

# 流線型無人無索潜水艇に働く線形流体力及び 操縦性能に関する研究 (第2報 横運動)

正員 邱 逢 琛\* 郭 振 華\*  
黄 經 程\*\* 王 治 平\*\*

On the Linear Hydrodynamic Forces and the Maneuverability of an Unmanned Untethered Submersible with Streamlined Body (2nd Report : Lateral Motions)

by Forng-Chen Chiu, *Member* Jenhwa Guo  
Ching-Chen Huang Jr-Ping Wang

## Summary

A series of captive model tests was carried out to unmanned untethered submersible AUV-HM1 testbed, which has a body of a streamlined section, developed at National Taiwan University. Furthermore, for estimating its lateral stability derivatives the same method, which is based on the empirical formula proposed by Bottaccini and used in previous paper, is applied. As a result, both of the two sets of stability indices evaluated with estimated values of stability derivatives as well as those obtained by measurement, show that AUV-HM1 testbed is unstable on lateral mode. This result agrees well with the tendency shown by the vehicle responses for step heading commands in the pool test performed with the AUV-HM1 testbed.

## 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>において、台湾大学造船及海洋工程学科が開発中の無人無索「自律型」潜水艇 AUV-HM1 テストベッド<sup>2)</sup>の縦運動特性に着目して、拘束模型試験及び Bottaccini<sup>3)</sup>が整理した経験式に基づいた推定法のそれぞれによって得られた安定性微係数を分析した上、その縦運動の安定性と旋回性などの運動特性を検討した。その結果、縦方向の運動がかなり安定していることがわかる。なお、示した推定法によって得られた安定性微係数の推定値に基づいて、縦運動操縦性能を把握するには、実用上十分有効といえることも明らかにした<sup>1)</sup>。

その引続きとして、本報では、鯨型潜水艇 AUV-HM1 テストベッドにとって、通常安定性は問題となる可能性がより強いと思われる横方向の運動特性に着目することにし

た。前報と同様に、艇長 2 m の実物大の模型を用いて、台湾大学の曳航水槽 (130×8×4 m, 台車最高速度 5 m/sec) で斜行試験と強制動揺試験を行い、横運動安定性微係数を分析した上、その横方向の運動特性を検討した。なお、横運動に関する線形流体力係数の推定について、前報で示した推定法を適用して推定した結果に対する検討も加えた。

## 2. 供 試 模 型

本研究の対象とした AUV-HM1 テストベッドの外観及びその内部の一般配置については前報<sup>1)</sup>を参照されたい。なお、供試模型としては実物大のものを使用した。その主要目を Table 1 に示す。胴体中心縦断面と中心水平断面の形状は Fig. 1 に示すとおりである。なお、胴体横断面は楕円形とした。胴体中心縦断面については、Landweber ら<sup>4)</sup>が流線型回転体を記述するために提案した 6 次多項式を用いることとした。その詳細については前報<sup>1)</sup>を参照されたい。

胴体後方の左右、上下に、水平固定翼と垂直固定翼が設けられ、それぞれ胴体の左右、上下に飛び出ないものとした。水平舵は水平固定翼から 30 cm を張出してあるが、垂直舵は設けられてない。かわりに横方向の旋回は二軸間 40

\* 台湾大学工学部

\*\* 台湾大学大学院造船及海洋工学研究科

原稿受付 平成 9 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 9 年 11 月 14, 15 日

Table 1 Principal particulars of AUV-HM1 testbed

Length (body/overall)	2.0/2.0 m
Breadth (body/including elevators)	1.0/1.6 m
Height	0.6/0.6 m
Project area of body $S_z$	1.791 m <sup>2</sup>
Wetted surface area of body $S_w$	4.38 m <sup>2</sup>
Displaced volume of body $\nabla$	0.677 m <sup>3</sup>
Centroid of body	0.909 m from nose
Project area of elevators $S_e$	0.243 m <sup>2</sup>
Project area of horizontal fins $S_{HF}$	0.091 m <sup>2</sup>
Project area of vertical fins $S_{VF}$	0.148 m <sup>2</sup>

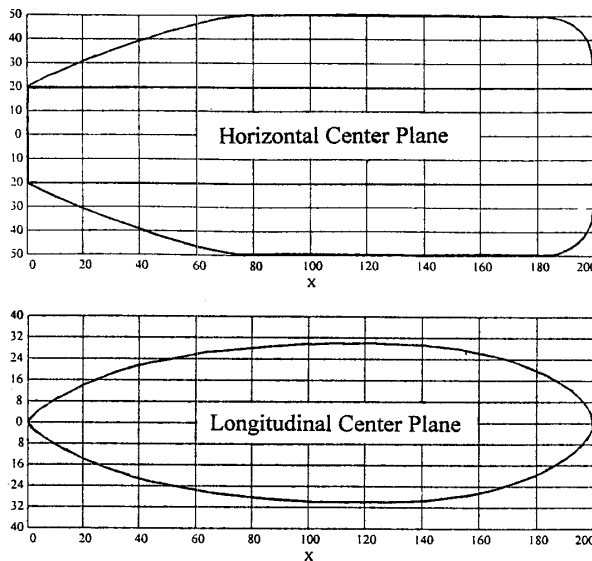


Fig. 1 Profile of body

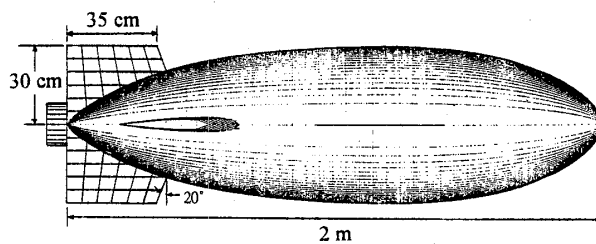


Fig. 2 Profile of vertical fins

cmを離れる左右2つのプロペラの推力差によって行われる。垂直固定翼の配置は Fig. 2 に示すとおりである。それらの断面は NACA 0012 翼型とした。

本報には、AUV-HM1 テストベッドの横運動特性を検討するため、供試模型を 90 度ヒールさせた状態で VPMM (Vertical Planar Motion Mechanism) に取り付けて、鉛直面内の拘束模型試験を行うこととした。斜行試験と強制動揺試験とも、模型を 2 本の支柱でサポートする方式を採用する。実験に使用した模型はアルミ合金製のフレームに FRP 製の外殻を取り付けたものである。外殻は 2 本の支柱

