

細長回転体の水面進入運動について

	久	留	道	治
	水	野	俊	明
正員	別	所	正	利

Oblique Water Entry of a Slender Body

By Michiharu HISATOME
Toshiaki MIZUNO
Masatoshi BESSHO

西部造船会会報
第53号別刷
昭和52年3月

Reprinted from
TRANSACTIONS
OF
THE WEST-JAPAN SOCIETY OF
NAVAL ARCHITECTS
No. 53 MARCH 1977

細長回転体の水面進入運動について

久 留 道 治*
水 野 俊 明**
正 員 別 所 正 利**

Oblique Water Entry of a Slender Body

By Michiharu HISATOME
Toshiaki MIZUNO
Masatoshi BESSHO

Summary

There has been studied the water entry of a body especially on the phenomena arising at the instant when it touches on the water surface. However, it seems to be few studies published with regard to the motion transient from air to water. The present report gives a contribution to this problem. The equation of motion to this case will be written down and solved by the computer and compared with the experiment which is carried out for the present purpose by a model with four various head shape.

The law of comparison with regard to the model experiment is Froude's law, that is, the entrance speed divided by the root of its length is to be the same between the actual body and the corresponding model. The correspondence between the calculated path and inclination and the experimental ones is fairly good. Conclusively, thus, the equation of motion taken for the present study will be sufficient with the accuracy for the present purpose, especially for a sharp pointed slender body.

1. 序 論

細長い物体が、水面に斜めに進入すると軌道が上向きになり極端な場合には再び水面上に飛び出して来ると言う現象がありそのような現象をさける為に頭部を平たくすると良いと言われている。

このような現象は進入速度が大変大きい時は空洞現象等がおこり相似則が大変複雑になつて来るけれどそれがあまり大きくなければフルード数を合わせて模型試験を行う事が出来よう。

本研究は細長回転体が低速で水面に進入する場合について運動方程式を書き細長体理論によりその係数を求め、それを積分して軌道を計算し、模型試験と比較検討しようとするものである。

水面進入運動が空中もしくは水中運動と異なる点はその過程で部分的に水中にある為に大きい水の浮力を受け、又一方その部分に働く水の附加質量による大きい加速抵抗を受ける事である。

これらの力の時間的变化は当然頭部形状によつてかなり異なる故軌道も又変化するであろう。

それ故頭部形状を 4 種類変えた模型を用意し、水面進入後約物体長の 2 倍程度までの軌道軌跡をストロボ撮影

* 海上自衛隊横須賀造船所

** 防衛大学校

して解析し計算結果と比較検討した。

2. 運動方程式

本研究は物体が空中から水中に進入する場合の過度的運動を論じようとするものである。

そこで完全に空中又は水中にあつて運動する場合はここでは考えず頭部が水面に接した瞬間から考える事にしよう。

この事は後述のように空中軌道が重要ではないと言う意味ではなくて、空中軌道は短かくても着水時の姿勢を大きく左右するので注意すべきである。

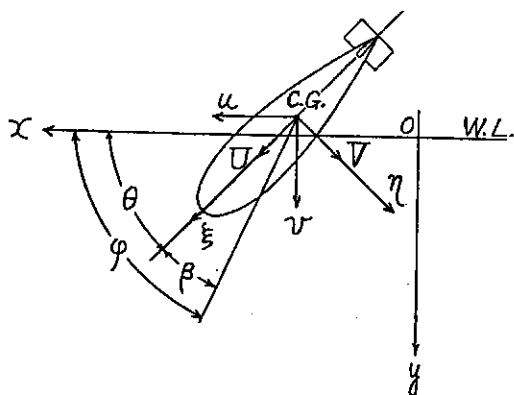


Fig. 1 Co-ordinate system

$$\left. \begin{aligned} m\dot{u} &= -\dot{M}_x + x', \\ m\dot{v} &= -\dot{M}_y + Y' + W - B, \\ I\ddot{\theta} &= -\dot{M}_\theta + M_x v - M_y u - M_\theta + N' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに m は質量, I は質量慣性モーメント, W は重さ, B は浮力, M_θ はそのモーメント, M_x, M_y, M_θ は夫々の方向の附加質量による運動量である。

物体に固定した座標系は原点を重心におき第1図のように ξ, η 軸をとつて (1) をこの座標系について考えよう。

結果は次のようになる。

$$(m+m_\xi)\dot{U} + U\dot{m}_\xi = (m+m_\eta)V\dot{\theta} + (W-B)\sin\theta, \quad (2)$$

$$(m+m_\eta)\dot{V} + V\dot{m}_\eta = -(m+m_\xi)U\dot{\theta} + (W-B)\cos\theta - R_v, \quad (3)$$

$$(I+J)\ddot{\theta} + J\dot{\theta} = (m_\xi - m_\eta)UV - M_\theta - M_R, \quad (4)$$

ここに ξ 方向の粘性による抵抗等は無視し η 方向は $-R_v$ 回転方向の抵抗モーメントは $-M_R$ とした。
 m_ξ, m_η, J は夫々の方向の附加質量である。

船, 潜水船等と異なるのは左辺第3項であつて、今の場合は水に進入するに従つて附加質量が増加して行くのでその時間微分が存在しこの項は進入速度の自乗に比例する抵抗として働らく。

これらの係数を細長回転体として近似的に求めると附録のようにすべて物体のオフセット $\eta(\xi)$ が与えられれば計算出来る。

そしてこれらを用いれば与えられた初期条件について水中への進入径路を例えばルンゲ・クッタ法により計算

又一般には着水後3次元的運動をすると考えられるが今回は簡単の為に物体が鉛直面内で2次元的運動をする場合のみ考える事とする。

実験においても最初鉛直面内にあるようにして打込めば軌道解析の範囲内では略々同じ面内で運動していた。

しかし終りの方では幾分それる場合もあつたが、そのような所では既に水中に全没しているので水中運動の問題として今回は扱わない事にした次第である。

第1図の如く原点を静止水面上に採り x 軸を水平に y 軸を垂直下方に考えると物体の運動方程式は次のように書ける。

出来る。

初期条件としては先端接水時の速度，姿勢角 φ ，偏角 β とした。

さて模型試験を行う為には相似則を確かめておく必要があるので (2) (3) (4) を無次元化して見よう。

基準長さとして全長 L ，速度として重心の着水速度 U_0^* ，質量として ρ ，(ρ は排水量，今回の実験計算では m に一致させてある) をとり無次元量に肩符 (') を附する事にすると

$$\left. \begin{aligned} t' &= tU_0^*/L, \quad U' = U/U_0^*, \quad V' = V/U_0^*, \quad \theta' \equiv \theta, \quad \dot{\theta}' = \dot{\theta}L/U_0^* \\ m' &= m/\rho V, \quad I' = I/\rho V L^2, \quad W' = W/\rho g V, \quad B' = \frac{B}{\rho g V}, \\ M'_B &= \frac{M_B}{\rho g V L}, \quad R'_V = \frac{LR_V}{\rho V U_0^{*2}}, \quad M'_R = \frac{M_R}{\rho V U_0^{*2}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となり (2) (3) (4) は

$$(m' + m'_t) \dot{U}' + U' \dot{m}'_t = (m' + m'_t) V' \dot{\theta}' + \frac{(W' - B')}{F^2} \sin \theta, \quad (6)$$

$$(m' + m'_t) \dot{V}' + V' \dot{m}'_t = -(m' + m'_t) U' \dot{\theta}' - R'_V + \frac{(W' - B')}{F^2} \cos \theta, \quad (7)$$

$$(I' + J') \ddot{\theta}' + J' \dot{\theta}' = (m'_t - m'_t) U' V' - M'_R - \frac{M'_B}{F^2}, \quad (8)$$

