

3. 自由落下—浮上式カメラシステムの開発のための模型実験

中 埜 岩 男,^{*1} 野 本 昌 夫,^{*2} 服 部 陸 男,^{*3}
名 執 薫,^{*3}

自由落下—浮上式カメラシステム単体および封入容器と結合したカメラシステムの模型による流力特性試験を行い、得られたデータの解析を行った結果、カメラシステムにフェアリングをつける利点は小さく、オープンフレームのカメラシステムに姿勢安定板を取付けるだけで十分であることが分った。次にこのカメラシステム—封入容器の $1/2$ のフルード模型を製作し、水中落下時および着底時の挙動試験を行い、カメラシステムの行き足、回転および動揺を検討した結果、最適ケーブル長の範囲が得られた。

Scale Model Experiments for the Design of Free Fall Deep Sea Camera Systems

Iwao Nakano,^{*4} Masao Nomoto,^{*5} Mutsuo Hattori,^{*6}
Kaoru Natori,^{*6}

Scale model experiments of the faired camera system, of the unfaired camera system and of the unfaired camera system with a waste package (210 ℓ drum type) are carried out to obtain hydrodynamical data. On the analysis of these data, we found that the faired camera system is not much better than the unfaired. Therefore, we decide to adopt the unfaired camera system with a flat tail as our free-fall deep-sea camera system. Next, we observed the $1/23$ scale Froude model of the unfaired camera system with the waste package falling and landing in the water tank. After we examined the overshooting, rotation and rolling of the model, we found the optimum range of the cable length between the camera system and the waste package.

1. ま え が き

この研究は、固化体落下時健全性確認試験に使用する自由落下—自動浮上方式によるカメラシステムを開発するため、必要なカメラシステムの海中落下、浮上時の流力特性の測定および水槽落下試験を行い、カメラシステムの設計の基礎資料を得ることを目的として始めた。

2. 海中落下、浮上時の流力特性の測定

2.1. 実験概要

本カメラシステムは、2個の球を連ねた形状をもっているため、水中を運動する際に周囲の水から受ける力（流力）は、このシステムの運動方向

に対する姿勢角に強く依存すると共に、その姿勢角に対して非線型である。このため、既存の理論によって流力特性、特に姿勢角依存性を計算することは、きわめて困難である。そこで、本システムの開発にあたり、その流力特性のうち、静的な特性については曳航水槽による3分力測定試験を実施した。

模型の大きさは、実物の $3/10$ とし、フェアリング（流線型カバー）付きと、フェアリングなしのもの、各1種類および封入容器模型を製作した。

測定項目は、以下の通りである。

(1)フェアリングなしのカメラシステム

- (a) 迎角特性
- (b) 横流れ角特性

^{*1} 潜水技術部

^{*4} Manned Undersea Technology & Engineering Department

^{*2} 海洋保全技術部

^{*5} Marine Conservation Technology Department

^{*3} 海洋利用技術部

^{*6} Marine Utilization Technology Department

(2)フェアリングつきカメラシステム

- (a) 迎角特性
- (b) 横流れ角特性

(3)フェアリングなしのカメラシステムと封入容器模型との組合せ

- (a) 迎角特性
- (b) 横流れ角特性

2.2. 実験装置

(1)水槽

幅 4 m, 深さ 2 m, 長さ 40 m の曳航水槽で, 計測台車の走行速度は最大 2 m/s である。

(2)3分力検出器

垂直な2分力と, これらの力に垂直な軸の回りのモーメントを検出できるストレインゲジタイプの3分力検出器を用いた。また水中で使用するため, 防水加工を施した。

2.3. 供試模型

カメラシステムの模型として, 黄銅製のフレームにガラス球と切り離し装置を固定した模型 (写真1参照), フェアリングを施した模型 (写真2参照) および封入容器模型 (写真3参照) の計3種類を製作した。大きさは, すべて実物の $\frac{1}{30}$ としたが, 比重は特に考慮しなかった。