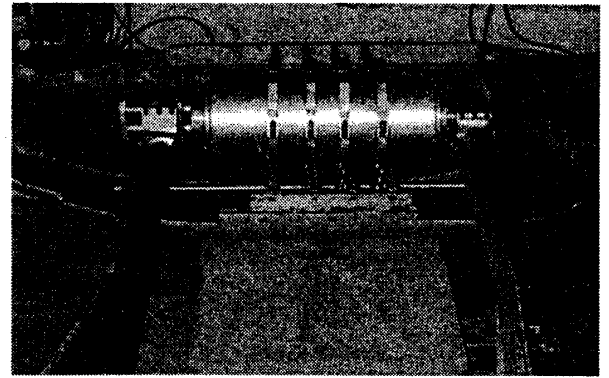


Fig. 3 Model under setting

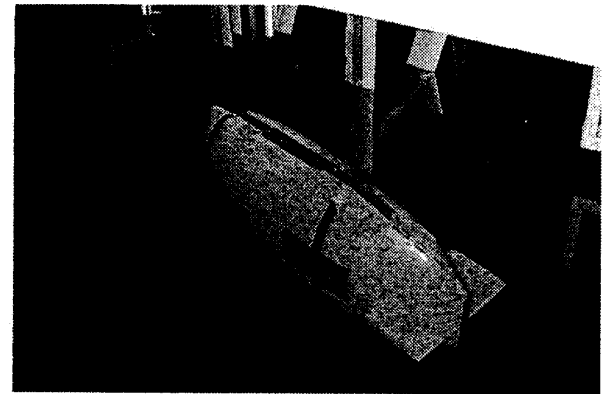


Fig. 4 Model connected with VPMM

を中心面として、左右両半部に分けて作られている。なお、防水型検力計はフレームにセットされ、その両端にそれぞれ一本の支柱で VPMM と連結してある。前報<sup>1)</sup>と同様に、2本の支柱の midpoint は強制動揺の回転中心であり、胴体前縁から 0.778 m のところにある。水深 4 m の曳航水槽において、模型の没水深度は 2 m とした。Fig. 3 は模型を取り付ける途中の様子を示す。なお、模型の取り付けが完成した様子は Fig. 4 に示すとおりとなる。

### 3. 定式化

#### 3.1 座標系

潜水艇の操縦運動を表わすには、Fig. 5(a) に示す艇体固定の機体軸座標系 (以下、潜水艇固定座標系と称する) を用いる。 $x$  軸を艇の長手軸前方に、 $y$  軸を右舷、 $z$  軸を下向きにとる。 $z$  軸まわりの回転角あるいはモーメントは艇首右旋回を正とする。一方、拘束模型の縦方向強制運動を表わすには、Fig. 5(b) に示す模型固定の機体軸座標系 (以下、拘束模型固定座標系と称する) を用いる。 $x$  軸を模型の長手軸前方に、 $y$  軸を右側、 $z$  軸を下向きにとる。 $y$  軸まわりの回転角あるいはモーメントは模型首上げ (Fig. 5(a) に示す艇首左旋回に相当する) を正とする。両座標系の原点とも場合によって異なる場所に置く。即ち、模型試験により、線形流体力係数を解析する場合には、座標系の原

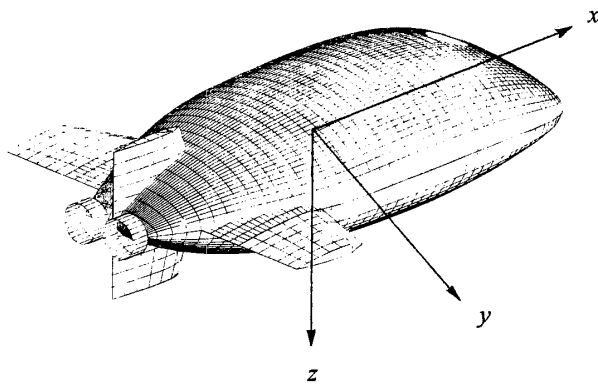


Fig. 5(a) Coordinate system for free vehicle

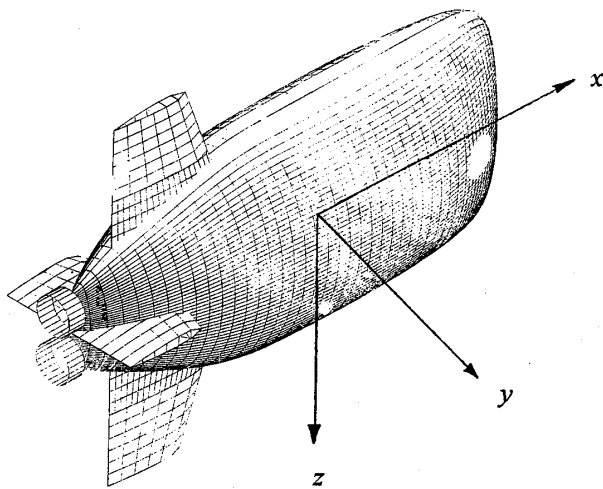


Fig. 5(b) Coordinate system for captive model

点は2本の支柱の midpoint に置く。一方、AUV-HM1 テストベッドの横運動特性を解析する場合には、座標系の原点はその重心である艇体前縁より 1.0 m の対称軸に置く。当然、その際、線形流体力係数の座標変換を行う必要がある。