ここに

$$F = U_0^*/\sqrt{gL}, \quad (9)$$

はフルード数である。

それ着水速度に関するフルード数が同じならば無次元化した軌道は同じになる。

又このフルード数に関する項は浮力に関係する項のみであつてフルード数が充分大きくなればこれらの項の寄与は大変小さくなる。

逆に浮力が利いて来るのはフルード数の小さい所である。

図2は此の様子を計算して見た例であるがフルード数が4以上となると水中軌道はほとんど変らない事がわかる。

又この物体が空中ある高さ H から自由落下するものとし空気抵抗を無視すると

$$U_0^* = \sqrt{2gH} \quad \text{なる故} \quad F = \sqrt{2H/L}, \quad (10)$$

となる故この時は H/L をフルード数のかわりに使えばよい。

このようにして今回のように単純化した場合はフルード数を合せて実験すれば軌道も又相似になる，すなわち縮尺比を λ とするならば長さは

$$l_m = \lambda l_p, \quad (11)$$

下添字 m は模型， p は実物とする。

時間については

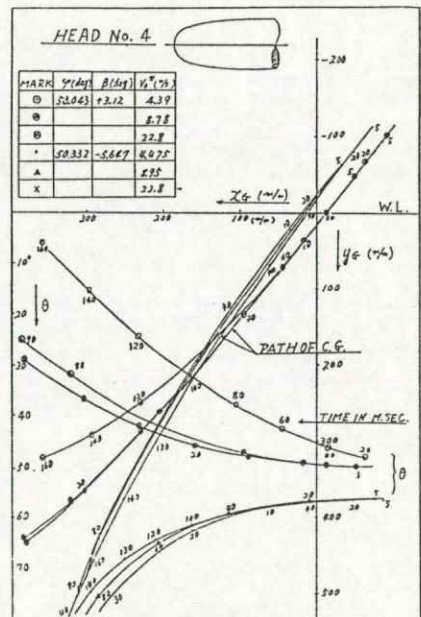


Fig. 2 Effect of entrance velocity (calculation)

$$t_m = \sqrt{\lambda} t_p,$$

(12)

角度、速度等は

$$\theta_m = \theta_p, \quad \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_p / \sqrt{\lambda}, \quad U_m = \sqrt{\lambda} U_p, \quad \dot{U}_m = \dot{U}_p,$$

(13)

等となる。

3. 実 験

前節で導いた運動方程式がどの程度実験と合致するかを確かめる為に、又頭部形状にどの程度依存するかを調べる為に模型試験を企画した。

模型は全表 400 mm とし頭部を 4 種 (図 3, 4) とりかえたものを用意した。

主要目は表 1 に示す通りである。

この模型を全長約 2 m の傾斜角可変のガイドレールに沿って所望の偏角 β をつけて長さ、幅、深さ共に約 1.5 m の水槽中に落下させ、ストロボ写真撮影する事とした。

この写真から単位時間毎の重心軌跡、姿勢角を読みとる。

予備試験の結果から偏角がレールを離れた後約数 10 cm の空中を飛ぶ間に最初設定した角とかなり変わって来る事がわかったので空中軌道をあらかじめ計算しておき着水時に大体予定した偏角になるように最初の偏角を設定する事にした。

そう言う訳で実験データの偏角は予定したものと少し宛変つて来ている。

この事は実用上は大変大切な事であつて実用上は前節のような運動方程式は空中軌道計算に続けて解かなければ意味は薄れるであろう。

つまり空中の運動によつて着水時の速度、姿勢、偏角が定まりこの内特に姿勢角と偏角によつて水中の軌道が殆ど決つてしまうと言う意味でこの事は重要である。

なお解析上の注意としてはカメラは空中にあり物体は水中にあるので光の屈折に対する補正が必要である。

解析の一例を図 5 に示す。

これは図 2 の計算に対応する実験であつて着水速度の影響を示すものであり傾向的に計算とよく合っている事

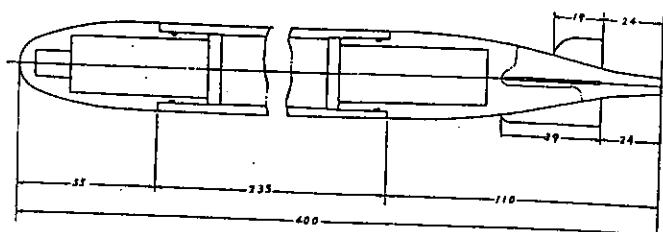


Fig. 3 Model with No. 4 head

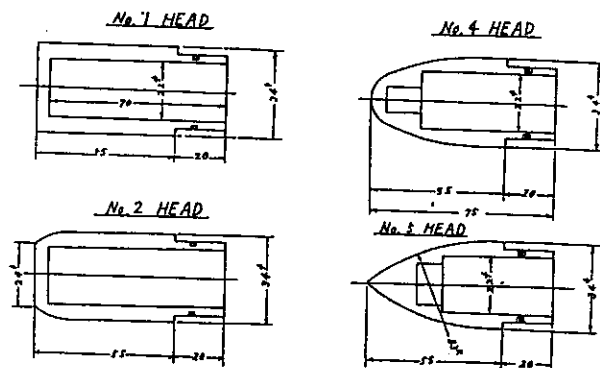


Fig. 4 Model head shape

Table 1 Particulars of Model

Model head No.	1	2	4	5
DIA. (mm)	34.0	34.0	34.0	34.0
Length (mm)	400.0	400.0	400.0	400.0
Weight (gr)	315.0	312.0	300.0	300.0
l_G (mm)	174.5	177.3	182.3	186.8
Radius of GYR. (mm)	125.8	134.9	120.7	120.8

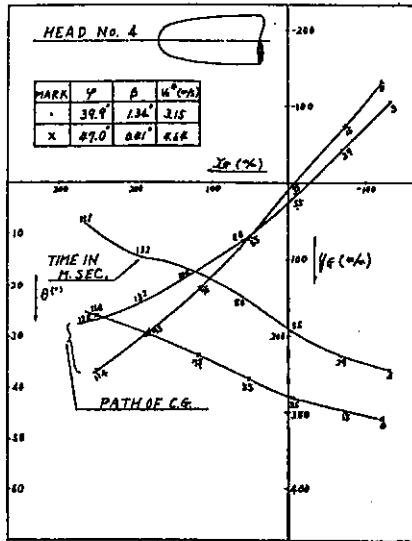


Fig. 5 Effect of entrance velocity (experiment)

Table 2 Test and Conditions

Items	Series	1	2	3	4
Entrance vel. V_0^* (m/s)		4.0, 5.0	4.5	4.5	4.5
Entr. Angle ϕ (deg)		45	47, 51, 61	51	90
Drift. Angle β (deg)		0	± 4.0	± 4.0	0
Model head No.		4	4	1, 2, 4, 5	1, 2, 4, 5

Table 3 Axial added mass coefficient

$$m'_e = m_e / \rho V$$

Model head No.	1	2	3	4
Added mass coef. m'_e	0.0699	0.0788	0.0554	0.0517

が見られるだろう。

実験解析は速度、加速度についても行われておりその計算との比較例は図 8 a, b, c (後出) に示す。

実験は表 2 に示すように速度の影響 (系列 1), 進入角偏角の影響 (系列 2), 頭部形状の影響 (系列 3) 軸方向附加質量の測

定 (系列 4) の 4 系列に別けて行つた。

この内系列 4 は大変簡単な落下試験であつてその落下軌跡より式 (2) によつて m_e を求めたものであり、結果のみ記せば表 3 のようになる。

計算では m_e の変化が運動にあまり影響がないと言う点も考えて一律に 0.05 とした。

4. 解析結果と考察

以上の実験結果とそれに対応する計算との対応を要約すると次のようになる。

i) 一般的傾向

水中軌道は今回の実験範囲つまり一物体長程は偏角 β が表 4 に示す値では着水時の姿勢角のまま直進する。

Table 4 Drift angle at which model does not change its inclination

Model head No.	1	2	4	4	4	5
Entrance ang. ϕ (deg)	50	50	47	50	61	51
Drift angle β (deg)	1.0	1.0	-5.8	-4.0	-3.0	-4.0

偏角がこの値より正の方向に大きければ姿勢角はどんどん上向きになり、入射角がうんと小さい場合は水の上へ飛び出す事が考えられる。

今回はそのような実験は行つてないので計算してこの点を図 6 a, b に示す。

しかし偏角が負ならばともに水中に進入しう事が図 6 b からよくわかるだろう。

ii) 着水速度の影響 (系列 1)

図 2 に計算値を図 5 には実験値を示すが着水速度が大きくなると姿勢角の変化は少なくなり直進するようになる。

図 2 からそこで述べたように略々フルード数が 4 以上では浮力の影響は考えなくてもよいと思われる。

iii) 進入角の影響 (系列 2)

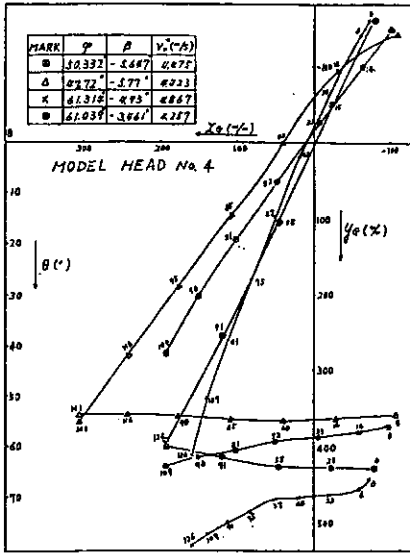


Fig. 7-c Effect of entrance angle (experiment)