模型は迎角特性と横流れ角特性のおおの測定について異なる姿勢で支持されるが, いずれの場合も, 3分力検出器から鉛直に突出したストラットに取付けた。

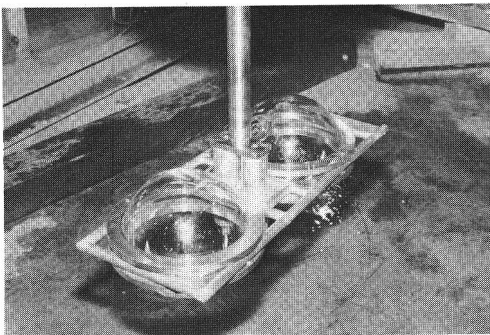


写真1 フェアリングなしカメラシステム模型

The model of the unfaired camera system

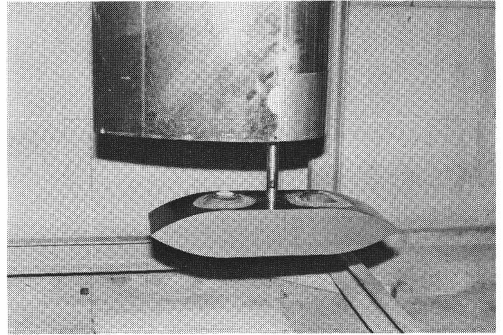


写真2 フェアリングつきカメラシステム模型

The model of the faired camera system

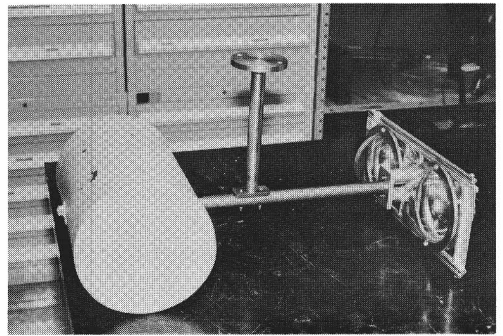


写真3 封入容器つきカメラシステム模型

The model of the unfaired camera system with the waste package

2.4. 測定結果

各ケースにおける迎角 α , 横流れ角 β , 各力およびモーメントの方向を, 図1のように定義する。

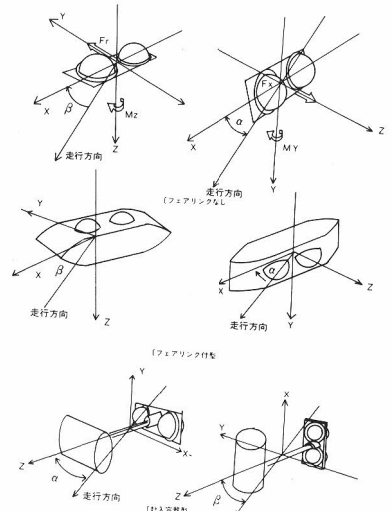


図1 各種カメラシステム模型における迎角, 横流れ角 β , 力及びモーメントの方向
Co-ordinates for each camera systems

測定結果を無次元化するため用いた量は、次の通りである。

- 長さ：ガラス球中心間距離 (L)
- 密度：水槽水密度 (ρ)
- 速度：台車走行速度 (u)
- 面積：ガラス球の直径を含む断面の面積 (S)