### 3.2 潜水艇横運動の線形方程式

潜水艇の横運動に関する基本的な特性を把握するために便利な線形運動方程式を用いる。 $x$  方向の速度変化が小さく、無視できると仮定する。なお、便宜上、横揺の影響も小さいと仮定して省略すると、横方向の運動に関する線形方程式は Fig. 5(a) に示した潜水艇固定座標系を用いて次のように、sway と yaw との連成運動で表わすことができる。即ち、

$$\begin{aligned} (m+m_y)\dot{v} - Y_v v + (m x_c + m_y x_y)\dot{r} \\ + \{-Y_r + (m+m_x)U\}r = 0 \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} - \{N_r - (m x_c + m_y x_y)U\}r \\ + (m x_c + m_y x_y)\dot{v} - N_v v = \Delta T \cdot \frac{l}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $m$ : 内部水も含まれる質量、 $x_c$ : 質量中心の  $x$  座標、 $m_x$ :  $x$  方向の付加質量、 $m_y$ :  $y$  方向の付加質量、 $x_y$ :  $y$  方向付加質量中心の  $x$  座標、 $I_{zz}$ :  $z$  軸まわりの付加慣性

モーメント、 $Y_v, Y_r$  と  $N_v, N_r$ : それぞれ  $y$  方向の速度  $v$  と  $z$  軸まわりの角速度  $r$  によって生じる  $y$  方向の力  $Y$  と  $z$  軸まわりのモーメント  $N, \Delta T$  と  $l$ :  $x$  軸に平行する2つのプロペラの推力差と両軸間の距離 (AUV-HM1 テストベッドの場合、 $l=0.40$  m)、 $U$ : 艇の航行速度。

さて、潜水艇の大小、航行速度などにこだわらず、運動特性を議論するために、運動方程式を無次元化すると便利である。そこで、前報<sup>1)</sup>と同様に、次のような無次元化の方法をとる。即ち、時間を  $L/U$ 、位置を  $L$ 、速度を  $U$ 、角速度を  $U/L$ 、加速度を  $U^2/L$ 、角加速度を  $U^2/L^2$ 、質量と付加質量を  $0.5\rho L^3$ 、慣性モーメントと付加慣性モーメントを  $0.5\rho L^5$ 、力を  $0.5\rho L^2 U^2$ 、モーメントを  $0.5\rho L^3 U^2$  で割って無次元化することとした。ここで、 $\rho$  は流体密度であり、本報でも 20°C の真水を考え、 $101.82 \text{ Kgr}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$  とする。 $L$  は艇長 2.0 m をとっている。

さて、(1)式を以上のように無次元化して、書きなおすと次式を得る。

$$\begin{aligned} (m' + m'_y)\dot{v}' - Y'_v v' + (m' x'_c + m'_y x'_y)\dot{r}' \\ + \{-Y'_r + (m' + m'_x)\}r' = 0 \\ (I'_{zz} + J'_{zz})\dot{r}' - \{N'_r - (m' x'_c + m'_y x'_y)\}r' \\ + (m' x'_c + m'_y x'_y)\dot{v}' - N'_v v' = \Delta T' \cdot \frac{l'}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、無次元化した線形流体力係数は次のように表わせる。即ち、 $m' = m/0.5\rho L^3$ 、 $m'_x = m_x/0.5\rho L^3$ 、 $m'_y = m_y/0.5\rho L^3$ 、 $x'_c = x_c/L$ 、 $x'_y = x_y/L$ 、 $I'_{zz} = I_{zz}/0.5\rho L^5$ 、 $J'_{zz} = J_{zz}/0.5\rho L^5$ 、 $Y'_v = Y_v/0.5\rho L^2 U$ 、 $N'_v = N_v/0.5\rho L^3 U$ 、 $Y'_r = Y_r/0.5\rho L^3 U$ 、 $N'_r = N_r/0.5\rho L^4 U$ 、 $\Delta T' = \Delta T/0.5\rho L^2 U^2$ 、 $l' = l/L$ 。

### 3.3 拘束模型の縦方向強制動揺線形方程式

本報には、AUV-HM1 テストベッドの横運動特性を検討するのが目的である。本来なら、HPMM (Horizontal Planar Motion Mechanism) を使用するべきが、強度上の問題で、長さ 2 m 以上の支柱の寸法が巨大になり、不都合が生ずるため、かわりに供試模型を  $x$  軸まわりの回転を 90° にして、VPMM に取り付けられた状態で、鉛直面内の拘束模型試験を行うことにした。そこで、供試模型の強制動揺に関する無次元化した線形方程式は Fig. 5(b) に示す拘束模型固定座標系を用いて表わすと、次式となる。即ち、

$$\begin{aligned} (m' + m'_z)\dot{w}' - z'_{ww}\dot{w}' - (m' x'_c + m'_z x'_z)\dot{q}' \\ - \{z'_{qw} + (m' + m'_x)\}q' = F'_E \\ (I'_{yy} + J'_{yy})\dot{q}' - \{M'_q - (m' x'_c + m'_z x'_z)\}q' \\ - (m' x'_c + m'_z x'_z)\dot{w}' - M'_w w' = M'_E \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、線形流体力係数及び強制力を無次元化する方法も前報<sup>1)</sup>のそれと同様である。

## 4. 拘束模型試験

AUV-HM1 テストベッドの横方向の運動特性を検討するために、台湾大学の曳航水槽にて斜行試験と PMM 試験

を行った。本報の拘束模型試験は大略、次の条件で行った。

- (1) 曳航速度：1.414, 2.000, 2.828 (m/sec)
- (2) 強制動揺周波数：0.3, 0.4, 0.5 (Hz)  
 pure heaveの振幅：20, 40, 60 (mm)  
 pure pitchの振幅：2.0, 4.0, 6.0 (deg.)  
 combine pitchの振幅：2.0, 4.0, 6.0 (deg.)
- (3) 斜行試験の迎角：-6.0~+14.0 (deg.)