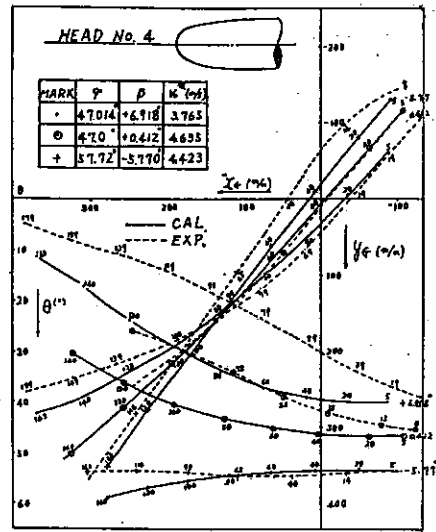


Fig. 8-a Effect of drift angle

v) 頭部形状の影響 (系列3)

図9に大体偏角の小さい場合の頭部形状の差による軌道の変化を示してある。

このように頭がとがつて来るにつれて姿勢角が上向きになる度合いが強くなり、従って軌道も上方に曲がる。

それに反して頭が平たくなると姿勢角が幾分波状に変動するが平均値は殆ど変わらず従って略々直進する。

これは別の言い方をすれば平頭体は着水の瞬間に頭部下端で水を拘うため頭下げモーメントを生じこれが爾後の軌道に影響しているとも考えられる。(計算では直接この項は考えていない。)

いづれにしても平頭になる程計算値と実験値とは合わなくなる。

図10~13には各模型の実験値を計算値と比較してある。

今のべたように頭が平らなものは最も一致がよくないが頭が最もとがつている4番模型においては大変良く一致している。

速度等の図は省略したが同様である。

なお一般に着水から10~20 m.s.の間の値において計算と実験の不一致が大きく、それが又その後の軌道に影響を与える場合がある。

今回の計算は実験から着水速度等の初期条件を読みとつて積分を実行したものであるがその精度(時間の原点も含めて)もあまり自信が持てず、一方今回の運動方程式では着水時の水面の乱れ空洞等については全く考えて

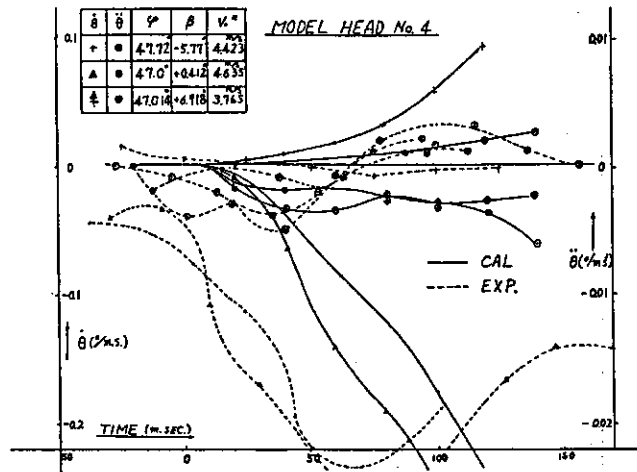


Fig. 8-b Effect of drift angle

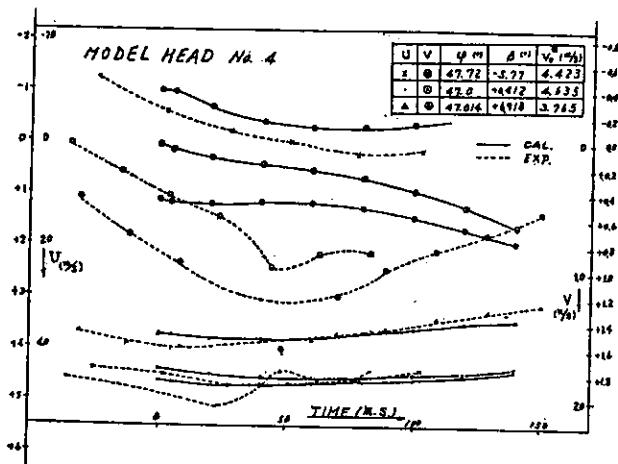


Fig. 8-c Effect of drift angle

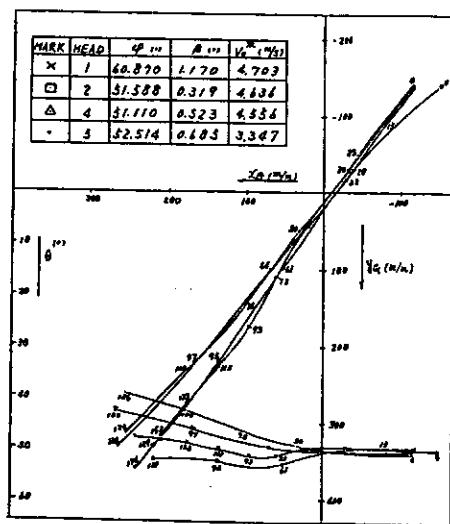


Fig. 9 Effect of head shape

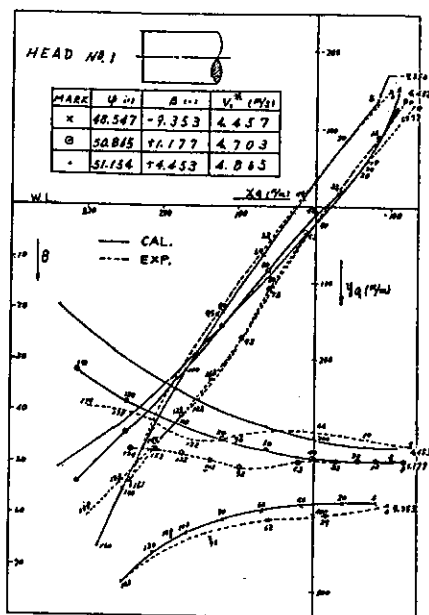


Fig. 10 Comparison with experiment and calculation (Head No. 1)

a) が平均的に最もよく実験値に合っているように見えるがこの実験の範囲では抗力を無視した b), c) でもあまり差はないように見える。

偏角の異なる場合の計算も参照すると一応 a), b), c) の順に実験との一致は悪い。

d) の浮力を無視した場合は最初に述べたようにこの図で一致が悪いのはフルード数が小さい為であるがとにかくフルード数の低い場合は浮力を無視すると全く実験と合わなくなる事を示している。

5. 結 論

細長い回転体が比較的低速で水中に斜めに進入する運動を探り上げて、運動方程式を立てさらに頭部形状を4種類かえた模型により実験し、計算結果と比較した。

いないのでこの程度の不一致は止むを得ないであろう。

vi) 運動方程式の係数の影響

以上のように当然の事ながら今回採用した運動方程式は頭のとがった物体について最も良く合う事がわかったが、これを調べるために幾つかの項を省略して計算を実行して見た結果を図14に示す。

図中 a) は今回の方程式による計算値、b) は粘性抗力を無視したもの、c) は附加質量が時間的に変化せず最初から $m' = 0.05$, $m'_0 = 1$ とおいたもの、d) は浮力を無視したものである。

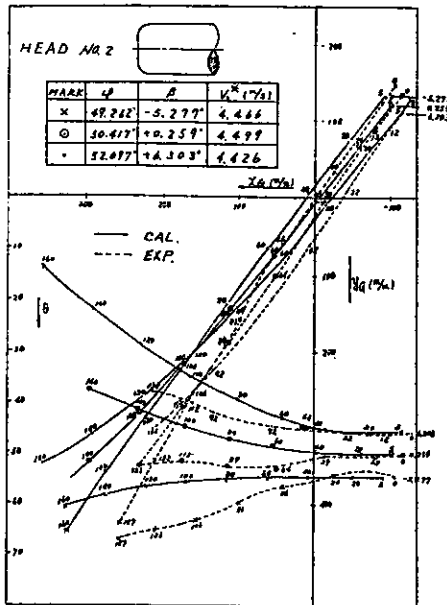


Fig. 11 Comparison with Experiment and calculation (Head No. 2)

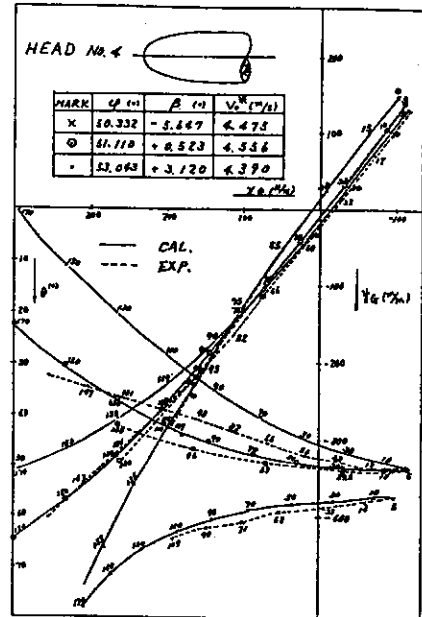


Fig. 12 Comparison with experiment and calculation (Head No. 4)

