

8. 曳航体と曳航索の力学について^{※1}

佐々木^{※2} 建、野本^{※2} 昌夫、原^{※2} 俊明

海洋観測用曳航体に対しては、短周期の（大きい鉛直速度をとまう）昇降運動が要求されることもあり、索長一定での広い深度範囲を昇降することが要求される場合もある。このような要求を満足させるには、曳航体および曳航索の海中における挙動につき十分理解した上で曳航体の設計を行わなければならない。そこで、曳航体と曳航索の連成運動を記述する方程式を導出し、これを用いて鉛直面内の運動についての計算機シミュレーションを実施した。この結果、曳航体と索の運動が予測された。また、曳航体の縮尺模型による流体力学特性試験を実施し、揚力係数、抵抗係数等の静的流力特性と、付加慣性モーメント等の動的流力特性を得た。

A Note on the Dynamics of a Towed Vehicle and a Towing Cable

Ken SASAKI^{※3}, Masao NOMOTO^{※3}, Toshiaki HARA^{※3}

When a towed vehicle is used in the measurement of oceanographic data, it is usually desirable that the vehicle can rapidly change its depth and/or its towing depth can be shifted as much as possible with a fixed length of towing cable. For achieving such a goal the design of the towing system should be supported by ample information on the dynamics of the vehicle and the cable. The present note describes (a) a method for determining the motion in a vertical plane of the vehicle-cable system by means of numerical calculation, (b) a vehicle model experiment in which pertinent data are collected for improving the accuracy of calculation, and (c) some of the interesting features of the motion thus revealed.

1. ま え が き

本報告は曳航体と曳航索の海中における一般的な運動を解析する手法について説明する。ただし今回は曳航体が左右対称性を保持しつつ鉛直な平面内を運動する場合のみをあつかう。曳航体の横運動（ローリング、ヨウイング）をも含めた解析については、別の機会に報告する予定である。本研究の実施にさいしては東京大学宇宙航空研究所の東昭教授および井内松三郎助手のご助言ご指導をいただいたのでここに記して謝意を表する。また本研究の内容につき三菱重工（株）長崎研究所の今山善之氏および長崎造船所の菅野滋氏と意見を交換することができ非

常に有益であったので謝意を表する。

2. 曳航索の力学

我々の目的は、曳航体と曳航索との連成運動をなるべく一般的な条件のもとで計算することである。したがって索に関する特殊な現象を特殊な方法で解析した論文は参考にしなかった。索の運動を計算する一般的な方法を提案している論文としては、Schram and Reyle (1968), Burroughs and Benz (1974) などによるものがある。我々は、これらの方法における座標系の使い方や張力の計算法が複雑であり、やや実用性に欠けるとの印象を受けた。そこでより

※1 本研究は、科学技術庁研究調整局から委託を受けた「曳航式海洋観測システムの開発に関する試験研究」の一環として実施したものである。

※2 海洋保全技術部

※3 Marine Conservation Technology Department

実用性の高いと思われる計算法を考案し、それを用いて数値計算を実行した。

これから説明する計算法において、索は多数の質点と円筒を交互に直列に連結したモデルで表現され、索の曲げとねじれの影響は無視される。質点の加速度との円筒の張力は比較的簡単な計算を一定回数反復することにより決定される。この計算法は、運動が2次元（鉛直面内）であっても3次元であっても全く同様に使えるという長所を有している。

2. 1 解 析 方 法

われわれは、N個の円筒とN-1個の質点とを交互に連結したものを、曳航索のモデルとして採用し、その運動を解析するために、下記の記号を定義する。

円筒の直径：d（索の直径にひとしい）

円筒の長さ： l_i ($i = 1, \dots, N$)

円筒の質量：ゼロとする。

円筒の抵抗係数： C_D

円筒の表皮摩擦係数： C_F

円筒の張力： T_i ($i = 1, \dots, N$)

質点の質量： m_i ($i = 2, \dots, N$)

始点、質点、および終点の位置： $\vec{X}_i$

始点、質点、および終点の位置： $\vec{U}_i$

始点、質点、および終点の位置： $\vec{A}_i$

質点に作用する外力： $\vec{F}_i$ （張力は別）

$i = 1$ は索の始点すなわち曳航船上の一点に対応する。 $i = 2, \dots, N$ は前記の質点に対応する。 $i = N + 1$ は索の終点、すなわち曳航体上の一点（曳航点）に対応する。上記の $\vec{X}_i$, $\vec{U}_i$, $\vec{A}_i$, $\vec{F}_i$ 等は、地球固定座標系におけるベクトルである。これから取扱う式の表現を簡単化するために、新しく下記のベクトルを定義する。

$$\vec{DX}_i \equiv \vec{X}_{i+1} - \vec{X}_i \quad (1.1)$$

$$\vec{DU}_i \equiv \vec{U}_{i+1} - \vec{U}_i \quad (1.2)$$

$$\vec{DA}_i \equiv \vec{A}_{i+1} - \vec{A}_i \quad (1.3)$$

点 $\vec{X}_i$ に存在する質点の運動方程式は

$$m_i \vec{A}_i = \vec{F}_i + T_i \vec{DX}_i / l_i - T_{i-1} \vec{DX}_{i-1} / l_{i-1} \quad (i = 2, \dots, N) \quad (1.4)$$

である。ここで $\vec{F}_i$ は重力と流体力の和である。

i 番目の円筒に作用する流体力は、法線力

$$\vec{F}_n = \frac{1}{2} C_D \rho \vec{U}_n \|\vec{U}_n\| l_i d \quad (1.5)$$

と接線力

$$F_t = \frac{1}{2} C_F \rho \vec{U}_t \|\vec{U}_t\| l_i \pi d \quad (1.6)$$

との和である。ここで流体の接線速度は

$$\vec{U}_t \equiv \left\{ \frac{1}{2} (\vec{U}_i + \vec{U}_{i+1}) \cdot \vec{DX}_i / l_i \right\} \vec{DX}_i / l_i \quad (1.7)$$

とし、流体の法線速度は

$$\vec{U}_n \equiv \frac{1}{2} (\vec{U}_i + \vec{U}_{i+1}) - \vec{U}_t \quad (1.8)$$

とすればよい。なお C_D は抵抗係数、 C_F は表皮摩擦係数、 ρ は流体密度である。参考文献(2)によれば $C_D = 1.20$, $C_F = 0.05$ とするのが適当である。

そして円筒に作用する力とモーメントのつり合い条件を用いれば、円筒を介して両端の質点に伝達される流体力は、それぞれ

$$\frac{1}{2} (\vec{F}_n + \vec{F}_t)$$

にひとしいことがわかる。

一方張力 T_i を求めるために、質点間の距離が変らないという条件

$$\vec{DX}_i^2 = l_i^2 \quad (i = 1, \dots, N)$$

を使用する。この式を時間で微分すると、

$$\vec{DU}_i \cdot \vec{DX}_i = 0 \quad (1.9)$$

$$\text{および } \vec{DU}_i^2 + \vec{DA}_i \cdot \vec{DX}_i = 0 \quad (1.10)$$

を得る。

(1.3), (1.4), (1.10)より $\vec{DA}_i$, $\vec{A}_{i+1}$ を消去すると

$$\vec{DU}_i^2 + \vec{DX}_i \cdot \left(\frac{\vec{F}_{i+1} + T_{i+1} \vec{DX}_{i+1} / l_{i+1} - T_i \vec{DX}_i}{l_i} \right) / m_{i+1} - \vec{A}_i = 0 \quad (1.11)$$

を得る。この式を用いて T_{i+1} を求め、それを(1.4)に代入すれば $\vec{A}_{i+1}$ を決定できる。 $\vec{A}_i$ は曳航船上の固定点の加速度であるから既知とする。一方 T_i は未知であるが、曳航体の運動状況と関連づけることにより、次のようにして決定される。

まず $T_1 = 0$ として(1.4)および(1.11)により張力 T_i と加速度 $\vec{A}_i$ を決定する。

その解を記号

$$T_i^p, \vec{A}_i^p \quad (i = 2, 3, \dots, N)$$

により示す。つぎに $T_1 = 1$, $\vec{F}_1 = 0$, $\vec{DU}_1 = 0$ として(1.4)および(1.11)により張力と加速度を決定する。そしてその解を記号

$$T_i^h, \vec{A}_i^h \quad (i = 2, 3, \dots, N)$$

により示す。そうすると

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_i^p + C T_i^h \\ \vec{A}_i &= \vec{A}_i^p + C \vec{A}_i^h \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

は任意のCについて(1.4)および(1.11)解であり、残された条件

$$\vec{DU}_N^2 + \vec{DX}_N \cdot (\vec{A}_{N+1} - \vec{A}_N^p - C \vec{A}_N^h) \quad (1.13)$$

$$\vec{A}_{N+1} = \vec{A}_F + (T_N^p + C T_N^h) \vec{A}_T \quad (1.14)$$

を用いてCを決定すれば、すべての張力と加速度が確定する。(1.14)式において $\vec{A}_F$ は張力によらない曳航体曳航点の加速度であり、 $\vec{A}_T$ は単位張力による加速度である。 $\vec{A}_F$, $\vec{A}_T$ の具体的な計算法は曳航

体の力学に関する解析により決定される。

1.2 定常状態の計算

この場合 $\bar{A}_i = 0$ であるから、(1.4) を

$$T_i \bar{D}\bar{X}_i / l_i = T_{i-1} \bar{D}\bar{X}_{i-1}$$

とすれば、 T_{i-1} 、 $\bar{D}\bar{X}_{i-1}$ より T_i 、 $\bar{D}\bar{X}_i$ を求められるので、索の一端(下流側)から出発してこの操作を反復すれば、定常状態における索形状と張力分布とを求め得る。ただし(1.15)の右辺の $\bar{F}_i$ は(1.5)～(1.8)に $\bar{D}\bar{X}_i$ を代入して求められた

$$\frac{1}{2} (\bar{F}_n + \bar{F}_i)$$

をふくむので、そのとき用いた $\bar{D}\bar{X}_i$ と、(1.15)により計算された $\bar{D}\bar{X}_i$ とが十分よく一致するまで反復計算を行わねばならない。