4.1 斜行試験

斜行試験の結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。多項式を用いて実験値を最小二乗近似したものも合せて図中に線で示す。Fig. 6 は迎角変化に対する  $z$  方向の力の無次元値であ

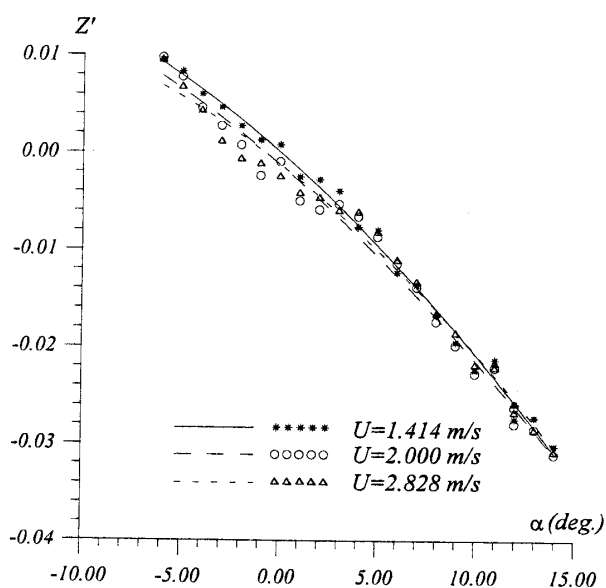


Fig. 6 Effects of attack angle on nondimensionalized  $z$ -force

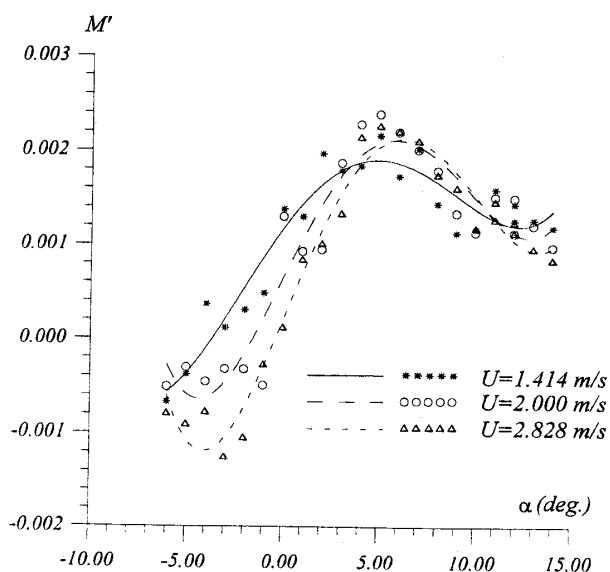


Fig. 7 Effects of attack angle on nondimensionalized pitching moment

る。実験を行った迎角範囲内では、この力は速度の二乗に比例していることがわかる。Fig. 7 は原点が胴体前縁より後方 0.778 m に置かれた  $y$  軸まわりの縦揺モーメントの無次元値に対する迎角の影響を示す。おおよそ -5.0~+5.0 (deg.) の迎角範囲内に、モーメントは迎角の増加につれて増加することがわかる。即ち、供試模型の姿勢が変化したときに、復元モーメントがそれを増大させる方向に働くこととなる。この結果は、質量中心が拘束模型強制動揺の回転中心より後方にある AUV-HM1 テストベッドの横運動は静安定でないことを意味する。なお、斜行試験の結果を無次元安定性微係数で整理すれば、Table 2 に示すとおりとなる。

4.2 PMM 試験

本報でも pure heave, Pure pitch と combine pitch の計 3 モードの縦方向強制動揺試験を行った。pure heave 試験の解析によって、 $m' + m'_z$ ,  $m'x'_c + m'_zx'_z$ ,  $Z'_w$ ,  $M'_w$  が得られる。これらの計測結果に及ぼす動揺周波数、動揺振幅の影響は  $U=2.0$  m/sec の場合につき、それぞれ Fig. 8~Fig. 11 に示す。動揺周波数 0.3 Hz によって得られた  $M'_w$  が異なる動揺振幅の間にはばらつきがやや大きいことを除けば、これら無次元安定性微係数の計測値は動揺周波数と動揺振幅によらずほぼ一定になるといえよう。同様に、pure pitch 試験の解析によって、 $m'x'_c + m'_zx'_z$ ,  $-z'_q + (m'_z - m'_x)$ ,  $I'_{yy} + J'_{yy}$ ,  $M'_q - (m'x'_c + m'_zx'_z)$  が得られる。ここで、 $m'x'_c + m'_zx'_z$  と  $I'_{yy} + J'_{yy}$  だけを例にして示すことにした。まず、 $m'x'_c + m'_zx'_z$  について、 $U=2.0$  m/sec の場合、pure heave

Table 2 Results of oblique towing tests

U(m/sec)	$Z'_w$	$M'_w$
1.414	-0.0998	0.0162
2.000	-0.0981	0.0242
2.828	-0.0902	0.0288
Average	-0.096	0.023

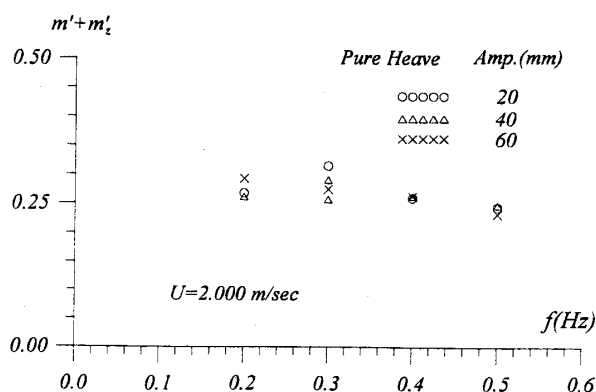


Fig. 8 PMM test results of  $m' + m'_z$

試験によるものと合せて前記の Fig. 9 に示す。計測値が動揺周波数に依存する傾向は顕著でないし、値のばらつきが若干大きいことも前報<sup>1)</sup>と同様である。一方、 $I'_{yy}+J'_{yy}$  は Fig. 12 に示したとおりに、pure pitch 試験の動揺振幅と周波数にかかわらず、ほぼ一定な計測値が得られている。同様のことが、それぞれ Fig. 13 と Fig. 14 に示す combine pitch 試験による  $-Z'_q+(m'_z-m'_x)$  と  $M'_q$  に対してもいえる。