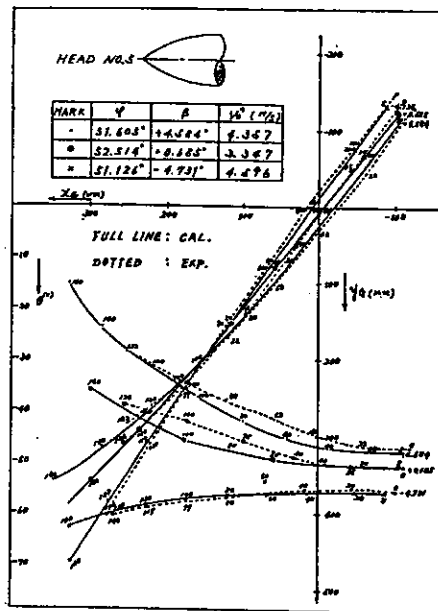


Fig. 13 Comparison with calculation and experiment (Head No. 5)

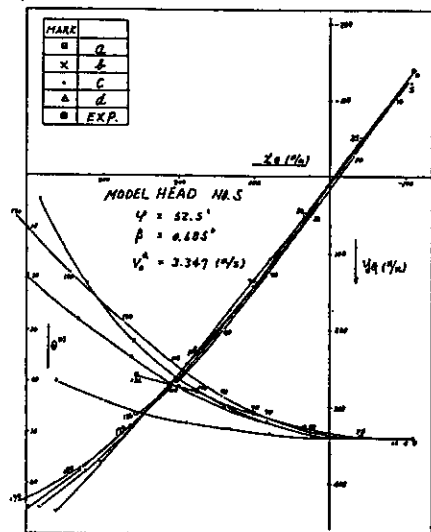


Fig. 14 Comparison of contribution of various terms

その結果

- i) 着水時フルード数を一致させて実験すれば計算と定性的によく一致する。
- ii) 実験と計算は頭のものがついてのもの程よく合い、定量的にも略々一致する。
- iii) 着水時フルード数が小さいと浮力の影響で軌道は上向きに曲がる。
しかしフルード数が4以上では浮力はほとんど軌道に影響しない。

- iv) 着水後の姿勢変化、軌道については着水時の偏角の正負大小が支配的であるが頭が平たい時は偏角による姿勢変化特に上向き傾向が著しく小さくなる。
- v) 物体が全没する位迄の運動については粘性抵抗、附加質量の時間変化は無視してもあまり実験と異ならないけれどフルード数が小さい場合は浮力は無視出来ない。

以上総合して物体が全没してしまう位までの水中軌道については着水時の姿勢、特に偏角が重要である事がわかる。

所がそれはその前の空中の運動によつて決るものであるから、この意味では着水以前の空中運動の調査検討が重要である事になる。

参 考 文 献

- 1) F. S. Surt, "New contributions to hydroballistics". Advances in Hydrosience vol. 1 1964 p. 182-208.
- 2) John G. Waugh, "Water-entry pitch modeling". J. Hydronautics, vol. 2 No. 2 Apr. 1968 p. 87-92.
- 3) 久留道治 「魚雷の水面入射に関する研究」 防大理工学研究科卒業論文, 昭和50年3月
- 4) 元良誠三 "船体運動力学" p. 3-p. 13.

附 録 運動方程式の係数について

i) 浮力とそのモーメント

図15のように細長回転体が θ の角度で中心線に沿つて先端から ξ だけ水に進入した時の浮力とそのモーメントは物体が大変細長いとすると近似的に次のように表現出来る。

すなわち浮力 B は鉛直上向きに

$$B \approx \pi \rho g \int_0^{\xi} \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.1)$$

ここに η は物体半径のオフセットである。

それによるモーメント M_B は

$$M_B \approx \pi \rho g \cos \theta \int_0^{\xi} (l_0 - \xi) \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.2)$$

ここに l_0 は先端から重心 G までの距離とする。

ii) 附加質量

横(η)方向の附加質量はストリップ法的に考えて

$$m_{\eta} \approx \pi \rho \int_0^{\xi} \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.3)$$

と近似出来る。

こうすると浮力の場合も同じであるが水面が物体長軸に関して傾いている事の影響が入つて来ないし又水面の擾乱のそれが入っていないが一方では大変式が簡単になるという利点がある。

附加慣性モーメントは

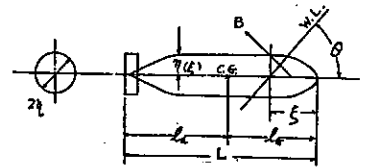


Fig. 15 Buoyancy at water entry

$$J \doteq \pi \rho \int_0^l \eta^2(\xi)(l_0 - \xi)^2 d\xi, \quad (\text{A.4})$$

それ故これらの時間微分は

$$\dot{m}_\eta \doteq \pi \rho \eta^2(\xi) \frac{d\xi}{dt}, \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{J} \doteq \pi \rho \eta^2(\xi)(l_0 - \xi)^2 \frac{d\xi}{dt}, \quad (\text{A.6})$$

となる。

長手 (ξ) 方向の附加質量はストリップ法的には 0 と見なせばよいし又実験的にもあまり影響はないようであるので資料等から今回は

$$m_\xi \doteq 0.05 m, \quad (\text{A.7})$$

を採用したが垂直落下試験の結果は表 3 の通りである。

iii) 抵抗

細長体の斜行時の抵抗は横方向の分が桁違いに大きくそれに較べると長手方向の分は無視し得る。

またこの横方向の抵抗 $-R_V$ は各要素ストリップにおける円筒の抵抗係数 C_D を使って

$$R_V(\xi) \doteq \rho C_D V |V| \int_0^l \eta(\xi) d\xi, \quad (\text{A.8})$$

又その重心まわりのモーメントは

$$M_R(\xi) \doteq \rho C_D \theta |\dot{\theta}| \int_0^l \eta(\xi)(l_0 - \xi)^2 d\xi, \quad (\text{A.9})$$

と表わせる。

実験におけるレイノルズ数は 10^5 程度であつたので $C_D=1.2$ を使用した。

iv) 座標間の関係

上述の没水部長さ ξ は重心 G の空間位置 (x_G, y_G) が決まると

$$\xi = l_0 + \frac{y_G}{\sin \theta}, \quad (\text{A.10})$$

で与えられる。

それ故その時間微分は $\dot{y}_G$ の他に $\dot{\theta}$ の項も含む事に留意しなければならない。

細長回転体の水面進入運動について

	久	留	道	治
	水	野	俊	明
正員	別	所	正	利

Oblique Water Entry of a Slender Body

By Michiharu HISATOME
Toshiaki MIZUNO
Masatoshi BESSHO

西部造船会会報
第 53 号 別 刷
昭和 52 年 3 月

Reprinted from
TRANSACTIONS
OF
THE WEST-JAPAN SOCIETY OF
NAVAL ARCHITECTS
No. 53 MARCH 1977

細長回転体の水面進入運動について

久 留 道 治*
水 野 俊 明**
正 員 別 所 正 利**

Oblique Water Entry of a Slender Body

By Michiharu HISATOME
Toshiaki MIZUNO
Masatoshi BESSHO

Summary

There has been studied the water entry of a body especially on the phenomena arising at the instant when it touches on the water surface. However, it seems to be few studies published with regard to the motion transient from air to water. The present report gives a contribution to this problem. The equation of motion to this case will be written down and solved by the computer and compared with the experiment which is carried out for the present purpose by a model with four various head shape.

The law of comparison with regard to the model experiment is Froude's law, that is, the entrance speed divided by the root of its length is to be the same between the actual body and the corresponding model. The correspondence between the calculated path and inclination and the experimental ones is fairly good. Conclusively, thus, the equation of motion taken for the present study will be sufficient with the accuracy for the present purpose, especially for a sharp pointed slender body.