無次元化式は、

$$C_i = F_i / \frac{1}{2} \rho L^2 S \quad (i = X, Y, Z) \quad (1)$$

$$C_{M_i} = M_i / \frac{1}{2} \rho U^2 S L \quad (i = X, Y, Z) \quad (2)$$

ただし、 F_i および M_i ($i = X, y Z$) は、 i 方向に作用する流体力である。

本測定における台車走行速度は約 1.2 m/s であり、模型のガラス球直径を代表長さにとった場合のレイノルズ数は 1.3×10^5 程度である。

図2はフェアリングなしのカメラシステム模型の迎角特性を示す。

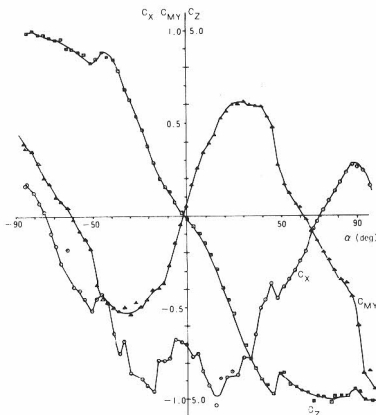


図2 フェアリングなしカメラシステム模型の迎角特性
Variations of the coefficients to the attack angle for the unfaired model.

流体力およびモーメントともに迎角 α に対して強い非線型性を示しているが、特に注目すべきことは迎角が $\pm 20^\circ$ を境に C_x が不連続的に変化することである。この変化は、後方のガラス球が前方のガラス球の影に入り、流体力を減少させるような効果が、臨海現象として現われることを示していると考えられる。

また、 $(dC_M / d\alpha) < 0$ で、 $C_M = 0$ の点が姿勢角の釣合い条件になる。この場合 $\pm 60^\circ$ 付近が釣合角となっている。この模型のような形状では、前後対称であれば、 $\alpha = \pm 90^\circ$ が釣合い迎角になることが予想される。しかし、この場合 $\pm 60^\circ$ となっているのは後端に付けられている平板の影響と思われる。

このカメラシステムの浮力を 9 kg とすると、カメラシステムを水平の姿勢で浮上させる場合の浮上速度は 0.6 m/s 、垂直の姿勢 ($\alpha = 0^\circ$) の場合の浮上速度は 1.6 m/s であることが計算される。したがって浮上速度を大きくするためには、カメラシステムが垂直の姿勢を保って浮上するように設計すべきである。

図3はフェアリングなしのカメラシステム模型の横流れ角特性である。

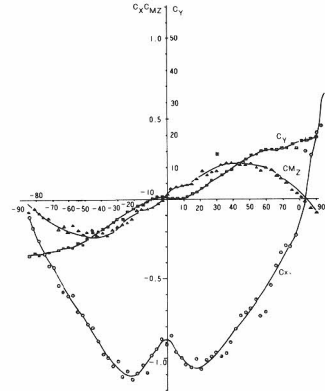


図3 フェアリングなしカメラシステム模型の横流れ角特性
Variations of the coefficients to the slip angle for the unfaired model.

横力係数 C_Y および揺動モーメント係数 CM_Z は、迎角特性における C_Z および CM_Y に比較してかなり小さく、横流れ特性は迎角特性よりも角度依存性がゆるやかであると言える。ただし、 C_x は迎角と同様に $\beta = 0^\circ$ 付近で減少がみられる。

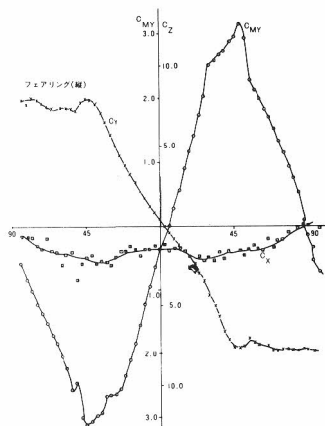


図4 フェアリングつきカメラシステム模型の迎角特性
Variations of the coefficients to the attack angle for the faired model.

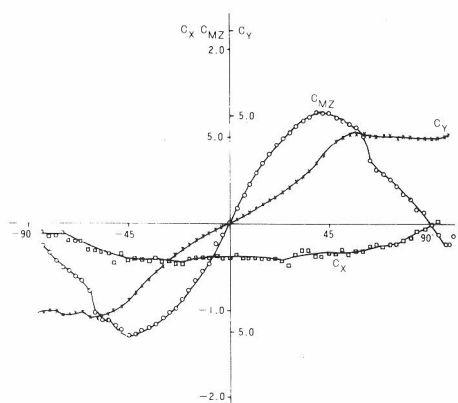


図5 フェアリング付きカメラシステム模型の横流れ角特性
Variations of the coefficient to the slip angle for the faired model.