以上、PMM 試験による無次元安定性微係数の計測値に及ぼす動揺周波数と振幅の影響を  $U=2.000$  m/sec の場合を

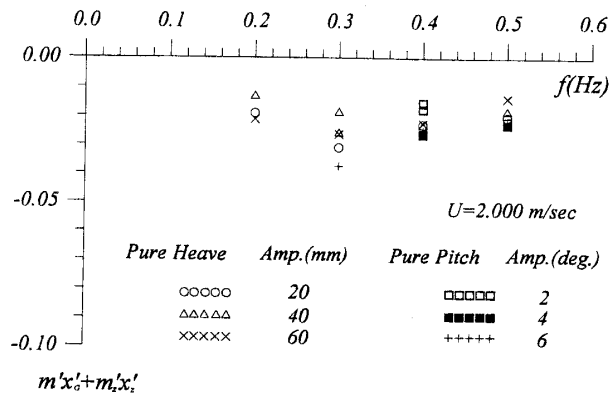


Fig. 9 PMM test results of  $m'x'_G + m'_z x'_z$

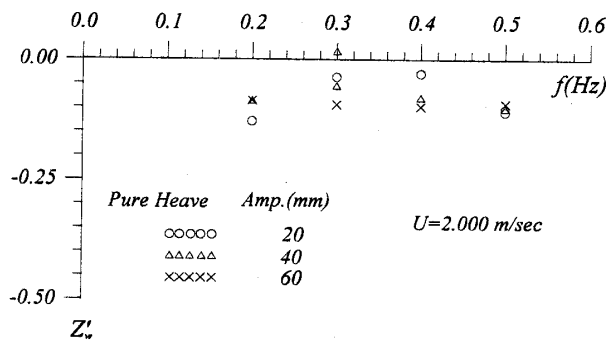


Fig. 10 PMM test results of  $Z'_w$

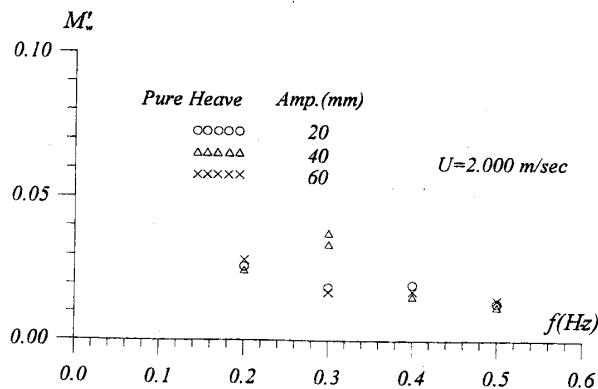


Fig. 11 PMM test results of  $M'_w$

例にして示したが、ほかに PMM 試験を行った 2 種類の速度の場合についても、同様な傾向をみた。これらの結果は前報<sup>1)</sup>が示した AUV-HM1 テストベッドの縦運動に関する拘束模型試験結果とよく一致する。なお、前報の結果によれば、付加慣性項と減衰項に関する無次元安定性微係数とも曳航速度によらず、ほぼ一定の値が示されることがわかる。そこで、本報において、PMM 試験の結果をまとめるには、まず各々の速度における付加慣性項と減衰項ともに、異なる動揺振幅と周波数による計測値に対して平