2. 曳航体の力学

我々が使う機体固定座標系 $O X$ 、 $O Y$ 、 $O Z$ の原点は、胴体の軸は胴体の軸上、最前部より0.85mの点にあり、 X 軸は胴体の軸と一致して前方に向き、 Y 軸は右方に向き、 Z 軸は下方に向く。曳航体の運動は地球に固定した座標系に対する、①機体固定座標原点の位置、②原点の速度(U 、 V 、 W) ③座標軸 $O X$ 、 $O Y$ 、 $O Z$ の向きおよび、④座標軸 $O X$ 、 $O Y$ 、 $O Z$ のまわりの回転角速度 (p , q , r) により表現される。

曳航体の3次元運動に関する解析はまだ完了していないので、ここでは曳航体が1個の鉛直面内で左右対称性を保ちつつ運動する場合につき説明する。したがって曳航体の運動は、①2次元空間における原点の位置、②原点の速度 u , w , ③座標軸 $O X$ 、 $O Z$ の向き、および④座標軸 $O Y$ のまわりの回転角度 q により表現される。

2.1. 曳航体諸元の設定

曳航体の力学的特性を推定するさいに用いられる曳航体諸元およびその記号は下記のとおりである。

重量： m

浮量： H

機体の3軸まわり

の慣性モーメント： I_x , I_y , I_z

重心位置： X_G , Z_G

浮心位置： X_H , Z_H

胴体長さ： ℓ

胴体直径： d

胴体中心位置： X_B , Z_B

主翼弦長： C_w

幅： S_w

中心位置： X_w , Z_w

空力中心位置： X_{WA} , Z_{WA}

水平尾翼弦長： C_T

幅： S_T

中心位置： X_T , Z_T

空力中心位置： X_{TA} , Z_{TA}

昇降舵面弦長： C_E

幅： S_E

曳航点位置： X_c , Z_c

曳航体の胴体は回転楕円体で近似し、翼は長方形で近似する。曳航体の運動解析に用いた曳航体諸元の数値を表1に示す。

2.2. 曳航体の付加質量などについて

表1 曳航体の諸元

Parameters defining the configuration of the towed vehicle.

記号 symbol	数値 figures	単位 unit
m	107	kg
H	130	kg
I_Y	24.40	kg.m
X_G, Z_G	(-0.10, 0.08)	m
X_H, Z_H	(-0.10, 0.00)	m
ℓ	2.00	m
d	0.32	m
X_B, Z_B	(-0.10, 0.00)	m
C_w	0.31	m
S_w	1.50	m
X_w, Z_w	(-0.18, 0.32)	m
X_{WA}, Z_{WA}	(-0.10, 0.32)	m
C_T	0.23	m
S_T	0.80	m
X_T, Z_T	(-1.02, 0.00)	m
X_{TA}, Z_{TA}	(-0.96, 0.00)	m
C_E	0.13	m
S_E	0.60	m
X_c, Z_c	(0.00, 0.00)	m

この節で新たに定義される量は下記のとおりである。

胴体の付加質量： m_{BX} , m_{BZ}

付加慣性モーメント： I_B

主翼の付加質量： m_W

付加慣性モーメント： I_{WY}

水平尾翼の付加質量： m_T

付加慣性モーメント： I_{TY}

主翼取付角： α_0

第1近似として、曳航体の各部分の干渉を無視すると、曳航体の2次元運動による運動エネルギー T は次式で表現される。

$$\begin{aligned} 2T = & m(u+qZ_G)^2 + m(W-qX_G)^2 \\ & + m_{BX}(u+qZ_B)^2 + m_{BZ}(W-qX_B)^2 \\ & + m_T(W-qX_T)^2 \\ & + m_W[(W-qX_W)\cos\alpha_0 - (u+qZ_W)\sin\alpha_0]^2 \\ & + q^2(I_Y + I_B + I_{TY} + I_{WY} - mX_G^2 - mZ_G^2) \end{aligned} \quad (2.1)$$

曳航体の対称面内運動による運動量は $\partial T/\partial u$ および $\partial T/\partial w$ にひとしく、角運動量は $\partial T/\partial q$ にひとしい。これらを簡明に表現するために参考文献(7)(13.18)式にならって次のような記法を用いる。

$$\begin{pmatrix} \partial T/\partial u \\ \partial T/\partial w \\ \partial T/\partial q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{13} & A_{15} \\ A_{31} & A_{33} & A_{35} \\ A_{51} & A_{53} & A_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \end{pmatrix} \equiv \tilde{A} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

上式右辺の行列 $\tilde{A}$ を求めておけば、付加質量などの影響をふくめて曳航体の運動を解析できるようになり、この節の目的は達成される。

(2.1), (2.2)を用いると

$$\begin{aligned} A_{11} &= m + m_{BX} + m_W \sin^2 \alpha_0 \\ A_{13} &= A_{31} = -m_W \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \\ A_{33} &= m + m_{BZ} + m_T + m_W \cos^2 \alpha_0 \\ A_{35} &= A_{53} = -m_{BZ} X_B - m_T X_T \\ &\quad - m_W \ell_W \cos \alpha_0 - m X_G \\ A_{55} &= I_Y + I_B + I_{WY} + m_{BX} Z_B^2 + m_{BZ} X_B^2 \\ &\quad + m_T X_T^2 + m_W \ell_W^2 \\ &\quad (\ell_W = X_W \cos \alpha_0 + Z_W \sin \alpha_0) \end{aligned} \quad (2.3)$$

を得る。

曳航体各部分の付加質量などの計算式を表2に示し、曳航体の付加質量などの数値を表3に示す。表2において V_B は胴体の体積であり、 m_{B0} , I_{B0} は胴体内(頭部と尾部)に存在する海水による。

2.3. 曳航体の運動方程式

表2 曳航体各部分の付加質量などの計算式

Formulae for the added mass and moment of inertia of the wings and body of the towed vehicle.

$$\begin{aligned} m_{BX} &= 0.05 \rho V_B + m_{B0} \\ m_{BZ} &= 0.93 \rho V_B + m_{B0} \\ I_B &= \rho V_B (1/20)(\ell^2 + d^2) \times 0.77 + I_{B0} \\ m_T &= \rho(\pi/4) C_{T^2} S_T \\ I_{TY} &= m_T C_{T^2} / 32 \\ m_W &= \rho(\pi/4) C_{W^2} S_W \\ I_{WY} &= m_W C_{W^2} / 32 \end{aligned}$$

表3 曳航体の有効質量などの計算値

The computed virtual mass and moment of inertia of the towed vehicle as a whole.

記号 symbol	数値 figures	単位 unit
A11	127.4	kg
A13, A31	-6.1	kg.m
A15	8.6	kg.m
A33	385.8	kg
A35, A53	69.9	kg.m
A55	78.2	kg.m ²

運動方程式は機体固定座標系により表現される。下記の式は参考文献(1)(13.22)式を本研究の目的に応じて変形したものである。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial u} \\ \frac{\partial T}{\partial w} \\ \frac{\partial T}{\partial q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x - q \frac{\partial T}{\partial w} \\ F_z + q \frac{\partial T}{\partial u} \\ M_Y \end{pmatrix} + T_N \begin{pmatrix} t_x \\ t_z \\ t_x Z_c - t_z X_c \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

ここで F_x , F_z , M_Y は重力、浮力および曳航体の各部に作用する流体力によるものの和であり、(t_x , t_z)は曳航点における張力の方向余弦であり、 T_N は張力の大きさである。

曳航体運動のシミュレーションにおいては(2.2)と(2.4)を用いて、張力によらない u , w , q の時間変化率 u_F , w_F , q_F を

$$\begin{pmatrix} u_F \\ w_F \\ q_F \end{pmatrix} = \tilde{A} \begin{pmatrix} F_x - q \partial T / \partial w \\ F_z + q \partial T / \partial u \\ M_y \end{pmatrix}$$

により計算し、単位張力による u, w, q の時間変化率 u_T, w_T, q_T を

$$\begin{pmatrix} u_T \\ w_T \\ q_T \end{pmatrix} = \tilde{A} \begin{pmatrix} t_x \\ t_z \\ t_x Z_c - t_z X_c \end{pmatrix}$$

により計算する。ただし A は (2.2), (2.3) において定義された $\tilde{A}$ の逆行列である。この結果を用いると、下記の式により曳航体曳航点の加速度 $\vec{A}_F, \vec{A}_T$ を計算することができる。

$$\vec{A}_F = \begin{pmatrix} u_F \\ w_F \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_c \\ -X_c \end{pmatrix} \dot{q}_F + q \begin{pmatrix} w - q X_c \\ -u + q Z_c \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$\vec{A}_T = \begin{pmatrix} u_T \\ w_T \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Z_c \\ -X_c \end{pmatrix} \dot{q}_T \quad (2.6)$$