図4および図5はフェアリング付きのカメラシステム模型の迎角特性と横流れ特性を示す。

フェアリングなしの場合の両特性と比較すると、流体力学的に洗練された分だけ非線型性、特に迎角および横流れ角が 0° 付近の諸量の非線型性が小さくなっている。またカメラシステムを縦の姿勢で浮上させる場合の抵抗係数 C_x をフェアリングの有無で比較すると、ある場合がない場合の約 $\frac{1}{2}$ になっている。

このことから、フェアリングを施こすと、浮上速度が約1.4倍になっていることが分かる。

図6および図7は封入容器模型付きのカメラシステムの迎角および横流れ角特性を示す。

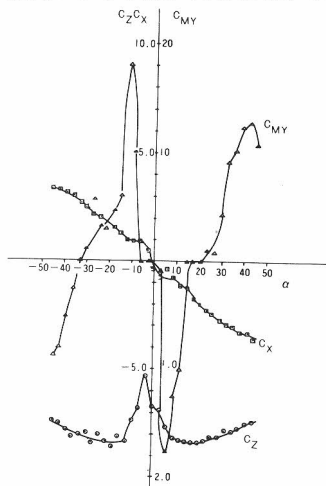


図6 封入容器付きカメラシステム模型の迎角特性

Variations of the coefficients to the attack angle for the model of the camera system with the waste package.

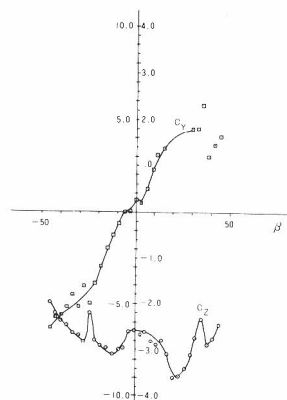


図7 封入容器付きカメラシステム模型の横流れ角特性

Variations of the coefficients to the slip angle for the model of the camera system with the waste package.

本試験では、機構上カメラシステムと封入容器模型を柔軟なワイヤ等で繋いで力を測定することが困難なため、両模型の間は金属棒で結合した。したがって、金属棒の影響を無視できない迎角または横流れ角の大きいところのデータは、参考程度に考えるべきであろう。

また本試験でのモーメント計測点は、封入容器模型とカメラシステム模型を繋ぐ金属棒上の封入容器模型の中心から178mmの点とした。その結果、最も重要なのは α および $\beta = 0$ における抵抗係数 C_z の値で、これによってカメラシステムに封入容器を付けた場合の落下速度が推定できる。封入容器の水中重量を178kg、 $C_z = 8.0$ とした場合の落下速度は2.09m/sとなる。

2.5. カメラシステムを縦姿勢で浮上させるに要する安定板

カメラシステムの浮上速度を大きくするためには、システムを縦姿勢で浮上させる必要がある。尾翼で実現させるための静的釣合いの条件を計算すると、図8のようになる。ただし、尾翼の幅 b はフレームの幅と同一として計算した。

また、図に使用した記号は

L : ガラス球中心間距離, l_t : カメラシステム中心から尾翼流力中心までの距離, C : 尾翼弦長, b : 尾翼幅 ($= 0.9L$) である。

2.6. 代表的な抵抗係数

これまでの実験で得られた代表的な抵抗係数は表1の通りである。

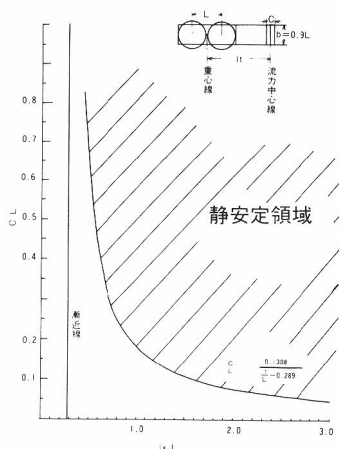


図8 カメラシステムの縦安定の条件

Vertical stable condition for the unfaired camera system with a flat tail.