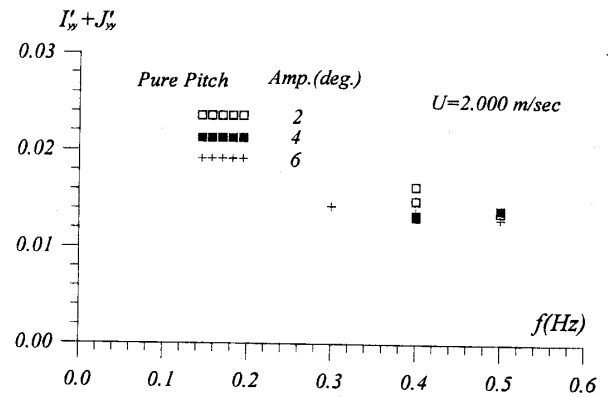


Fig. 12 PMM test results of  $I'_{yy} + J'_{yy}$

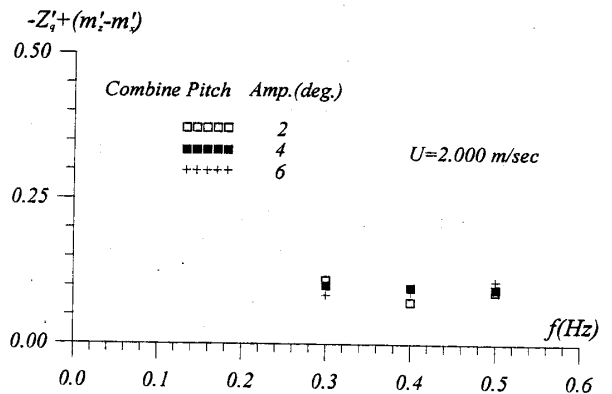


Fig. 13 PMM test results of  $-Z'_q + (m'_z - m'_x)$

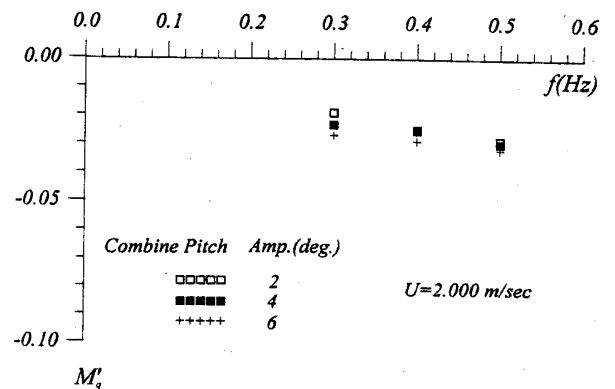


Fig. 14 PMM test results of  $M'_q$

Table 3 Added inertia terms obtained by PMM tests

$m'_x$	$m'_z$	$x'_z$	$J'_{yy}$
0.023	0.077	-0.107	0.0044

Table 4 Damping terms obtained by PMM tests

$Z'_w$	$M'_w$	$Z'_q$	$M'_q$
-0.0874	0.0194	-0.0424	-0.0260

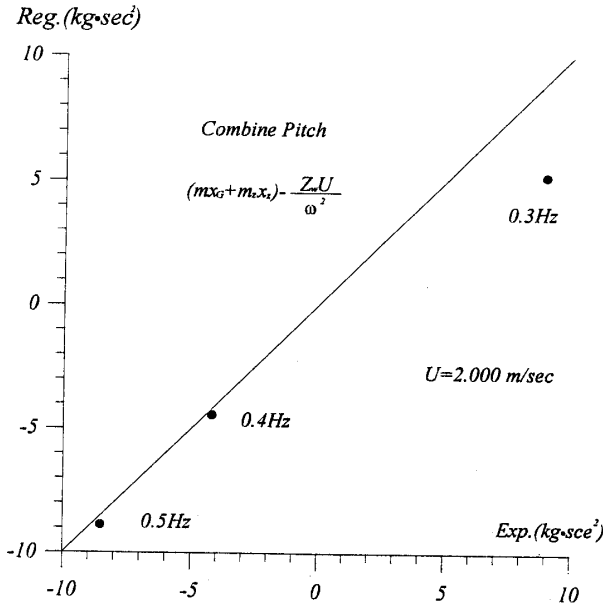


Fig. 15 Confirmation of stability derivatives with combine pitch test results  $(m x_G + m_x x_z) - \frac{Z_w U}{\omega^2}$

均をとり、それからこれら3種類の速度による値に対して平均をとることとした。その結果として、付加慣性項に関する無次元安定性微係数を Table 3 に、減衰項に関するものを Table 4 に示す。Table 4 に示した  $Z'_w$  と  $M'_w$  について、それぞれ前記の Table 2 に示した斜行試験による結果と比較すれば、両結果の間には若干のずれがあるものの、さほど大差がないといえよう。

なお、PMM 試験に用いた模型の外壳は水密なものではないので、安定性微係数を整理する際、差し引かれる模型の慣性項については内部水も含まれるものを用いる必要があります、別途でそれらを計測した。その結果は  $m'_x=0.188$ ,  $I'_{yy}=0.0088$ ,  $x'_z=-0.066$  である。

以上に示した手順によってまとめられた無次元安定性微係数の一貫性を確認するため、それらをまとめる際使用されなかった combine pitch 試験結果の一部を比較に利用することにした。即ち、異なる動揺周波数の combine pitch

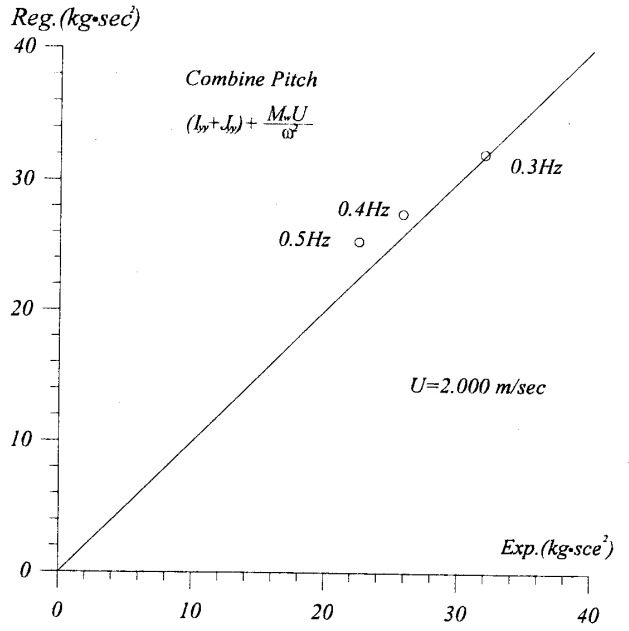


Fig. 16 Confirmation of stability derivatives with combine pitch test results  $(I_{yy} + J_{yy}) + \frac{M_w U}{\omega^2}$

試験によって得られた  $(m x_G + m_x x_z) - \frac{Z_w U}{\omega^2}$  及び  $(I_{yy} + J_{yy}) + \frac{M_w U}{\omega^2}$  の試験結果 (Exp. と記す) を横軸とし、前記にまとめられた無次元安定性微係数を用いて対应的に算定した結果 (Reg. と記す) を縦軸としてプロットすれば、 $U=2.0$  m/sec の場合につき、それぞれ Fig. 15 と Fig. 16 となる。当然ながら、ほぼ 45 度線付近にあることによって、まとめられた無次元安定性微係数の一貫性を確認できたといえよう。

### 5. 安定性微係数の推定

本報には、まず前報<sup>1)</sup>が提示した Battaccini<sup>3)</sup>の経験式に基づいた推定法を用いて、供試模型の安定性微係数を推定することとした。なお、推定法の詳細は前報<sup>1)</sup>の Appendix を参照されたい。

供試模型の寸法から、以下の数値が得られる。即ち、全長  $L=2.0$  m, 最大横断面の面積  $A=0.471$  m<sup>2</sup>, finess ratio  $f=2.58$ , 柱形係数  $C_p=0.721$ , 胴体の縦中心断面の後縁傾斜角  $\omega=1.24$  rad., 二次元翼の揚力傾斜  $C_{ia}=5.901$  rad<sup>-1</sup> (NACA 0012, DATCOM<sup>5)</sup> により), 胴体も含まれる尾翼のスパン  $b=0.6$  m, 胴体の中まで延長する尾翼の投影面積  $S=0.243$  m<sup>2</sup>, 胴体の中まで延長する尾翼のアスペクト比  $AR=b^2/S=1.481$ , 25%弦長点に対応する後退角  $\Lambda=15.3$  deg., 尾翼と胴体の交線から中心縦断面までの最大距離  $R_0=0.207$  m と平均距離  $R_1=0.103$  m, 胴体前縁より  $R_0$  に対応する断面までの距離  $x=1.62$  m, 付加質量係数  $K_3=$