2.4 曳航体各部分の受ける力と

モーメント

この節では新たに下記の量について記号を定義する。

表皮摩擦係数 : C_F

機体迎角 : α

主翼の揚力係数 : C_{LW}

◦ 有効迎角 : α_w

◦ 失速迎角 : α_{ws}

◦ 抗力係数 : C_{DW}

◦ 有効アスペクト比 : R_{w1}, R_{w2}, R_{w3}

◦ 後流の吹き下し角 : D_w

水平尾翼の揚力係数 : C_{LT}

◦ 有効迎角 : α_T

◦ 失速迎角 : α_{Ts}

◦ 抗力係数 : C_{DT}

◦ 有効アスペクト比 : R_T

昇降舵角 : δ_E

この節で導入する式の一部は参照文献(4)より引用し、一部は東昭教授の未発表レポートより引用させていただいたことを付記する。

2.4.1 主翼および水平尾翼について

我々が用いた関係式は下記のとおりである。

$$C_{LW} = \frac{2\pi\alpha_w [1 - (1/3)(\alpha_w/\alpha_{ws})^2]}{(1 + 2/R_{w1})}$$

$$C_{DW} = 2C_F + C_{LW}^2 / (\pi R_{w2})$$

$$D_w = -2C_{LW} / (\pi R_{w3})$$

$$\alpha_w = \alpha + \alpha_0$$

$$C_{LT} = \frac{2\pi\alpha_T [1 - (1/3)(\alpha_T/\alpha_{Ts})^2]}{(1 + 2/R_T)}$$

$$C_{DT} = 2C_F + C_{LT}^2 / (\pi R_T)$$

$$\alpha_T = \alpha + \tau (S_E/S_T) \delta_E + X_{TA}q/u + D_w + \frac{|X_{TA} - X_{WA}|}{u} q \frac{\partial D_w}{\partial \alpha}$$

上の式に含まれている主翼の有効アスペクト比 R_{w1}, R_{w2}, R_{w3} の値は理論的には S_w/C_w にひとしいが、模型試験データとの一致をよくするために、計算結果を見ながら調整することも可能である。

2.4.2 胴体について

渦なし流体の理論によれば胴体の受けるモーメントは

$$M_y = (m_{Bz} - m_{Bx}) uw$$

である。つぎに、胴体の形状抵抗係数 C_{D0} は下記の式により計算する。

$$C_{D0} = 3C_F (\ell/d + 1.5\sqrt{d/\ell})$$

そのつぎに、胴体に対して横向き流速成分があるとき、各部分の受ける抵抗による効果を下記の式により計算する。

$$F_z = -\frac{\rho}{2} C_D \cdot d \int w^* |w^*| dX$$

$$M_y = -\frac{\rho}{2} C_D \cdot d \int X w^* |w^*| dX$$

$$(w^* = w - qX)$$

ここでは、計算の都合上、胴体は円筒と仮定した。そして上式の積分範囲は胴体の後端から先端までである。

3. 曳航体の模型試験

航空機等の開発では、あらかじめ行う理論計算に基いて、まず機体形状が決定される。しかし、設計された機体形状が設計性能を満足すべきものかどうか判定し、あるいは改良すべき点を見出だして、より洗練されたものにするために、模型による機体の流体力学特性試験は不可欠である。流体力学特性試験は、静的流力特性試験と動的流力特性試験に大別される。前者は機体に作用する揚力、抵抗力等の流体力と、機体の迎角、横すべり角等の関係を求めるための試験である。後者は、機体のまわりの流れが時間的に変化する場合に生ずる非定常力についての特性を求めるために行う。これらの試験で得られる

データからあるいは、これらのデータに基づく安定解析、運動シミュレーション等によって、機体の運動性能、安定性などが評価される。

記号

U	: 模型の走行速度
S _w	: 模型の主翼面積
C _w	: 模型の主翼弦長
ρ	: 水槽水の密度
L	: 揚力
Y	: 横力
D	: 抵抗力
M	: ピッチングモーメント (頭下げを正)
N	: ヨウイングモーメント
C _L	: 揚力係数
C _Y	: 横力係数
C _D	: 抵抗係数
C _m	: ピッチングモーメント係数
C _n	: ヨウイングモーメント係数
α	: 迎角
β	: 横すべり角
I _{vx}	: 模型自身のx 軸まわりの慣性モーメント
I _{vy}	: 模型自身のy 軸まわりの慣性モーメント
I _{vz}	: 模型自身のz 軸まわりの慣性モーメント
I _{ex}	: 試験装置のx 軸まわりの慣性モーメント
I _{ey}	: 試験装置のy 軸まわりの慣性モーメント
I _{ez}	: 試験装置のz 軸まわりの慣性モーメント
A ₄₄ ^{air}	: 模型の空中での付加慣性モーメント (x 軸まわり)
A ₅₅ ^{air}	: 模型の空中での付加慣性モーメント (y 軸まわり)
A ₆₆ ^{air}	: 模型の空中での付加慣性モーメント (z 軸まわり)
A ₄₄ ^{water}	: 模型の水中の付加慣性モーメント (x 軸まわり)
A ₅₅ ^{water}	: 模型の水中の付加慣性モーメント (y 軸まわり)
A ₆₆ ^{water}	: 模型の水中の付加慣性モーメント (z 軸まわり)
I _{Tx} ^{air}	: I _{Tx} ^{air} = I _{ex} + I _{vx} + A ₄₄ ^{air}
I _{Ty} ^{air}	: I _{Ty} ^{air} = I _{ey} + I _{vy} + A ₅₅ ^{air}
I _{Tz} ^{air}	: I _{Tz} ^{air} = I _{ez} + I _{vz} + A ₆₆ ^{air}
I _{Tx} ^{water}	: I _{Tx} ^{water} = I _{ex} + I _{vx} + A ₄₄ ^{water}
I _{Ty} ^{water}	: I _{Ty} ^{water} = I _{ey} + I _{vy} + A ₅₅ ^{water}
I _{Tz} ^{water}	: I _{Tz} ^{water} = I _{ez} + I _{vz} + A ₆₆ ^{water}
k _x	: 装置の弾性支持部分のバネ定数 (x 軸ま

わり)

k_y : 装置の弾性支持部分のバネ定数 (y 軸まわり)

k_z : 装置の弾性支持部分のバネ定数 (z 軸まわり)

b : 主翼翼幅

φ : 模型のロール変位角

θ : 模型のピッチ変位角

ψ : 模型のヨウ変位角

$$C_{lp}^2 : C_{lp}^2 = \frac{\partial C_l}{\partial p^2}$$

$$C_{mq}^2 : C_{mq}^2 = \frac{\partial C_m}{\partial q^2}$$

$$C_{nr}^2 : C_{nr}^2 = \frac{\partial C_n}{\partial r^2}$$

M_x : ローリング強制モーメント

M_y : ピッチング強制モーメント

M_z : ヨウイング強制モーメント

· : 時間についての一階微分

·· : 時間についての二階微分

2.1. 静的流力特性試験

実機の2分の1の大きさの曳航体模型を六分力計にとりつけて、水中を走行させ、模型の設定重心 (図1) に作用する流体力と模型の姿勢角の関係、求

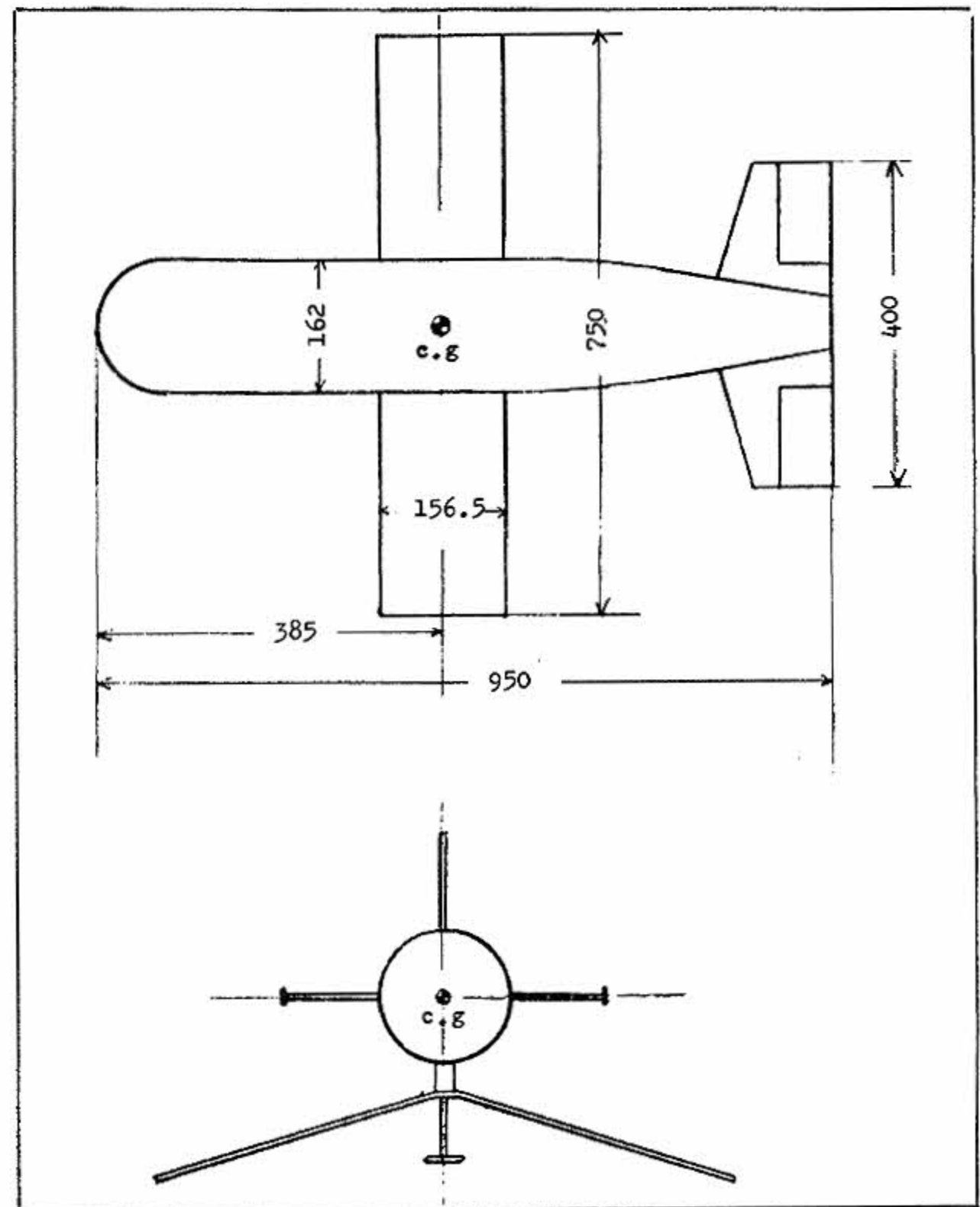


図1 水槽試験用模型

Model used for the test at towing tank.