1. 序 論

細長い物体が、水面に斜めに進入すると軌道が上向きになり極端な場合には再び水面上に飛び出して来ると言う現象がありそのような現象をさける為に頭部を平たくすると良いと言われている。

このような現象は進入速度が大変大きい時は空洞現象等がおこり相似則が大変複雑になって来るけれどそれがあまり大きくなければフルード数を合わせて模型試験を行う事が出来よう。

本研究は細長回転体が低速で水面に進入する場合について運動方程式を書き細長体理論によりその係数を求め、それを積分して軌道を計算し、模型試験と比較検討しようとするものである。

水面進入運動が空中もしくは水中運動と異なる点はその過程で部分的に水中にある為に大きい水の浮力を受け、又一方その部分に働く水の附加質量による大きい加速抵抗を受ける事である。

これらの力の時間的変化は当然頭部形状によつてかなり異なる故軌道も又変化するであろう。

それ故頭部形状を4種類変えた模型を用意し、水面進入後約物体長の2倍程度までの軌道軌跡をストロボ撮影

* 海上自衛隊横須賀造船所

** 防衛大学校

して解析し計算結果と比較検討した。

2. 運動方程式

本研究は物体が空中から水中に進入する場合の過渡的運動を論じようとするものである。

そこで完全に空中又は水中にあつて運動する場合はここでは考えず頭部が水面に接した瞬間から考える事にしよう。

この事は後述のように空中軌道が重要ではないと言う意味ではなくて、空中軌道は短かくても着水時の姿勢を大きく左右するので注意すべきである。

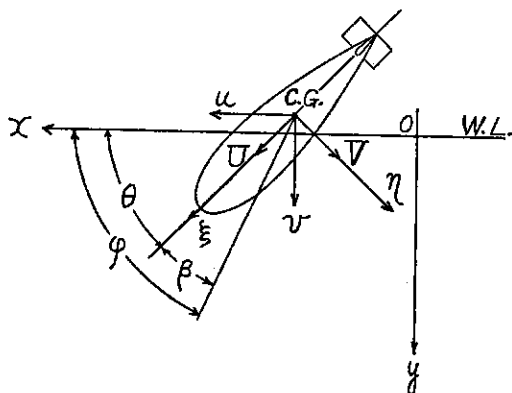


Fig. 1 Co-ordinate system

又一般には着水後3次的運動をすると考えられるが今回は簡単の為に物体が鉛直面内で2次的運動をする場合のみ考える事とする。

実験においても最初鉛直面内にあるようにして打込めば軌道解析の範囲内では略々同じ面内で運動していた。

しかし終りの方では幾分それる場合もあつたが、そのような所では既に水中に全没しているので水中運動の問題として今回は扱わない事にした次第である。

第1図の如く原点を静止水面上に採りx軸を水平にy軸を垂直下方に考えると物体の運動方程式は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} m\dot{u} &= -\dot{M}_x + x', \\ m\dot{v} &= -\dot{M}_y + Y' + W - B, \\ I\ddot{\theta} &= -\dot{M}_\theta + M_x v - M_y u - M_B + N' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに m は質量、 I は質量慣性モーメント、 W は重さ、 B は浮力、 M_B はそのモーメント、 M_x, M_y, M_θ は夫々の方向の附加質量による運動量である。

物体に固定した座標系は原点を重心におき第1図のように ξ, η 軸をとつて (1) をこの座標系について考えよう。

結果は次のようになる。

$$(m+m_\xi)\dot{U} + U\dot{m}_\xi = (m+m_\eta)V\dot{\theta} + (W-B)\sin\theta, \quad (2)$$

$$(m+m_\eta)\dot{V} + V\dot{m}_\eta = -(m+m_\xi)U\dot{\theta} + (W-B)\cos\theta - R_v, \quad (3)$$

$$(I+J)\ddot{\theta} + \dot{J}\dot{\theta} = (m_\xi - m_\eta)UV - M_B - M_R, \quad (4)$$

ここに ξ 方向の粘性による抵抗等は無視し η 方向は $-R_v$ 回転方向の抵抗モーメントは $-M_R$ とした。

m_ξ, m_η, J は夫々の方向の附加質量である。

船、潜水船等と異なるのは左辺第3項であつて、今の場合は水に進入するに従つて附加質量が増加して行くのでその時間微分が存在しこの項は進入速度の自乗に比例する抵抗として働らく。

これらの係数を細長回転体として近似的に求めると附録のようにすべて物体のオフセット $\eta(\xi)$ が与えられれば計算出来る。

そしてこれらを用いれば与えられた初期条件について水中への進入径路を例えばルンゲ・クッタ法により計算

出来る。

初期条件としては先端接水時の速度，姿勢角 φ ，偏角 β とした。

さて模型試験を行う為には相似則を確かめておく必要があるので (2) (3) (4) を無次元化して見よう。

基準長さとして全長 L ，速度として重心の着水速度 U_0^* ，質量として ρ ，(ρ は排水量，今回の実験計算では m に一致させてある) をとり無次元量に肩符 (') を附する事にすると

$$\left. \begin{aligned} t' &= tU_0^*/L, \quad U' = U/U_0^*, \quad V' = V/U_0^*, \quad \theta' \equiv \theta, \quad \dot{\theta}' = \dot{\theta}L/U_0^* \\ m' &= m/\rho V, \quad I' = I/\rho V L^2, \quad W' = W/\rho g V, \quad B' = \frac{B}{\rho g V}, \\ M'_B &= \frac{M_B}{\rho g V L}, \quad R'_V = \frac{LR_V}{\rho V U_0^{*2}}, \quad M'_R = \frac{M_R}{\rho V U_0^{*2}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となり (2) (3) (4) は

$$(m' + m'_t)\dot{U}' + U'\dot{m}'_t = (m' + m'_t)V'\dot{\theta}' + \frac{(W' - B')}{F^2} \sin \theta, \quad (6)$$

$$(m' + m'_t)\dot{V}' + V'\dot{m}'_t = -(m' + m'_t)U'\dot{\theta}' - R'_V + \frac{(W' - B')}{F^2} \cos \theta, \quad (7)$$

$$(I' + J')\ddot{\theta}' + J'\dot{\theta}' = (m'_t - m'_c)U'V' - M'_R - \frac{M'_B}{F^2}, \quad (8)$$

ここに

$$F = U_0^*/\sqrt{gL}, \quad (9)$$

はフルード数である。

それ故着水速度に関するフルード数が同じならば無次元化した軌道は同じになる。

又このフルード数に関する項は浮力に関係する項のみであつてフルード数が充分大きくなればこれらの項の寄与は大変小さくなる。

逆に浮力が利いて来るのはフルード数の小さい所である。

図2は此の様子を計算して見た例であるがフルード数が4以上となると水中軌道はほとんど変らない事がわかる。

又この物体が空中ある高さ H から自由落下するものとし空気抵抗を無視すると

$$U_0^* = \sqrt{2gH} \quad \text{なる故} \quad F = \sqrt{2H/L}, \quad (10)$$

となる故この時は H/L をフルード数のかわりに使えばよい。

このようにして今回のように単純化した場合はフルード数を合せて実験すれば軌道も又相似になる，すなわち縮尺比を λ とするならば長さは

$$L_m = \lambda L_p, \quad (11)$$

下添字 m は模型， p は実物とする。

時間については

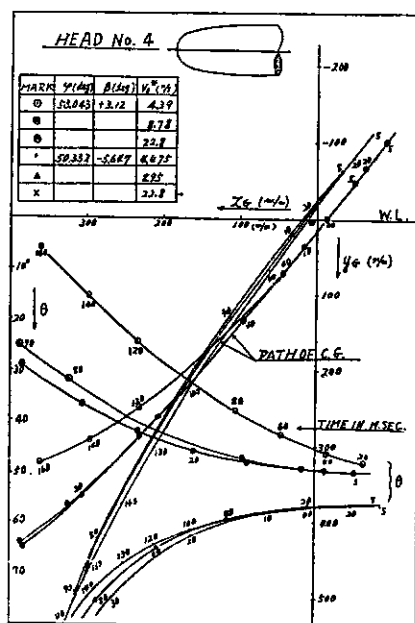


Fig. 2 Effect of entrance velocity (calculation)

$$t_m = \sqrt{\lambda} t_p,$$

角度, 速度等は

$$\theta_m = \theta_p, \quad \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_p / \sqrt{\lambda}, \quad U_m = \sqrt{\lambda} U_p, \quad \dot{U}_m = \dot{U}_p,$$

等となる。

(12)

(13)

3. 実 験

前節で導いた運動方程式がどの程度実験と合致するかを確かめる為に, 又頭部形状にどの程度依存するかを調べる為に模型試験を企画した。

模型は全表 400 mm とし頭部を 4 種 (図 3, 4) とりかえたものを用意した。

主要目は表 1 に示す通りである。

この模型を全長約 2 m の傾斜角可変のガイドレールに沿って所望の偏角 β をつけて長さ, 幅, 深さ共に約 1.5 m の水槽中に落下させ, ストロブ写真撮影する事とした。