0.507,  $K_1=0.131$  ( $K_3$  と  $K_1$  は "best fit ellipsoid" 法<sup>6)</sup> による結果), 体積中心の胴体前縁より後方の距離  $x_c=0.909$  m, 25%弦長点の座標原点より後方の距離  $x_{r1}=0.919$  m. これらの数値を前報<sup>1)</sup> の Appendix の諸式に代入すれば, 無次元安定性微係数に関する推定値が求められる。

その中,  $Z'_{w,body}=-0.160$ ,  $Z'_{w,fin}=-0.104$ , そして  $Z'_w=Z'_{w,body}+Z'_{w,fin}=-0.264$  との推定値が得られる。これらの数値が斜行試験によって得られた計測値  $Z'_w=-0.096$  と比較すれば, 前報の (A-2) 式は  $Z'_{w,body}$  をかなり過大評価することがわかる。即ち, 比較的偏平な楕円形断面を有する鯨型潜水艇の胴体の揚力傾斜を推定する際, 前報の (A-2) 式は横方向と縦方向との区別がなく, ほぼ同一の値を推定した。これらの推定値と計測結果と比較すれば, 縦方向の方は若干の差があるものの, その割合はさほど大きくない。一方, 揚力が比較的小さいと思われる横方向の方には, かなり過大な評価結果となる。そこで, 本報において, 胴体揚力を精度よく推定できる式が確立する前に, まずやや強引なやり方ではあるが, 尾翼と較べて胴体の揚力傾斜が小さく, 無視できると仮定して, 議論を進めることにした。即ち,  $Z'_{w,body} \approx 0$  を用いて, 減衰項の無次元安定性微係数を推定した結果と計測値と合わせて, Table 5(a) に示す。推

Table 5(a) Comparison of nondimensionalized stability derivatives between measured and estimated values (Damping terms)

	measured	estimated
$Z'_w$	-0.0874	-0.104
	-0.0960 (O.T.)	
$M'_w$	0.0194	0.0162
	0.0230 (O.T.)	
$Z'_q$	-0.0424	-0.0478
$M'_q$	-0.0260	-0.022
※	Origine is located at 0.778m from nose	

Table 5(b) Comparison of nondimensionalized stability derivatives between measured and estimated values (Added inertia terms)

	measured	estimated
$m'_x$	0.023	0.022
$m'_z$	0.077	0.086
$x'_z$	-0.107	-0.095
$J'_{yy}$	0.0044	0.0033
※	Origine is located at 0.778m from nose	

定値は計測値との間には若干の差が残るものの, 全般的に計測値に近付いていることがみられる。これもある程度上記の仮定を裏付けたといえよう。なお, ポテンシャル理論に基づく "best fit ellipsoid" 法<sup>6)</sup> によって計算した付加慣性項に関する無次元安定性微係数は計測値と合わせて, Table 5(b) に示されている。 $J'_{zz}$  と  $M'_w$  に関する差がやや大きいことを除けば, ほぼ計測値に近い推定値が得られるといえよう。今後, 胴体だけの揚力とモーメントに対する推定についてさらに検討する余地が残されている。

## 6. 安定性と旋回性の考察

実際に潜水艇の模型を用いて強制動揺試験を行う場合, 回転中心とモーメントをとる点の位置は計測装置の取り付けによって, かならずしも実艇の運動を記述する座標原点に置かれるとは限らない。そこで, 実艇の運動特性を議論する前に, まず安定性微係数に対する座標変換を行うと便利である。本報では, 前報と同様に, 強制動揺試験における座標原点(胴体前縁より後方 0.778 m)から, AUV-HM1 テストベッドの運動を記述する座標原点 (胴体前縁より後方 1.000 m) に移動することに伴い, Table 5 に示した安定性微係数に対し, 座標変換に関する計算を行った。その結果を, Fig. 5(b) に示した潜水艇固定座標系で定義する横運動安定性微係数に対応して, Table 6 に示す。以下, 潜水艇固定座標系を用い, これら座標原点も変換した安定性微係数をもとに, AUV-HM1 テストベッドの横方向の運動特性について考察する。

さて, (2) 式を連立させ, yaw だけのモードで以下のように書きなおすことができる。即ち,

$$T'_1 T'_2 \ddot{r}' + (T'_1 + T'_2) \dot{r}' + r' = K' \Delta T' + K' T'_3 \Delta \dot{T}' \quad (4)$$

ただし,

$$T'_1 T'_2 =$$

$$\frac{(m' + m'_y)(I'_{zz} + J'_{zz}) - (m' x'_c + m'_y x'_y)^2}{[N'_r - (m' x'_c + m'_y x'_y)] Y'_v + N'_v [-Y'_r + (m' + m'_x)]}$$

Table 6 Nondimensionalized stability derivatives obtained by coordinate transformation

Fig.5(b) Coord. Sys.	transf. from measured	transf. from estimated	Fig.5(a) Coord. Sys.
$m'_x$	0.023	0.022	$m'_x$
$m'_z$	0.077	0.086	$m'_y$
$x'_z$	0.004	0.016	$x'_y$
$J'_{yy}$	0.00352	0.0025	$J'_{zz}$
$Z'_w$	-0.0960(O.T.)	-0.104	$Y'_v$
$M'_w$	0.0337(O.T.)	0.0277	$-N'_v$
$Z'_q$	-0.0317	-0.0363	$-Y'_r$
$M'_q$	-0.0250	-0.0187	$-N'_r$
※ Origine is located at 1.000m from nose			

Table 7 Comparison of nondimensionalized stability indices between those analyzed from measured and estimated values