めた。測定項目は下記の通り。

1. 揚力係数、抵抗係数、縦揺れモーメント係数と機体迎角の関係
2. 上記の量と昇降舵角の関係
3. 横力係数、抵抗係数、偏揺モーメントと機体横すべり角の関係

試験は海洋科学技術センターの波動水槽で行なった。模型は胴体が木製で翼は主翼尾翼とも厚さ5mmのアルミ平板である。胴体形状は頭部が半球形で胴体中央部は円筒形になっており、後部は円錐形に仕上げられている。中央部から後部への曲面の接続には緩和曲線を用いたが、頭部の半球形から中央部の円筒形への接続には緩和曲線を用いていない。このために、接続部で曲率が不連続になっており、胴体面に沿って流れる流体がこの曲率の不連続点ではがれを起こすと考えられる。そこで境界層制御のためのトリップワイヤーについては考慮しなかった。模型は図2に示すように後部からスティングで支持し、六分力計に取り付けた。

測定時の模型の走行速度の選定にあたり、0.5m/secから2m/secまで数種類の速度で模型の抵抗係数を測定し、レイノルズ係数の影響のないことを確認して1.5m/secとした。このときのレイノルズ数は模型の全長を代表長さにとって、約 1.5×10^6 である。これは実機の4kt曳航時の0.4倍程度に相当する。

試験結果

測定データは、揚力、横力、抵抗力については岐点圧力と主翼面積で、また、モーメントについてはこれらとさらに主翼弦長を用いて無次元化した。すなわち、

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_w}$$

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_w}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_w C_w}$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_w C_w}$$

$$C_n = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_w C_w}$$

また、試験が、有限の広さの水槽で行われるための水槽壁と自由表面の影響をのぞくために、得られたデータに水槽壁修正を加えた*。得られた結果を図3～7に示す。

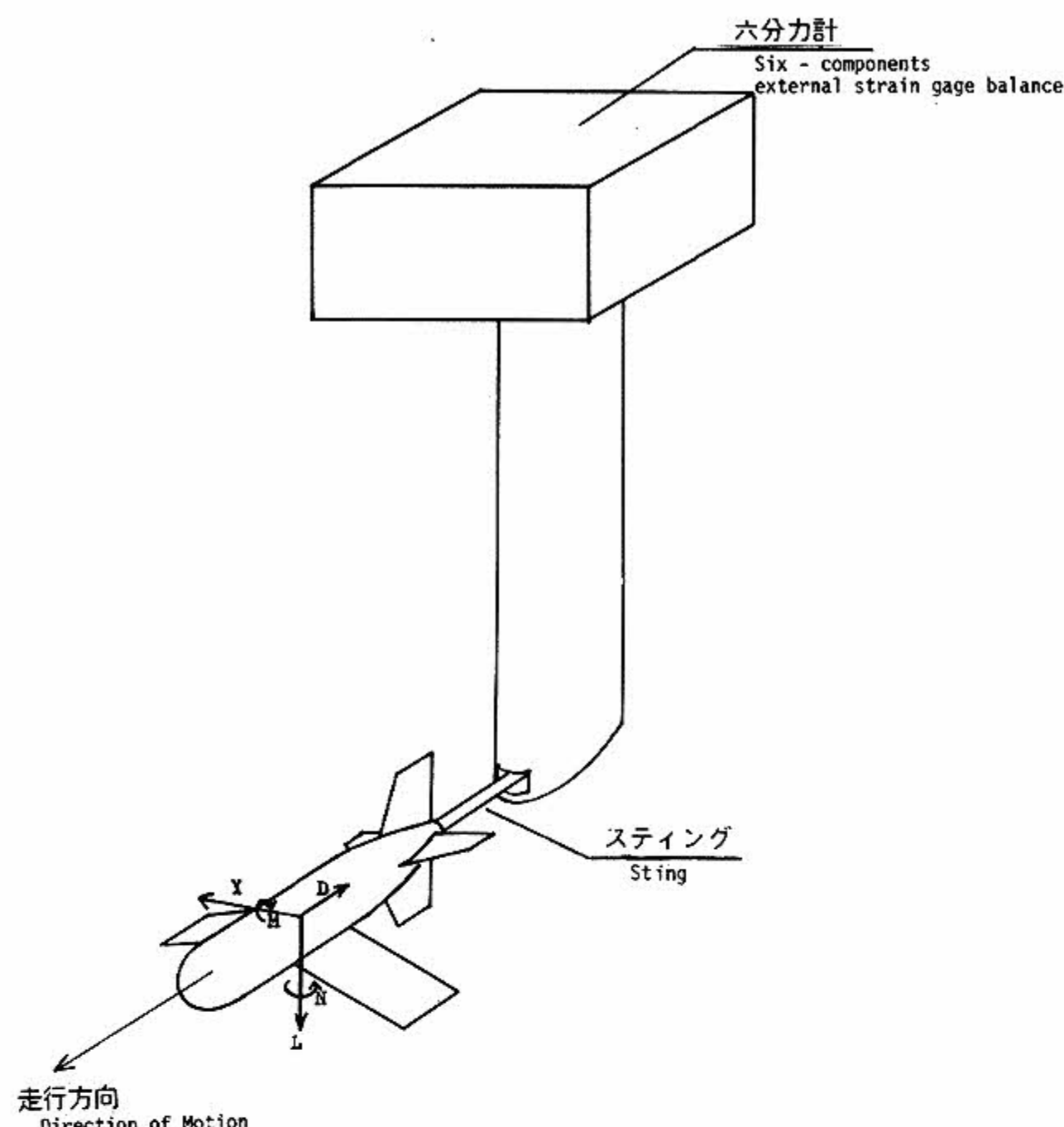


図2 静特性試験装置

Measurement of static derivatives

3.2. 動特性試験

水中など、密度の高い流体中を運動する物体は、自分自身の質量が空気中のそれよりも増したように挙動する。これは付加質量の効果と呼ばれるもので、見かけの質量は、物体の形状、大きさ、運動方向等によって異なった値をとる。例えば、十分に長い円柱が、その長さに垂直な方向に運動する場合には、円柱がおしのけた流体の質量分だけ慣性質量が付加される。この見かけ上増加した質量は付加質量と呼ばれる。同様な現象が回転運動における慣性モーメント等にもあらわれ、付加慣性モーメントと呼ばれる。

曳航体の運動においても、これらの量は無視できない大きさをもつものと考えられる。特に付加慣性モーメントは運動の安定性に直接影響をあたえるので重要である。そこで、本試験では、曳航体の3つの慣性主軸のまわりの付加慣性モーメントを水槽試験によって求めた。

試験方法

曳航体模型を空中と水中で、強制的に回転振動させ、このときに曳航体模型に加えられた強制力のモーメントと、模型の変位角の時間変化を測定し、これらのデータから空中と水中での模型の見かけの慣性モーメントを求めた。そして両者の差をとることによって、曳航体が水中を運動するために生ずる付加慣性モーメントの大きさを推定した。