この写真から単位時間毎の重心軌跡, 姿勢角を読みとる。

予備試験の結果から偏角がレールを離れた後約数 10 cm の空中を飛ぶ間に最初設定した角とかなり変わってくる事がわかったので空中軌道をあらかじめ計算しておき着水時に大体予定した偏角になるように最初の偏角を設定する事にした。

そう言う訳で実験データの偏角は予定したものと少し宛変つて来ている。

この事は実用上は大変大切な事であつて実用上は前節のような運動方程式は空中軌道計算に続けて解かなければ意味は薄れるであろう。

つまり空中の運動によつて着水時の速度, 姿勢, 偏角が定まりこの内特に姿勢角と偏角によつて水中の軌道が殆ど決つてしまうと言う意味でこの事は重要である。

なお解析上の注意としてはカメラは空中にあり物体は水中にあるので光の屈折に対する補正が必要である。解析の一例を図 5 に示す。

これは図 2 の計算に対応する実験であつて着水速度の影響を示すものであり傾向的に計算とよく合っている事

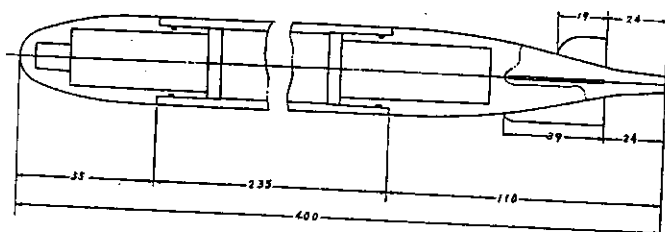


Fig. 3 Model with No. 4 head

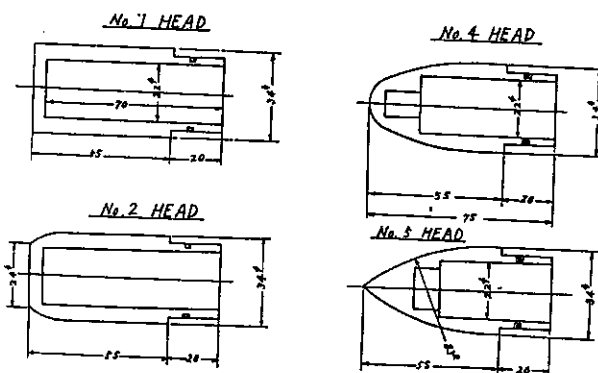


Fig. 4 Model head shape

Table 1 Particulars of Model

Model head No.	1	2	4	5
DIA. (mm)	34.0	34.0	34.0	34.0
Length (mm)	400.0	400.0	400.0	400.0
Weight (gr)	315.0	312.0	300.0	300.0
l_G (mm)	174.5	177.3	182.3	186.8
Radius of GYR. (mm)	125.8	134.9	120.7	120.8

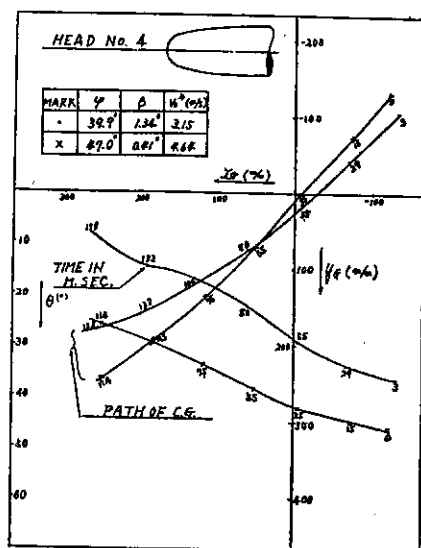


Fig. 5 Effect of entrance velocity (experiment)

Table 2 Test and Conditions

Items	Series	1	2	3	4
Entrance vel. V_0 (m/s)		4.0, 5.0	4.5	4.5	4.5
Entr. Angle ϕ (deg)		45	47, 51, 61	51	90
Drift. Angle β (deg)		0	± 4.0	± 4.0	0
Model head No.		4	4	1, 2, 4, 5	1, 2, 4, 5

Table 3 Axial added mass coefficient

$$m'_t = m_t / \rho V$$

Model head No.	1	2	3	4
Added mass coef. m'_t	0.0699	0.0788	0.0554	0.0517

が見られるだろう。

実験解析は速度、加速度についても行われておりその計算との比較例は図8a, b, c (後出) に示す。

実験は表2に示すように速度の影響(系列1), 進入角偏角の影響(系列2), 頭部系状の影響(系列3) 軸方向附加質量の測定(系列4) の4系列に別けて行つた。

この内系列4は大変簡単な落下試験であつてその落下軌跡より式(2)によつて m_t を求めたものであり、結果のみ記せば表3のようになる。

計算では m_t の変化が運動にあまり影響がないと言う点も考えて一律に 0.05 とした。

4. 解析結果と考察

以上の実験結果とそれに対応する計算との対応を要約すると次のようになる。

i) 一般的傾向

水中軌道は今回の実験範囲つまり一物体長程は偏角 β が表4に示す値では着水時の姿勢角のまま直進する。

Table 4 Drift angle at which model does not change its inclination

Model head No.	1	2	4	4	4	5
Entrance ang. ϕ (deg)	50	50	47	50	61	51
Drift angle β (deg)	1.0	1.0	-5.8	-4.0	-3.0	-4.0

偏角がこの値より正の方向に大きければ姿勢角はどんどん上向きになり、入射角がうんと小さい場合は水の上に飛び出す事が考えられる。

今回はそのような実験は行つてないので計算してこの点を図6a, b に示す。

しかし偏角が負ならばともに水中に進入しう事が図6b からよくわかるだろう。

ii) 着水速度の影響(系列1)

図2に計算値を図5には実験値を示すが着水速度が大きくなると姿勢角の変化は少なくなり直進するようになる。

図2からそこで述べたように略々フルード数が4以上では浮力の影響は考えなくてもよいと思われる。

iii) 進入角の影響(系列2)

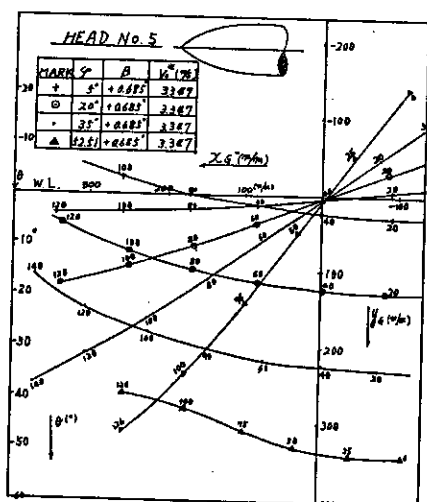


Fig. 6-a Effect of entrance angle (calculation)

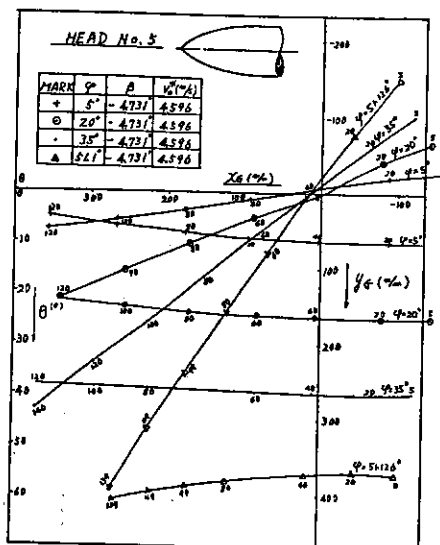


Fig. 6-b Effect of entrance angle (calculation)

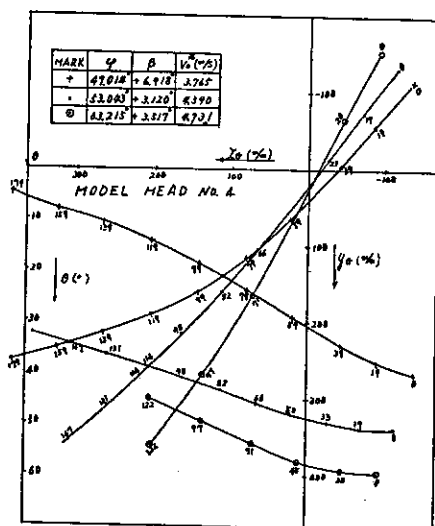


Fig. 7-a Effect of entrance angle (experiment)

