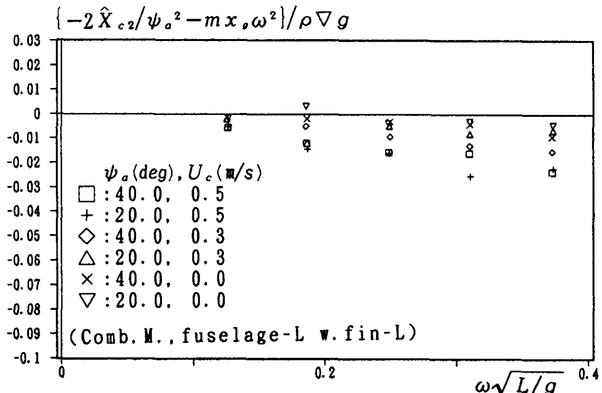

Fig. A-6-2 $-2\hat{X}_{c2}/\psi_a^2 - mx_g\omega^2$
(fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

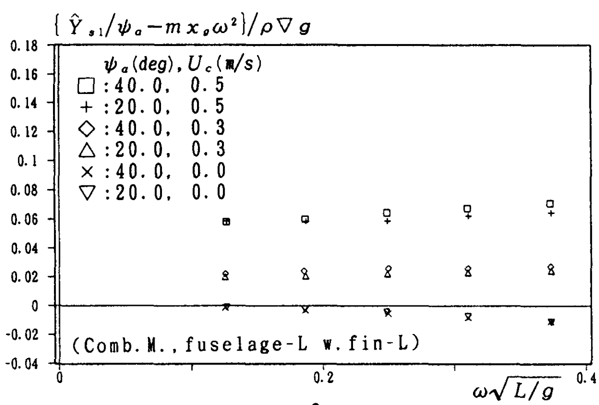

Fig. A-6-3 $\hat{Y}_{s1}/\psi_a - mx_g\omega^2$
(fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

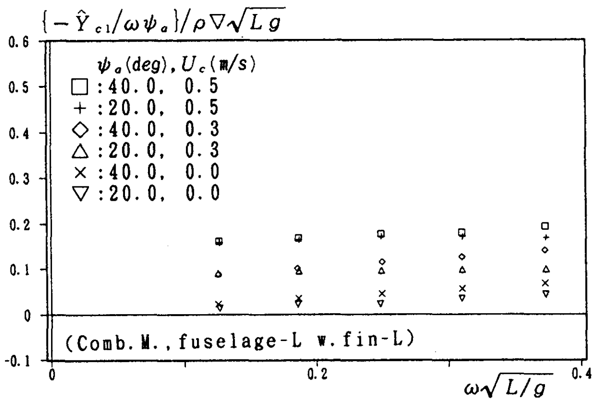

Fig. A-6-4 $-\hat{Y}_{c1}/\omega\psi_a$ (fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

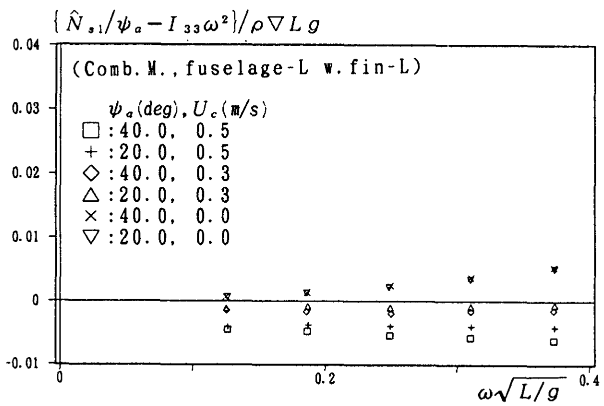

Fig. A-6-5 $-\hat{N}_{c1}/\psi_a - I_{33}\omega^2$ (fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

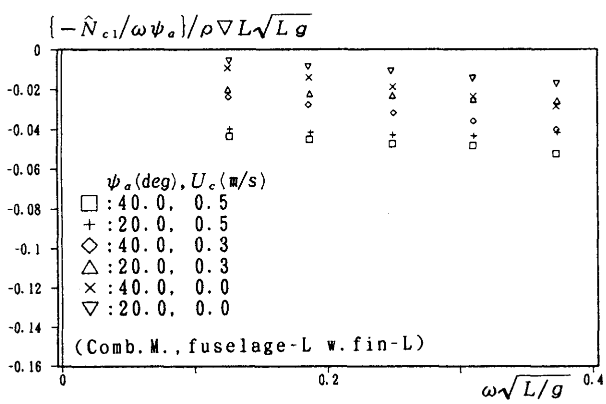

Fig. A-6-6 $-\hat{N}_{c1}/\omega\psi_a$ (fuselage-L w. fin-L, Comb. M.)

大型ひれ付き大型本体の Sway と Yaw の連成モードの結果を例にとって Fig. A-6に示す。Combined Motion 試験で前進速度を 0 (m/s) とすると、前進速度なしの場合の Pure Yaw と Pure Pitch 試験と同じ状態となるため、データは重複するが、これらの状態も同じ解析をおこなって図中に示した。

$\hat{X}$ の結果は、倍周波数成分の振幅の解析結果であって、$\hat{Y}$, $\hat{N}$ 等よりも高次の項からのみ構成されているためばらつきはあるが、ある程度の傾向を見て取れる。前進速度のある場合の Sway と Yaw の連成モードなどの成分には (A.7), (A.8) 式中にあるように ω^2の項の存在を示す結果も見られるが、*sin* 成分は周波数の小さい部分で増加傾向がみられるなど (A.7), (A,8) 式の表現では不十分と思われる結果も見られるようである。

$\hat{Y}$, $\hat{N}$ と $\hat{Z}$, $\hat{M}$ の結果では、前進速度のある場合も Pure Sway, Pure Yaw 試験よりも振幅が大きいため、比較的データのまとまりはよい。(A.7), (A.8)式に見られるように各データは周波数や振幅等を含んだ多くの項からなっていると考えられるが、結果的に特に本体単独の状態ではその構成は複雑であるが周波数依存性は小さいようであった。大型ひれ付き状態では周波数依存性の他にも振幅依存性や前進速度依存性も現れており、(A,7), (A,8)式の各項の存在を裏付けていると思われる。