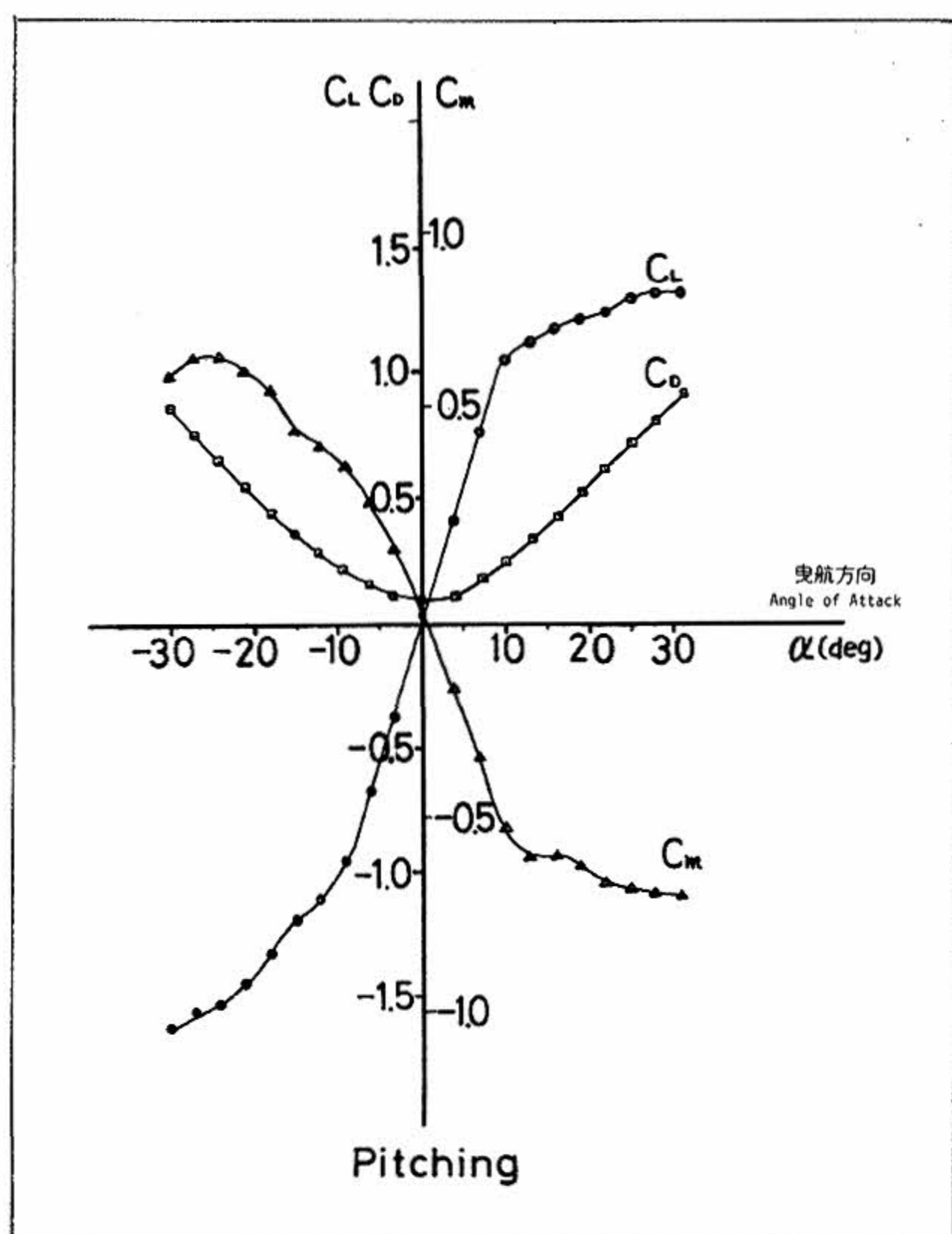


图3 Pitching特性
Lift, drag and pitching moment

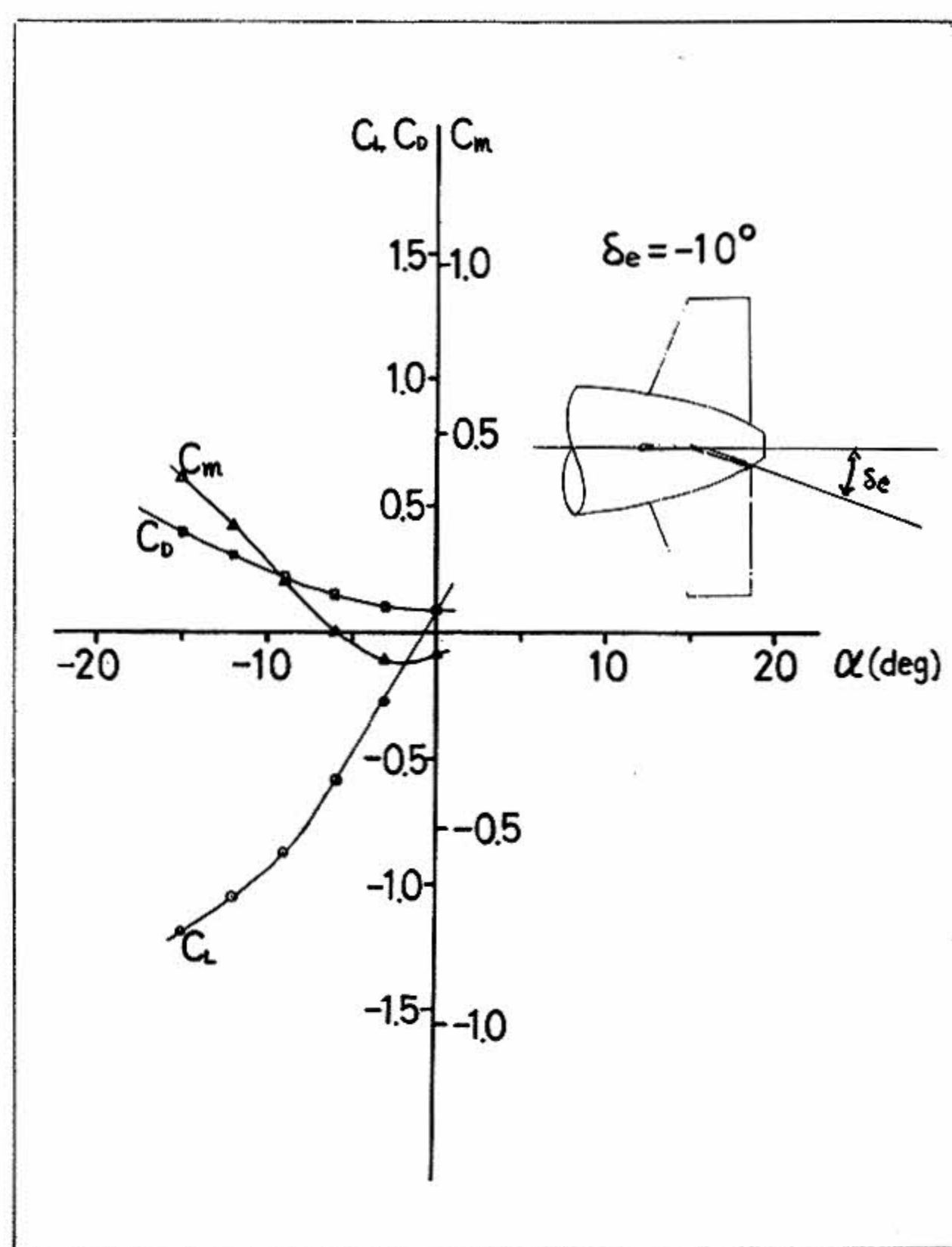


图4 舵角特性 $\delta_e = -10^\circ$
Effect of elevator angle

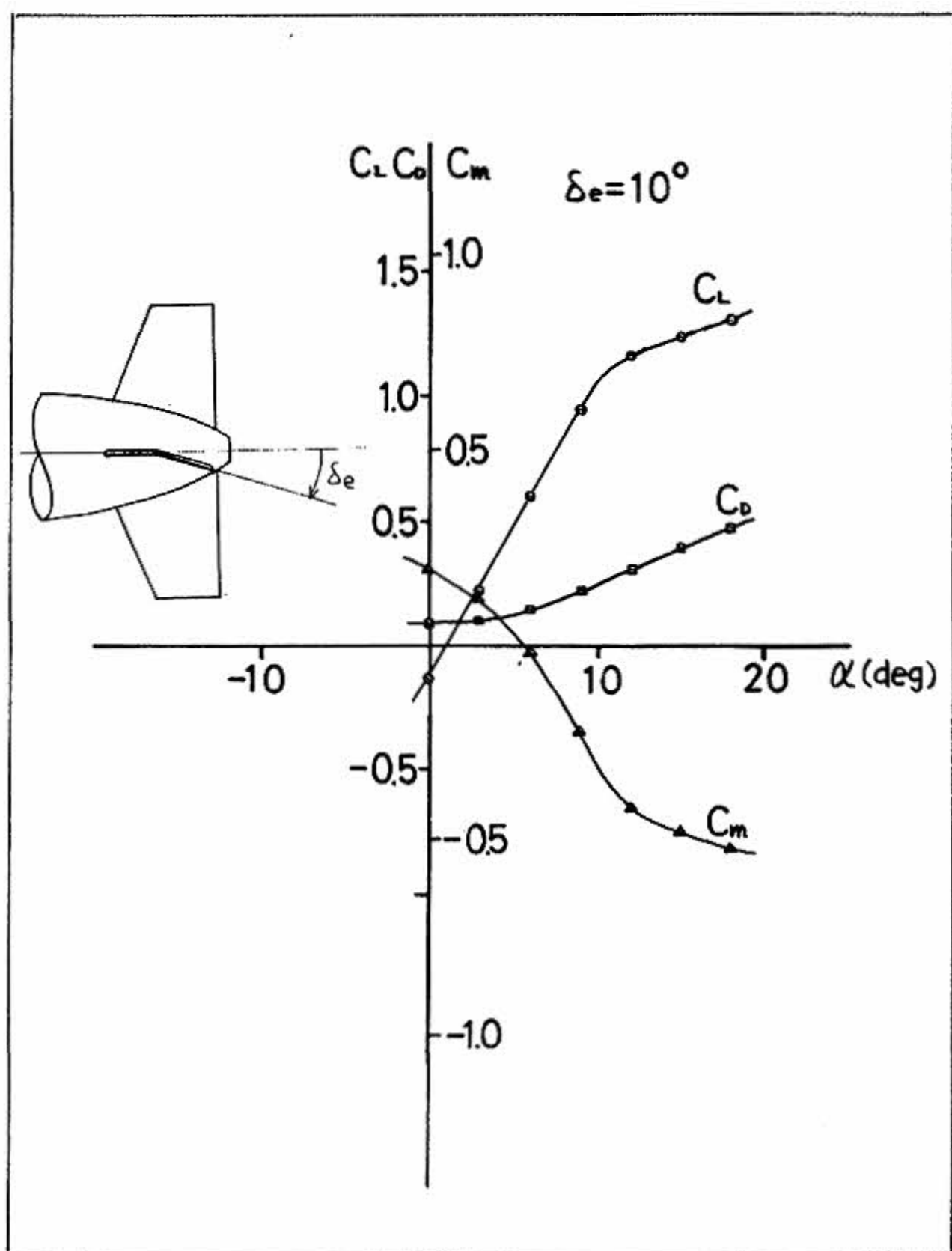


图5 舵角特性 $\delta_e = 5^\circ$
Effect of elevator angle

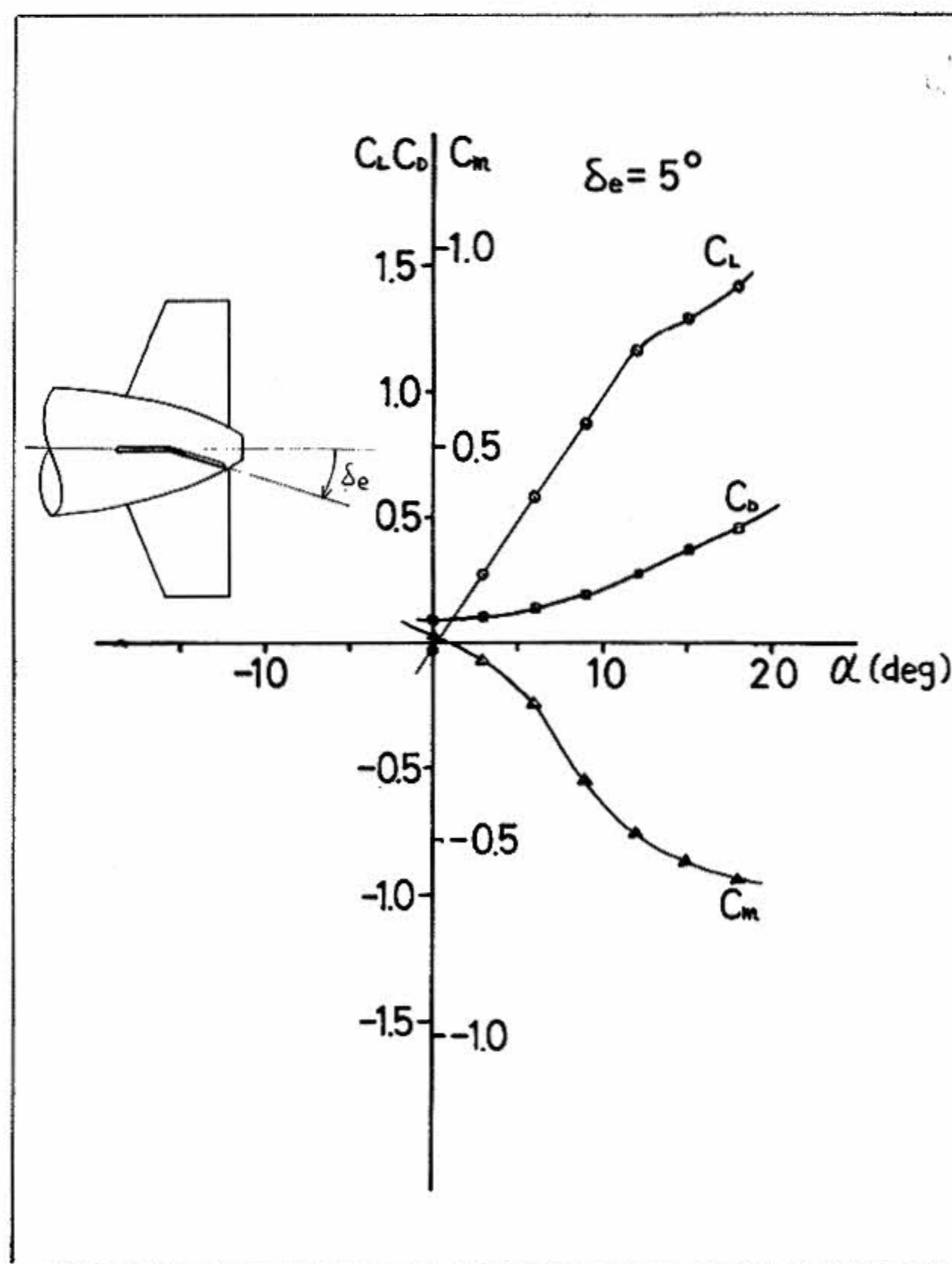


图6 舵角特性 $\delta_e = 10^\circ$
Effect of elevator angle

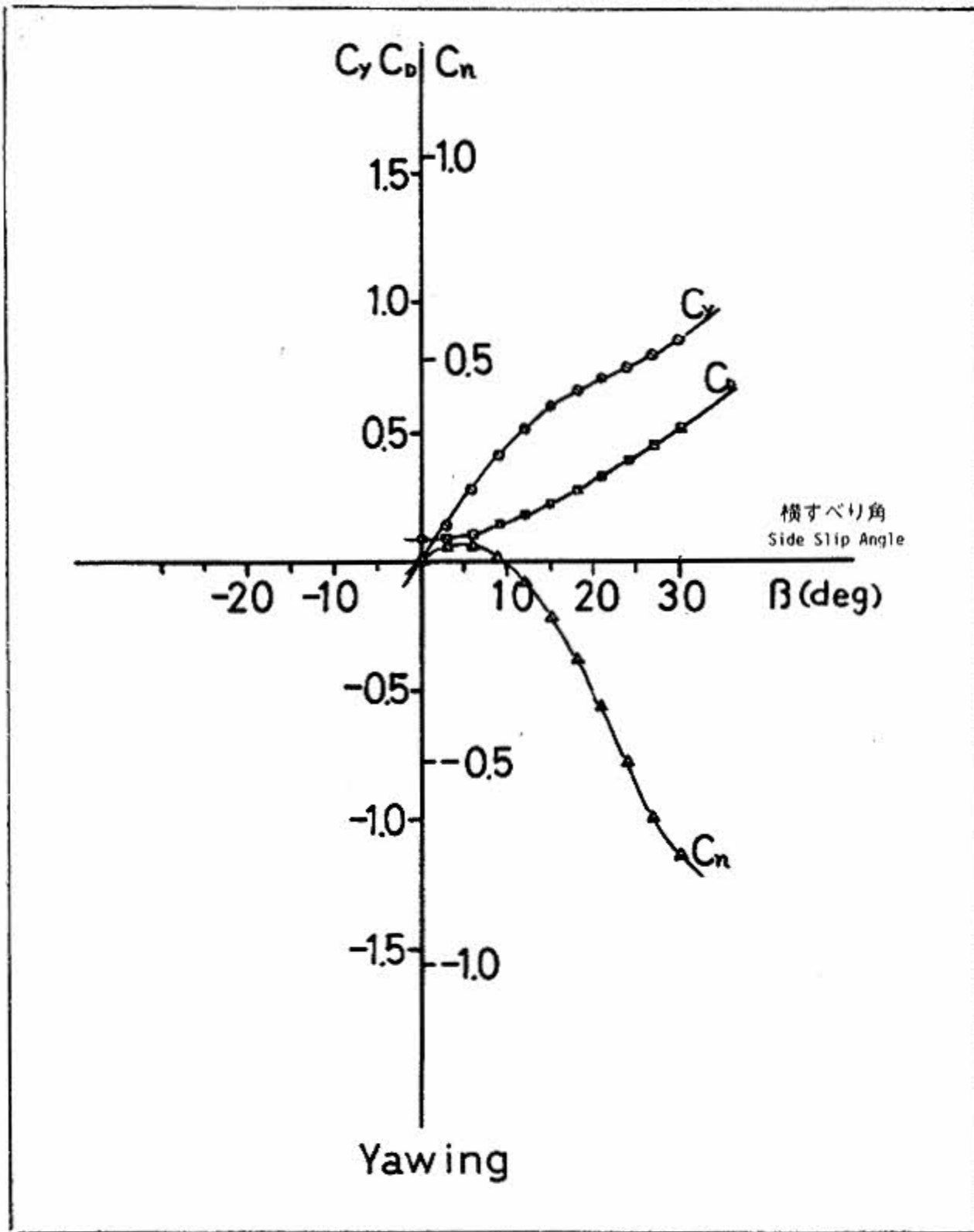


図7 Yawing 特性

Side force, drag and yawing moment at side slip angles.

試験装置

試験装置は、ピッチングとヨウイングにおける付加慣性モーメントを求めるためのものと、ローリングの付加慣性モーメントを求めるためのものに分けられる。