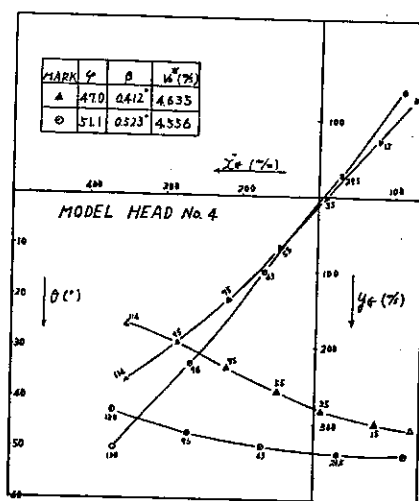


Fig. 7-b Effect of entrance angle (experiment)

図7-a, b, c に示すように進入角が小さいと軌道は大きく上向に曲つて来る。

これは明らかに浮力のモーメントの影響である。

iv) 偏角の影響 (系列2)

図8-a, b, c に速度, 角速度の解析結果も計算値と比較して示してある。

i) 項でものべたように偏角が正の時は軌道の上向き傾向は大変きつくなる。

計算値との一致は重心軌道では割合良好であるが姿勢角速度等ではあまり良くない場合が多く見受けられる。

又加速度についても比較はして見たがかなり合わない。これは実験値の方があまり信頼出来ない(2階数値微分するので)ので比較するのが無理とも考えられるので集録しなかつた。

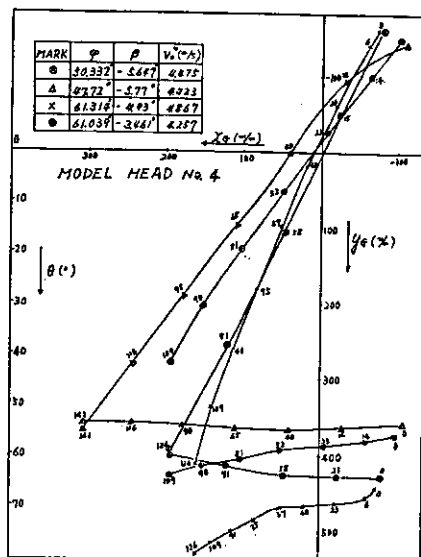


Fig. 7-c Effect of entrance angle (experiment)

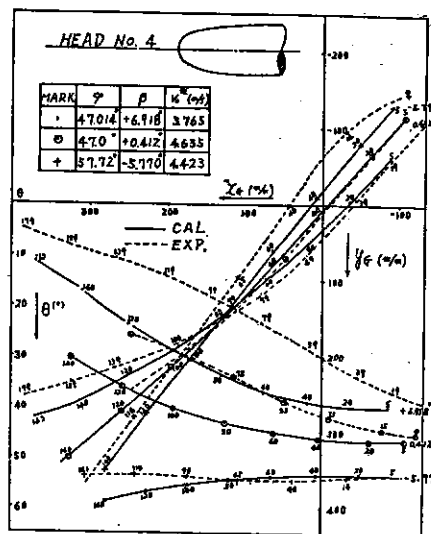


Fig. 8-a Effect of drift angle

v) 頭部形状の影響 (系列3)

図9に大体偏角の小さい場合の頭部形状の差による軌道の変化を示してある。

このように頭がとがつて来るにつれて姿勢角が上向きになる度合いが強くなり、従つて軌道も上方に曲がる。

それに反して頭が平たくなると姿勢角が幾分波状に変動するが平均値は殆ど変わらず従つて略々直進する。

これは別の言い方をすれば平頭体は着水の瞬間に頭部下端で水を掬うため頭下げモーメントを生じこれが爾後の軌道に影響しているとも考えられる。(計算では直接この項は考えていない。)

いづれにしても平頭になる程計算値と実験値とは合わなくなる。

図10~13には各模型の実験値を計算値と比較してある。

今のべたように頭が平らなものは最も一致がよくないが頭が最もとがつている4番模型においては大変良く一致している。

速度等の図は省略したが同様である。

なお一般に着水から10~20 m.s.の間の値において計算と実験の不一致が大きく、それが又その後の軌道に影響を与える場合がある。

今回の計算は実験から着水速度等の初期条件を読みとつて積分を実行したものであるがその精度(時間の原点も含めて)もあまり自信が持てず、一方今回の運動方程式では着水時の水面の乱れ空洞等については全く考えて

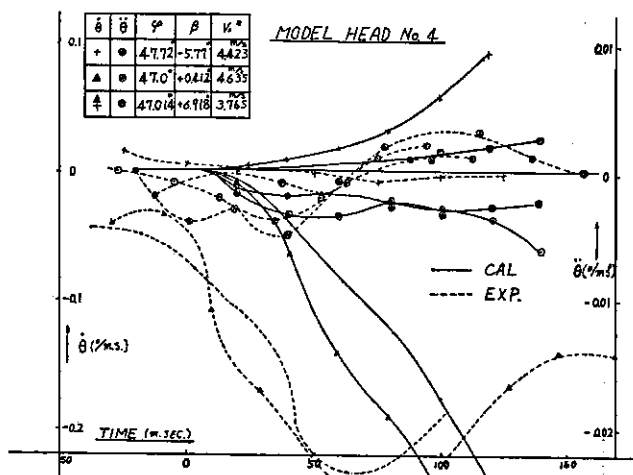


Fig. 8-b Effect of drift angle

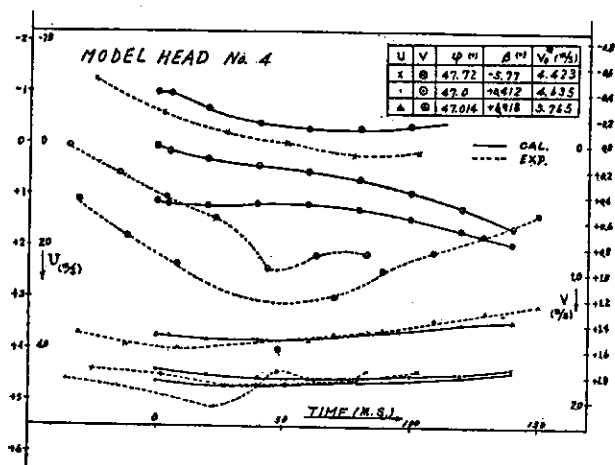


Fig. 8-c Effect of drift angle

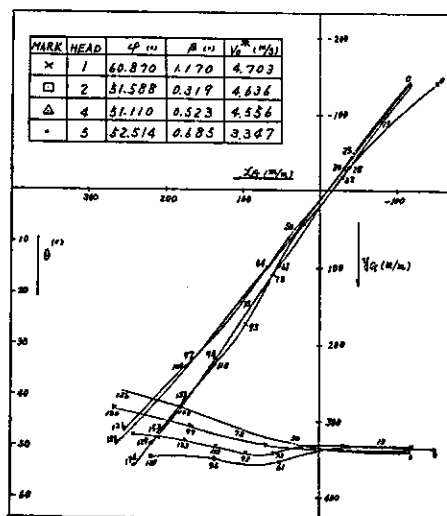


Fig. 9 Effect of head shape

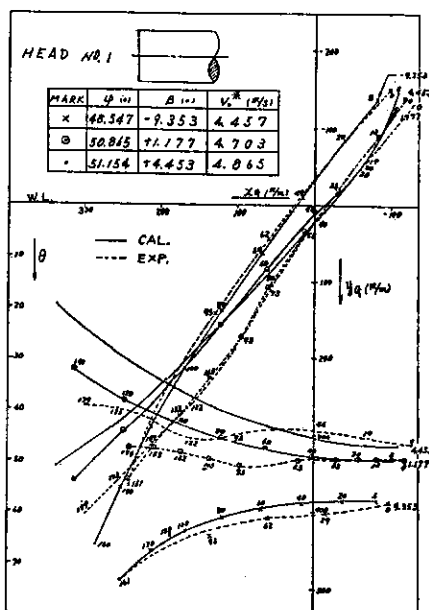


Fig. 10 Comparison with experiment and calculation (Head No. 1)

a) が平均的に最もよく実験値に合っているように見えるがこの実験の範囲では抗力を無視した b), c) でもあまり差はないように見える。

偏角の異なる場合の計算も参照すると一応 a), b), c) の順に実験との一致は悪い。

d) の浮力を無視した場合は最初に述べたようにこの図で一致が悪いのはフルード数が小さい為であるがとにかくフルード数の低い場合は浮力を無視すると全く実験と合わない事を示している。

5. 結 論

細長い回転体が比較的低速で水中に斜めに進入する運動を採り上げて、運動方程式を立てさらに頭部形状を4種類かえた模型により実験し、計算結果と比較した。

いないのでこの程度の不一致は止むを得ないであろう。

vi) 運動方程式の係数の影響

以上のように当然の事ながら今回採用した運動方程式は頭のとがった物体について最も良く合う事がわかったが、これを調べるために幾つかの項を省略して計算を実行して見た結果を図14に示す。