Lateral stability indices	Analyzed from	
	measured	estimated
$T'_1$	0.413	0.457
$T'_2$	-2.987	-3.357
$T'_3$	-2.552	-2.442
$T'$	-0.021	-0.458
$l'_r$	0.159	0.131
$l'_v$	0.351	0.266
$G$	-1.21	-1.03
$K'$	-3.27	-4.79
※ Origine is located at 1.000m from nose $m' = 0.168$ , $x'_G = 0$ , $I'_{zz} = 0.0113$		

$$T'_1 + T'_2 =$$

$$\frac{-(m' + m'_y)(N_r - (m' x'_G + m'_y x'_y)) - (I_{zz} + J_{zz}) Y_v}{(N_r - (m' x_G + m_y x_y)) Y_v}$$

$$\frac{-(m' x'_G + m'_y x'_y)(-Y_r + (m' + m_x)) + N_v(m' x'_G + m'_y x'_y)}{+ N_v(-Y_r + (m' + m_x))}$$

$$K' = \frac{-\frac{l'}{2} \cdot Y_v}{[N_r - (m' x'_G + m'_y x'_y)] Y_v + N_v[-Y_r + (m' + m_x)]}$$

$$T'_3 = \frac{m' + m'_y}{Y_v}$$

ここに、 $T'_1$ ,  $T'_2$  は(4)式の特異方程式の根であり、安定性を表わす指数である。一方、 $K'$  はゲインと称され、旋回性を表わす指数である。 $K' = K \cdot 0.5 \rho L^3 U$ ,  $K$  は単位推力差によって生ずる定常旋回角速度と定義される。なお、運動系を一次系で近似する場合、 $T' = T'_1 + T'_2 - T'_3$  を定義することが便利である。また、次式をもって動安定性の程度を表わせる  $G$  がよく用いられる。即ち、

$$G \equiv 1 - \frac{l'_v}{l'_r} \quad (5)$$

ただし、 $l'_r = \frac{N_r - (m' x'_G + m'_y x'_y)}{Y_r - (m' + m_x)}$

$$l'_v = \frac{N_v}{Y_v}$$

$G$  が負であれば、不安定であり、1より大きければ、静安定である。その間にある値であれば、動安定となる。

AUV-HM1 テストベッドの横運動における操縦性指数に関する結果を Table 7 に示す。 $T'$  と  $G$  の負の値によれば、横方向の運動が不安定であることがわかる。同様に、

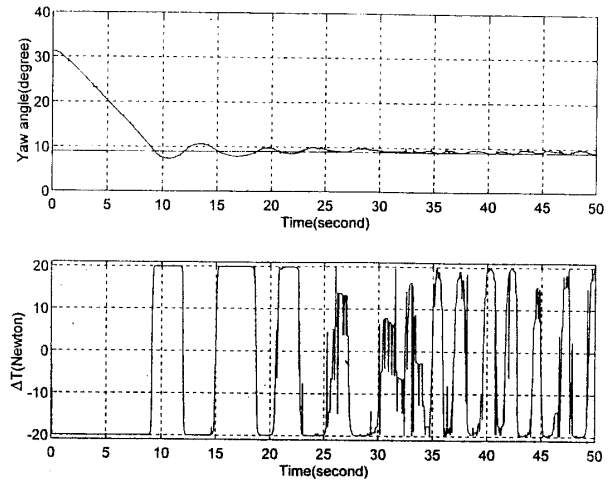


Fig. 17 Experimental response of AUV-HM1 testbed to step heading command (source: ref. 7)

$K'$  の負の値も不安定ループがあることを意味する。なお、安定性微係数の推定値に基づいて、横方向の運動特性もよく把握できたといえよう。なお、AUV-HM1 テストベッドの方向制御に関するプールテストによって記録した左右2つのプロペラの推力差の時間履歴を文献7)により引用して、Fig. 17 に示す。方向維持するため、たえず推力差を調整しなければならないことは横運動の不安定を物語っていることとわかる。

## 7. 結 言

本報において、以下の結論がまとめられた。

(1) 拘束模型試験により、胴体後方に垂直舵がなく、胴体上下に飛び出ない垂直固定翼しか設けられていない AUV-HM1 テストベッドの横運動は不安定であることを明らかにした。

(2) 胴体の揚力傾斜を無視できると仮定した上、前報が提示した推定法によって推定した安定性微係数に基づいて、AUV-HM1 テストベッドの横方向の運動特性もよく把握できることを確認した。一方、今後楕円形横断面の胴体に働く揚力とモーメントに対する推定について、さらに検討する余地がある。

終りに、本研究を実施するにあたり、学部の鍾任超と魏俊卿の両君に多大な協力を頂き、ここに記して謝意を表わす。なお、本研究の一部は中華民国行政院国家科学委員会 NSC 86-2815-C-002-139-E の援助のもとになされたことを付記する。

## 参 考 文 献

- 1) 邱 逢琛, 郭 振華, 張 鎰源, 王 傑智, 王治平: 流線型無人無索潜水艇に働く線形流体力及び操縦性能に関する研究, 日本造船学会論文集 180号 (1996).



- 2) 郭 振華, 邱 逢琛, 鄭 勝文: Design Concept of the Integrated Navigation System for the Autonomous Underwater Vehicle AUV-HM1, 中華民國海下技術協會海下季刊, 第7卷, 第1期 (1997).
  - 3) Bottaccini, M. R.: The Stability Coefficients of Standard Torpedoes, U. S. Naval Ordnance Test Station, NAVORD Report 3346 (1954).
  - 4) Landweber, L. and M. Gertler: Mathematical Formulation of Bodies of Revolution, The David W. Taylor Model Basin Report 719 (1950).
  - 5) Hoak, D. E. and R. D. Finck: USAF Stability and Control DATCOM, McDonnell-Douglas Corp. (1978).
  - 6) Watt, G. D.: Estimates for the Added Mass of a Multi-component, Deeply Submerged Vehicle, Part I, National Defence Research and Development Branch, Canada (1988).
  - 7) Guo, J., F. C. Chiu, C. C. Wang: Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle Testbed Using Neural Networks, MTS/IEEE OCEAN'95 Conference, San Diego (1995).
-