ピッチング、ヨウイング用試験装置では、図8のように、手動加振レバーの水平面内の回転振動を、水中に懸下された模型に伝えて、模型に変位角振幅 $\pm 10^\circ$ 程度の回転振動を行わせ、このときの強制外力と模型の変位角をそれぞれ、ふたつのロードセルと、ポテンシオメータで検出する。使用したロードセルは、圧縮引張型のものなので、ふたつのロードセルからの出力信号の差をとって、モーメントの出力信号とする。

ロール試験装置は、模型の回転運動の回転面が鉛直面であることだけがピッチ用の試験装置と異なる。(図8)

データ解析

試験系の運動を記述する運動方程式は、次のようにとった。

(3.1)

$$\text{ロール } I_{Tx}\ddot{\phi} + k_x\dot{\phi} + \frac{1}{2}\rho b^5 C_{lp}^2 \dot{\phi} \left| \dot{\phi} \right| = M_x \quad (1)$$

$$\text{ピッチ } I_{Ty}\ddot{\theta} + k_y\dot{\theta} + \frac{1}{2}\rho b^5 C_{mq}^2 \dot{\theta} \left| \dot{\theta} \right| = M_y \quad (2)$$

$$\text{ヨウ } I_{Tz}\ddot{\psi} + k_z\dot{\psi} + \frac{1}{2}\rho b^5 C_{nr}^2 \dot{\psi} \left| \dot{\psi} \right| = M_z \quad (3)$$