表1 各種カメラシステムの代表的な抵抗係数

Typical drag coefficients for there systems

抵抗係数			
Cx	0.7	0.37	
Cz	5.0	7.7	6.5~8.5 ^{**}

* *) $\pm 20^\circ$ の範囲内で上記の値の間を変化する。

* *) Cz varies among the above values while changes from -20° to $+20^\circ$

3. 封入容器付きカメラシステムの水槽落下試験

3.1. 試験概要

カメラシステムが海中を落下する際の動的な挙動を推定するには、静的流力特性試験の結果をもとに運動計算するか、力学的相似模型による水中運動試験を実施するか二通りが考えられる。

しかし、今回のような封入容器とカメラシステムがフレキシブルなケーブル等で結合された状態で落下するような場合には、精度の良い計算を行うことは困難と考えられるので後者を採用した。

この力学的相似模型による試験は、封入容器を吊り下げたカメラシステムの水中落下時についてのみ実施した。

3.2. 試験装置

(1)水槽

幅 500mm×奥行 500mm×高さ 2000mm

の亚克力製の水槽

(2)ストロボスコープ

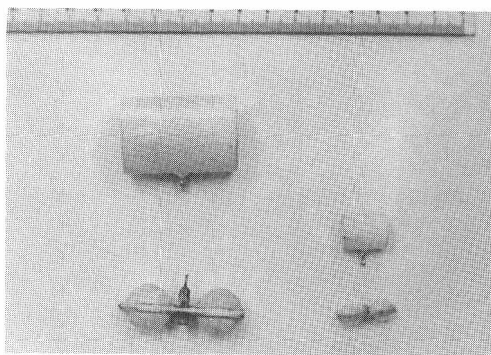
菅原研究所製 PS-240型

(3)カメラ

ポラロイドカメラ

3.3. 供試模型

模型は静特性試験に基づく、実物の海中落下時とフルード数を一致させるため、重量調整を行いながら製作した(写真4参照)。模型の縮尺は実物の $\frac{1}{50}$ である。封入容器は空中重量 433kg, 水中重量 178kgとして模型を製作した。



左が落下試験に使用した $\frac{1}{50}$ 模型

Left: $\frac{1}{50}$ scale model use in the experiment

右が参考に製作した $\frac{1}{50}$ 模型

Right: $\frac{1}{50}$ scale model made for reference

写真4 落下試験用模型

Froude models for fsee fall experiments

3.4. 試験方法

暗くした実験室で、ポラロイドカメラのシャッターを開放にし、一定の間隔で、ストロボスコープを発光させながら模型の落下挙動を撮影する。

3.5. 結果と考察

3.5.1. 定常落下中の挙動

写真5は封入容器とカメラシステムを繋ぐケーブルを実物換算で1mに相当する場合の落下状態を示す。

ストロボスコープの発光回数は 300rpmである。このときの落下速度は0.42 m/sで、実物では2.01 m/sに相当し、静的特性試験から計算した実物の落下速度2.09m/sと良い一致を示す。

また、写真5で分かるように、封入容器模型は水平方向に対して最大 20° 程度振れながら落下し、カメラシステムも同様な振れを示している。

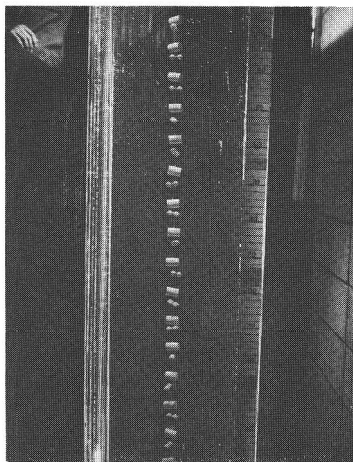


写真 5 模型の落下状況

(ケーブル長 1 m, ストロボ 300rpm)