図中 a) は今回の方程式による計算値、b) は粘性抗力を無視したもの、c) は附加質量が時間的に変化せず最初から $m' = 0.05$, $m'_0 = 1$ とおいたもの、d) は浮力を無視したもののである。

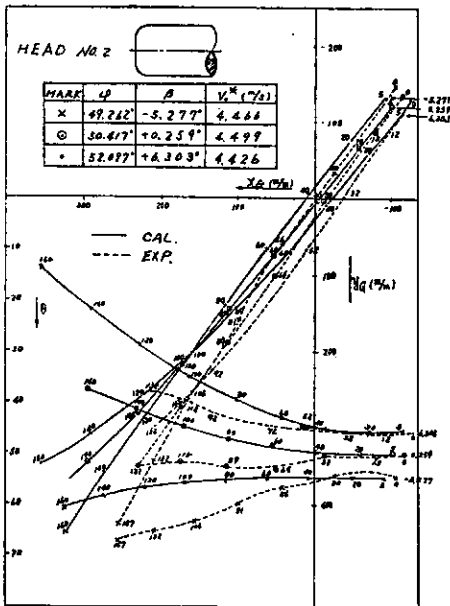


Fig. 11 Comparison with Experiment and calculation (Head No. 2)

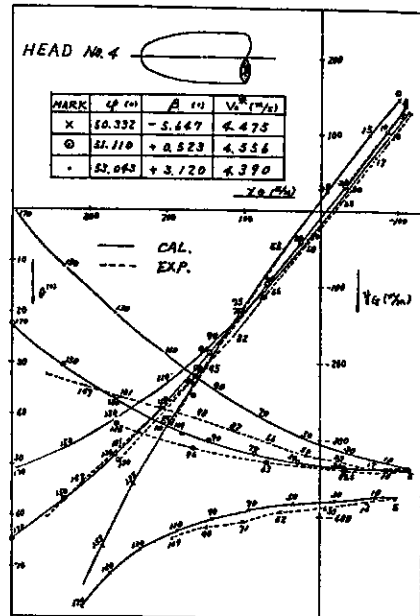


Fig. 12 Comparison with experiment and calculation (Head No. 4)

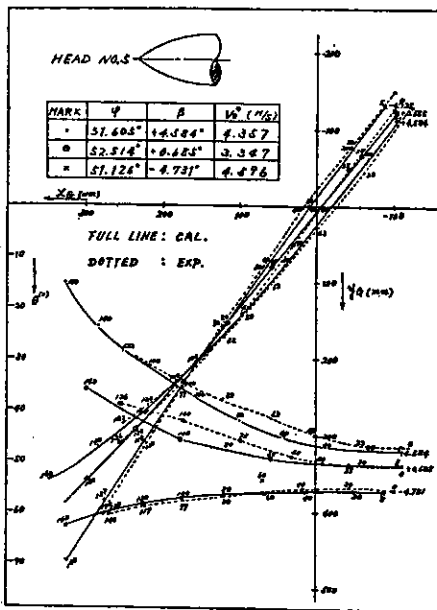


Fig. 13 Comparison with calculation and experiment (Head No. 5)

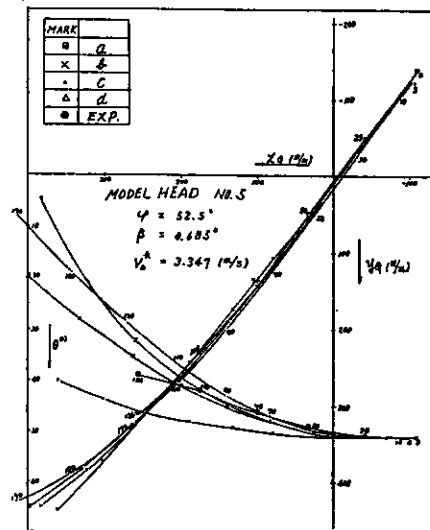


Fig. 14 Comparison of contribution of various terms

その結果

- i) 着水時フルード数を一致させて実験すれば計算と定性的によく一致する。
- ii) 実験と計算は頭のとがつているもの程よく合い、定量的にも略々一致する。
- iii) 着水時フルード数が小さいと浮力の影響で軌道は上向きに曲がる。
しかしフルード数が4以上では浮力はほとんど軌道に影響しない。

iv) 着水後の姿勢変化、軌道については着水時の偏角の正負大小が支配的であるが頭が平たい時は偏角による姿勢変化特に上向き傾向が著るしく小さくなる。

v) 物体が全没する位迄の運動については粘性抵抗、附加質量の時間変化は無視してもあまり実験と異ならないけれどフルード数が小さい場合は浮力は無視出来ない。

以上総合して物体が全没してしまう位までの水中軌道については着水時の姿勢、特に偏角が重要である事がわかる。

所がそれはその前の空中の運動によつて決るものであるから、この意味では着水以前の空中運動の調査検討が重要である事になる。

参 考 文 献

- 1) F. S. Surt, "New contributions to hydroballistics", Advances in Hydrosience vol. 1 1964 p. 182-208.
- 2) John G. Waugh, "Water-entry pitch modeling", J. Hydronautics, vol. 2 No. 2 Apr. 1968 p. 87-92.
- 3) 久留道治 「魚雷の水面入射に関する研究」 防大理工学研究科卒業論文, 昭和50年3月
- 4) 元良誠三 "船体運動力学" p. 3-p. 13.

附録 運動方程式の係数について

i) 浮力とそのモーメント

図15のように細長回転体が θ の角度で中心線に沿つて先端から ξ だけ水に進入した時の浮力とそのモーメントは物体が大変細長いとすると近似的に次のように表現出来る。

すなわち浮力 B は鉛直上向きに

$$B \approx \pi \rho g \int_0^l \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.1)$$

ここに η は物体半径のオフセットである。

それによるモーメント M_B は

$$M_B \approx \pi \rho g \cos \theta \int_0^l (l_G - \xi) \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.2)$$

ここに l_G は先端から重心 G までの距離とする。

ii) 附加質量

横(η)方向の附加質量はストリップ法的に考えて

$$m_\eta \approx \pi \rho \int_0^l \eta^2(\xi) d\xi, \quad (A.3)$$

と近似出来る。

こうすると浮力の場合も同じであるが水面が物体長軸に関して傾いている事の影響が入つて来ないし又水面の擾乱のそれも入っていないが一方では大変式が簡単になるという利点がある。

附加慣性モーメントは

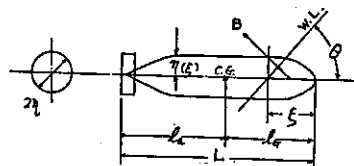


Fig. 15 Buoyancy at water entry

$$J \rightleftharpoons \pi \rho \int_0^l \eta^2(\xi)(l_G - \xi)^2 d\xi, \quad (\text{A.4})$$

それ故これらの時間微分は

$$\dot{m}_e \rightleftharpoons \pi \rho \eta^2(\xi) \frac{d\xi}{dt}, \quad (\text{A.5})$$

$$J \rightleftharpoons \pi \rho \eta^2(\xi)(l_G - \xi)^2 \frac{d\xi}{dt}, \quad (\text{A.6})$$

となる。

長手 (ξ) 方向の附加質量はストリップ法的には 0 と見なせばよいし又実験的にもあまり影響はないようであるので資料等から今回は

$$m_e \rightleftharpoons 0.05 m, \quad (\text{A.7})$$

を採用したが垂直落下試験の結果は表 3 の通りである。

iii) 抵抗

細長体の斜行時の抵抗は横方向の分が桁違いに大きくそれに較べると長手方向の分は無視し得る。

またこの横方向の抵抗 $-R_v$ は各要素ストリップにおける円筒の抵抗係数 C_D を使つて

$$R_v(\xi) \rightleftharpoons \rho C_D V |V| \int_0^l \eta(\xi) d\xi, \quad (\text{A.8})$$

又その重心まわりのモーメントは

$$M_R(\xi) \rightleftharpoons \rho C_D \dot{\theta} |\dot{\theta}| \int_0^l \eta(\xi)(l_G - \xi)^2 d\xi, \quad (\text{A.9})$$

と表わせる。

実験におけるレイノルズ数は 10^5 程度であつたので $C_D=1.2$ を使用した。

iv) 座標間の関係

上述の没水部長さ ξ は重心 G の空間位置 (x_G, y_G) が決まると

$$\xi = l_G + \frac{y_G}{\sin \theta}, \quad (\text{A.10})$$

で与えられる。

それ故その時間微分は $\dot{y}_G$ の他に $\dot{\theta}$ の項をも含む事に留意しなければならない。