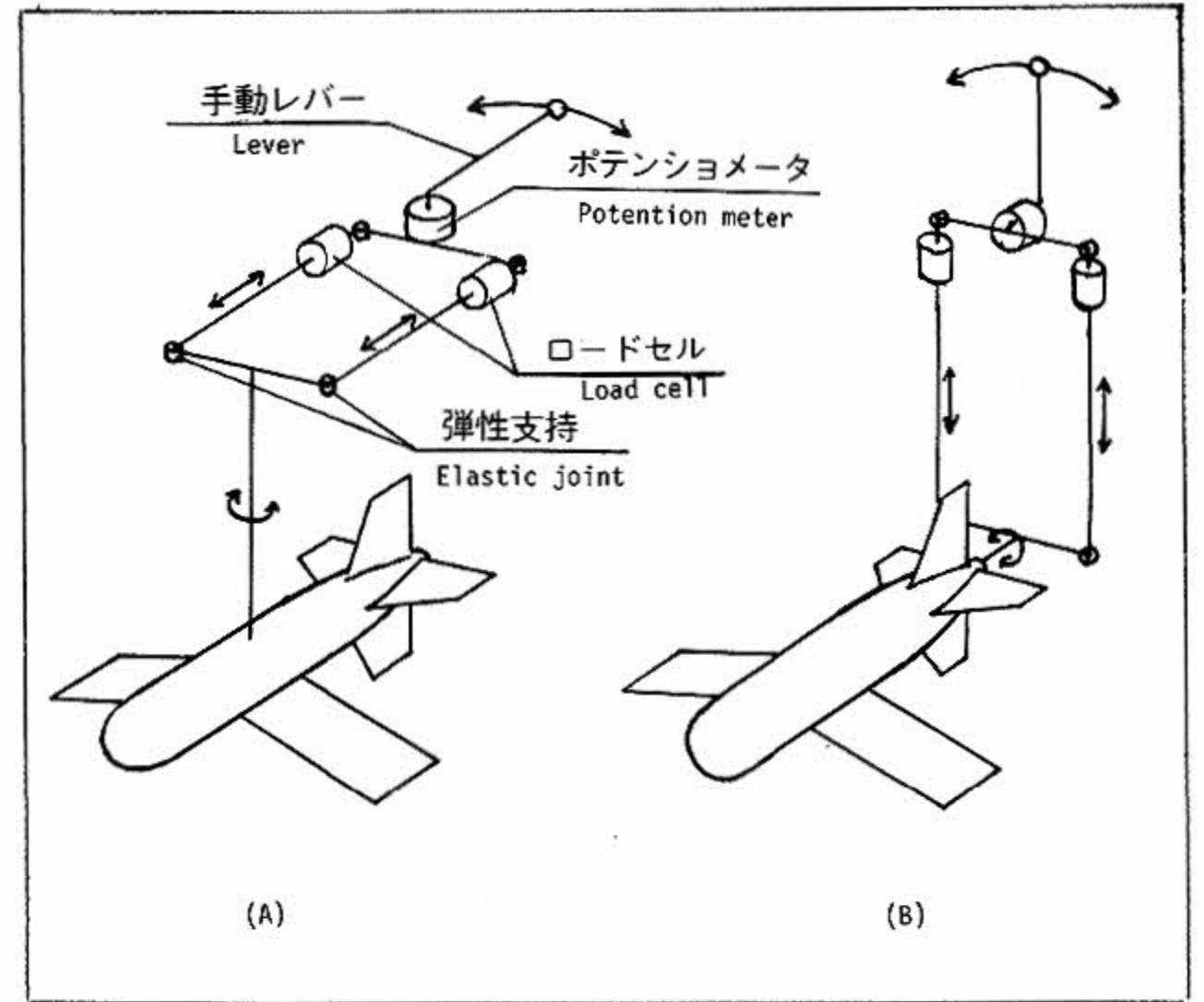


図8 動特性試験装置

Measurement of virtual moment of inertia.

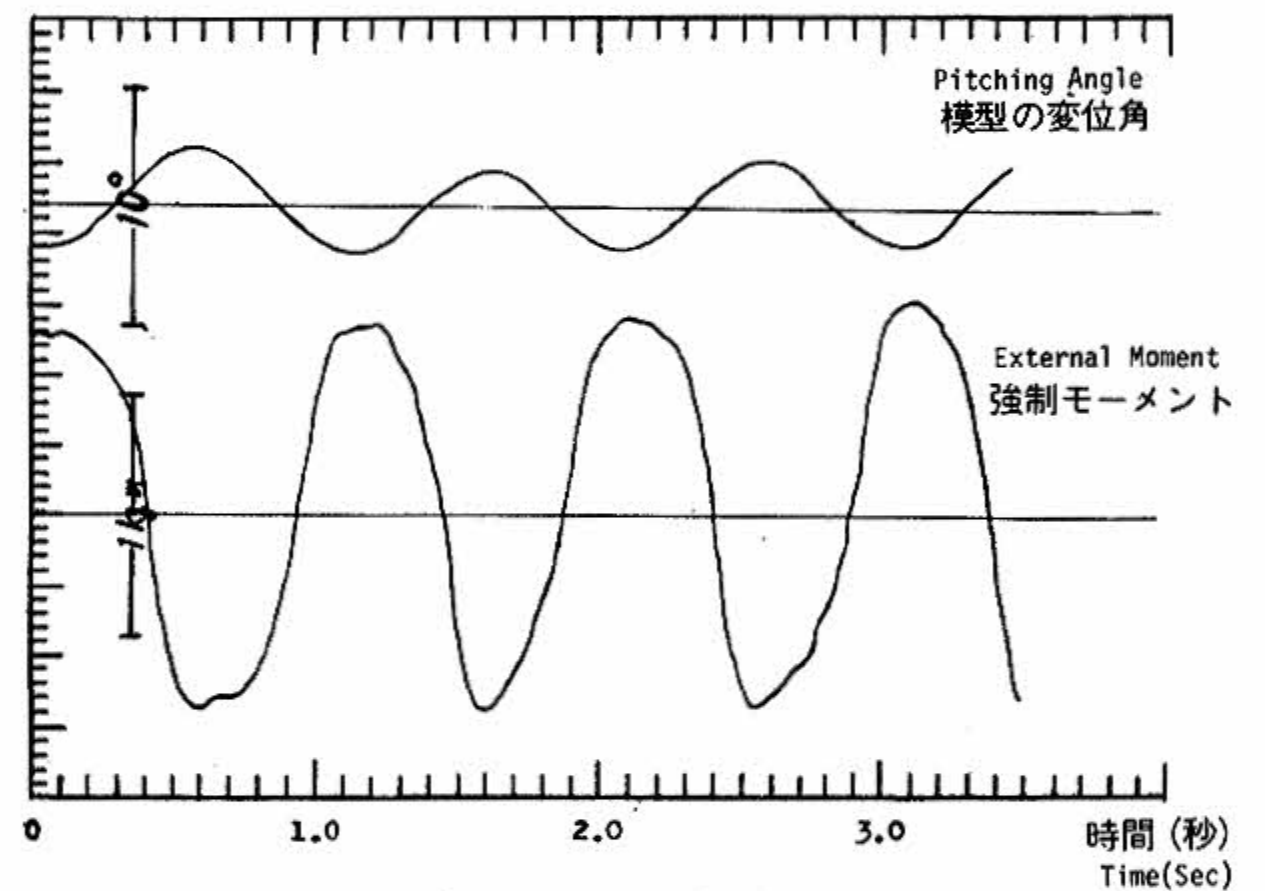


図9 ピッチング実測データ

Experimental data for pitching motion'

測定データは、模型の変位角と、模型に作用する強制外力のモーメントの時間に対する値として得られる(図9)。ピッチングにおける付加慣性モーメントの算出を例にとると、まず、測定データの適当な時刻を初期時刻 t_0 と定める。 t_0 での模型の変位角、角速度をそれぞれ θ_0 、 $\dot{\theta}_0$ とする。 θ は直接測定していないので、 θ の測定値を微分して得るかこれがゼロになる時刻を t_0 に選ぶ。ここでは後者をとった。次に I_{Ty} と C_{mq}^2 を仮定し、初期条件時刻 t_0 で θ_0 、 $\dot{\theta}_0$ のもとに(2)式を t_0 から t_1 まで積分する。

そして得られた変位角 θ の曲線(図10)と、実測データの値が最もよく一致するように、 I_{Ty} と C_{mq}^2 を最小自乗法によって求める。

以上の操作を空中と水中の測定について行なうと、 I_{air} と I_{water} が求まる。空気中の付加慣性モーメントは、水中の付加慣性モーメントの1000分の1程度と考えられるので、これを無視すれば、ピッチング