Picture 5 the movement of the model in the free-fall experiment (Equivalent cable length is 1 m, Lighting of stroboscope is 300 rpm)

この封入容器模型の振動の周期は約 0.4 s で、ストロハル数 $St = nu / D$ (封入容器模型の直径 D , 落下速度 u , 渦の発生周波数 n) から計算される渦の発生周期 0.015 s とは明らかに異なる。

したがって封入容器模型の揺れは、後流渦の発生にロックインしていないので、力学的相似則によって実物について換算でき、2.2 s 程度になるものと思われる。

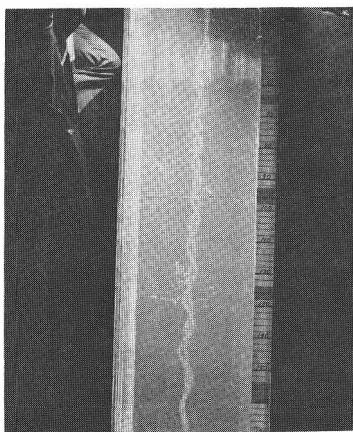


写真 6 カメラシステム模型の落下中の回転運動

(ケーブル長 2 m, ストロボ 2400rpm)

Rotation of the model in a free-fall experiment (Equivalent cable length is 2 m, Lighting of the stroboscope is 2400 rpm)

写真 6 は封入容器とカメラシステムを結ぶ線を実物換算で 2 m にした場合の落下状態を示す。

ここでは、カメラシステムの運動を見やすくするため、封入容器模型は黒くしてある。この写真から明らかなように、カメラシステムは竹とんぼの羽のように回転している。これは封入容器模型の揺れ等による後流の周期的変動にカメラシステムの運動が同期したためと思われる。

カメラシステムのこのような回転運動を抑えるため、図 9 のような支柱をつけて落下させたものが写真 7 である。

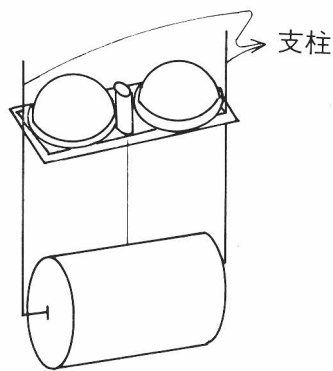


図 9 カメラシステム模型の回転防止用支柱

Poles preventing the rotation of the camera system model.

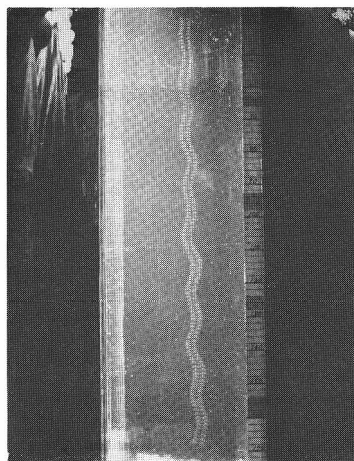


写真 7 回転防止用支柱を取付けたカメラシステム模型の落下状況

(ケーブル長 2 m, ストロボ 2400rpm)

Movement of the model with a couple of poles preventing its rotation in a free-fall experiment (Equivalent cable length is 2 m, Lighting of the stroboscope is 2400 rpm)

この場合、支柱によってカメラシステムの回転運動は押えられるが、封入容器の運動の影響を直接に受ける結果となり、カメラシステムの左右への揺れは大きくなっている。

3.5.2. 着底時の行き足

着底する際のカメラシステムの行き足を観察するため、水槽の中程度の深さのところに木製の底を置いて実験した。

写真8はケーブル長が実物換算1mの場合の着底状況を示す。

封入容器模型の着底後、カメラシステムが相当大きく振れ、封入容器模型にかなり近づいているのが分かる。同じ条件で数10回落下させたが、カメラシステムが封入容器模型に接触することはなかった。