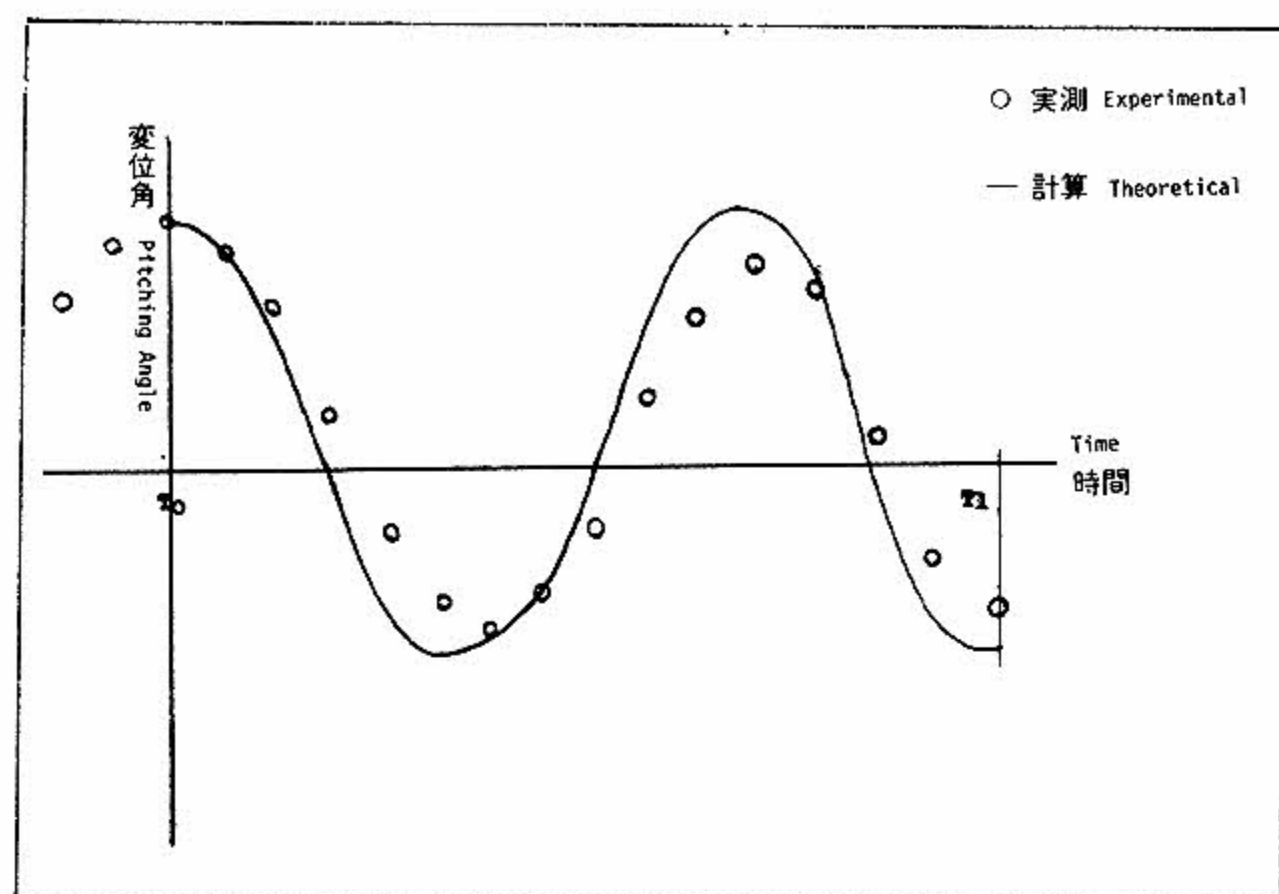


図10 模型の変位角曲線

Pitching angle of the Model

表4 各自由度についての付加慣性モーメント

Added moment of inertia

	ピッチング Pitching	ヨーイング Yawing	ローリング Rolling
理論 Calculated values of virtual moments of inertia	1.71kg-m ²	1.70kg-m ²	1.27kg-m ²
測定 Measured values of virtual moments of inertia	1.81kg-m ²	1.64kg-m ²	1.52kg-m ²
模型自身 Model itself	.26kg-m ²	1.90kg-m ²	0.32kg-m ²
付加慣性モーメント係数 Added moment of inertia coefficient	1.44	0.86	4.75
実機換算 Estimated values for the full scale vehicle	57.92kg-m ²	52.48kg-m ²	48.74kg-m ²

における付加慣性モーメントは、次の式で得られる。

$$A_{55} = I_{water} - I_{air}$$

同様にして求めた各自由度についての付加慣性モーメントを表4に示す。ただし、表4の理論計算では、胴体形状を同じ長さ、太さの回転楕円体で、尾翼は同じ縦横比の矩形平板で近似して、各部分について単独に計算し、これらを設定重点のまわりに合成して全機のを算出した*。

4. 曳航体運動のシミュレーション

本研究で実施したシミュレーションの効用と限界については、シミュレーション一般についてと同様に下記の諸点が指摘される。

- ①対象について理解し得るすべての効果を取り入れて総合的な予測を行うことができる。
- ②実験データが少ない場合には見落すような予期せぬ現象を見出す可能性がある。

- ③シミュレーションの結果により現象の見とおしがつくので能率のよい実験を計画し実行し得る。
- ④計測の困難な物理量（たとえば海中における曳航索の描く曲線）を推定できる。
- ⑤実験（海上実験）におけるごとく思わざる事態に遭遇して時間と費用を失う危険性が少ない。
- ⑥計算に用い得るデータの精度は一般によくはない。
- ⑦複雑な現象を少数の計算式では表現しきれない。
- ⑧長時間の準備と複雑な作業を要し、計算ミスの可能性をゼロにはできない。
- ⑨計算結果には実験データほどの説得力がない。

4.1. 計算実施例

表5に曳航体が海面付近より深度30mまでを周期

表5 曳航体の運動のシミュレーション実施例

Output data of a simulation on an undulating motion of the towed vehicle.

t	δ_E	x	z	u	w	T	α	θ	r
0	-10	0	19.8	2.0	-0.1	3	-1.0	-4	-27
2	-10	4	19.4	1.9	-0.3	2	-1.1	-8	-26
4	-10	8	18.9	1.9	-0.3	1	-1.1	-11	-21
6	-10	11	18.2	1.9	-0.4	1	-1.3	-12	-13
8	-10	15	17.4	1.9	-0.4	1	-1.4	-13	-6
10	-10	19	16.5	2.0	-0.5	1	-1.6	-15	2
12	-10	23	15.6	2.1	-0.5	1	-1.6	-15	11
14	-10	27	14.5	2.2	-0.6	2	-1.8	-16	22
16	010	32	13.3	2.3	-0.6	3	-2.0	-17	34
18	-10	37	12.0	2.3	-0.7	3	-2.2	-18	47
20	-10	41	10.6	2.3	-0.7	3	-2.2	-19	58
22	-10	46	9.2	2.3	-0.7	3	-2.2	-20	68
24	-10	50	7.7	2.2	-0.7	3	-2.2	-20	75
26	-10	54	6.4	2.1	-0.7	4	-2.2	-20	79
28	-10	59	5.1	2.1	-0.6	5	-2.2	-19	81
30	-10	63	3.9	2.0	-0.6	6	-2.2	-18	81
32	8	67	3.0	1.9	-0.1	5	-1.0	-4	80
34	8	70	3.3	1.3	0.3	4	1.3	12	72
36	8	72	3.8	1.1	0.3	7	2.0	16	48
38	8	75	4.6	1.5	0.6	10	0.9	22	29
40	8	78	6.1	1.7	0.9	14	0.6	29	12
42	4	81	8.4	2.0	1.5	25	0.3	37	-4
44	4	86	12.4	2.7	2.7	93	1.2	45	-23
46	4	92	18.6	3.2	3.1	227	4.3	49	-37
48	4	98	24.0	3.1	2.2	170	4.6	41	-45
50	4	105	27.8	3.0	1.7	128	4.5	34	-52
52	-10	111	30.5	3.0	0.8	42	0.2	15	-61
54	-10	116	31.1	2.4	0.0	13	-0.7	-2	-77
56	-10	121	30.6	2.2	-0.4	7	-0.9	-10	-87
58	-10	125	29.7	2.1	-0.5	4	-1.2	-15	-95
60	-10	129	28.6	2.0	-0.6	2	-1.4	-18	-105
62	-10	133	27.3	2.0	-0.7	1	-1.6	-19	-113
64	-6	138	26.0	2.1	-0.6	0	-1.5	-16	-122
66	-6	141	25.1	2.0	-0.4	0	-1.2	-12	-127
68	-6	145	24.5	1.8	-0.2	0	-0.8	-8	-127
70	-6	149	24.1	1.6	-0.2	0	-0.2	-6	-122
72	-6	152	23.9	1.4	-0.1	0	0.6	-5	-113
74	-6	154	23.6	1.3	-0.1	1	1.5	-4	-100
76	-6	157	23.4	1.2	-0.1	2	2.3	-4	-84
78	-6	159	23.1	1.4	-0.2	5	2.0	-4	-66
80	-6	163	22.8	1.9	-0.1	7	0.0	-4	-55
82	-6	167	22.5	2.0	-0.1	5	-0.6	-4	-56
84	-10	171	22.2	2.0	-0.2	3	-0.9	-7	-58
86	-10	174	21.7	1.9	-0.3	2	-1.1	-11	-61
88	-10	178	21.0	1.9	-0.4	1	-1.2	-13	-62
90	-10	182	20.1	1.9	-0.4	1	-1.3	-14	-63

的90秒で昇降する場合のシミュレーション実施例を示す。表における記号の意味は下記のとおりである。

t : 現象の経過時間 (sec)

δ_E : 昇降舵角 ($^{\circ}$)

x : 水平移動距離 (m)

z : 深度 (m)

u : 水平速度 (m / sec)

w : 鉛直速度 (m / sec)

T : 索張力 (kg)

α : 迎角 ($^{\circ}$)

θ : 曳航体の姿勢角 ($^{\circ}$)

γ : 曳航体に対する索の方位角 ($^{\circ}$)

ここで、 z , w , α , θ , γ は下向きを正とする。

計算に用いた曳航体諸元等は表1, 2, 3に示してある。一方、曳航索の直径は8mm、空中重量は0.20kg/m、 $C_D=1.0$, $C_F=0.02$ とした。索長は60mであり、これを長さ5mの要素12個に分割し、1.2節で説明した方法により運動を決定した。

シミュレーションの1ステップに対応する現象時間差は、索に関する計算が発散せぬよう0.015~0.05秒の範囲で経験的に選定した。

表5に示す計算実施例についてはいくつかの注目すべき点を指摘することができる。第1に曳航体の下降中に深度20m付近で短時間(数秒間)だけ索張力、下降速度、姿勢角などが著しく大きくなる時期があることである。第2に曳航体が上昇に転じて深度が30mより約15mになるまでの間、索の張力が著しく減少することである。この時期に昇降舵角の値が不適当であると、索の上昇速度より曳航体の上昇

速度が大きくなり、曳航体が索を引っかけるおそれがある。第3に、曳航体が海面付近にあるとき、曳航索の方向は曳航体の下へ向って約 80° に達する。これらの状況はシミュレーションによりはじめて定量的に把握され、曳航体の設計および制御方法につき重要な情報を提供した。

参 照 文 献

- 1) Burroughs, J. D., Benz, R. C., "Computer support in the Design and Testing of Undersea Towed Systems", Mar. Technol. Soc. J. 10(4), P. 159-172, 1974,
- 2) Eames, M. C. "Steady-State Theory of Towing Cables" Quarterly Transaction RINA, 110(2), P. 185-206, 1968,
- 3) Lamb, H. "Hydrodynamics" 6th ed. Cambridge University Press, 1932, 738p.
- 4) Perkins, C. D., Hage, R. E. "Airplane performance, Stability and Control" John Wiley & Sons, 1959, 493P.
- 5) Pope, A., Harper, J. J., "Low-speed Wind Tunnel Testing" John Wiley & Sons, 1966, 457P.
- 6) Schram, J. W., Reyle, S. P. "A Three-Dimensional Dynamic Analysis of a Towed System" J. Hydronautics. 2(4), p. 214-220, 1968,
- 7) Streeter, V. L. ed. "Handbook of Fluid Dynamics" 1st ed. McGraw-Hill, 1961, sec 1-27 (1241P.)