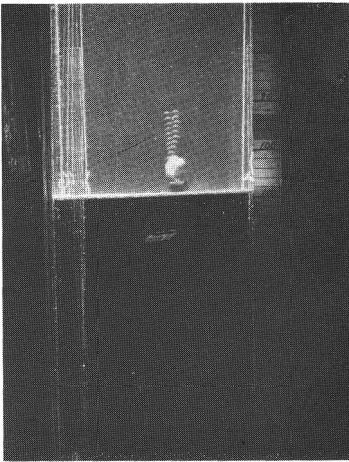


写真8 模型の着底状況

(ケーブル長1m, ストロボ2400rpm)

Landing of the model over the bottom (Equivalent cable length is 1m, Lighting of stroboscope is 2400 rpm)

写真9はケーブル長を実物換算0.5mにした場合の着底状況を示す。

ここではカメラシステムが封入容器模型に接触する高さまで降りている。この条件でも10数回試験した結果、何度か、カメラシステムが封入容器模型に接触した。

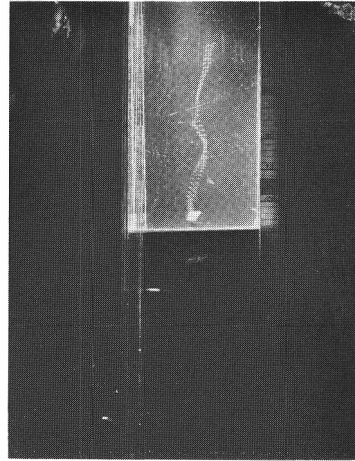


写真9 模型の着底状況

(ケーブル長0.5m, ストロボ2400rpm)

Landing of the model over the bottom (Equivalent cable length is 0.5m, Lighting of the stroboscope is 2400 rpm)

写真10はケーブル長を実物換算で2mにした場合の着底状況を示す。写真6に見られたような回転運動が見られる。この場合はケーブルが長いので、着底時にも封入容器模型に近づかないが、ケーブルの振り戻しを付けていないため、落下中のカメラシステムの回転で生じたケーブルの振りが着底後に戻るため、カメラシステムが落下時と逆の方向に回転する。

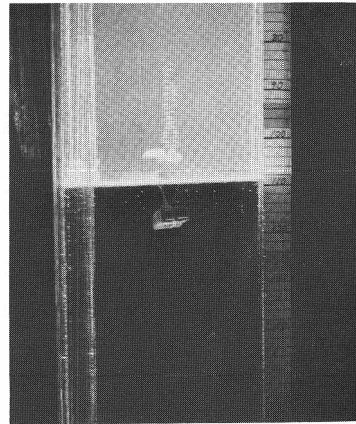


写真10 模型の着底状況

(ケーブル長2m, ストロボ2400rpm)

Landing of the model over the bottom (Equivalent cable length is 2m, Lighting of the stroboscope is 2400 rpm)

写真11はケーブル長が実物換算1mのカメラシステムに支柱をつけた場合の着底状況を示す。

支柱による拘束のため、横に逃げないので、支柱なしに比べ、行き足はずっと小さくなっている。

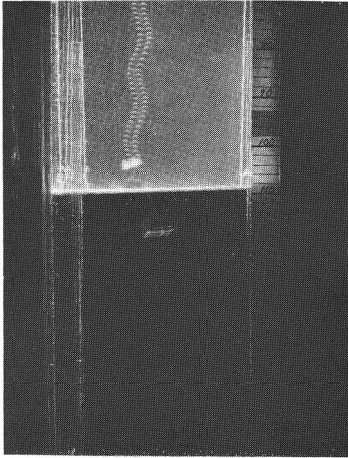


写真11 回転防止用支柱を取付けた
模型の着底状況

(ケーブル長1m, ストロボ2400rpm)

Landing of the model with the poles over the bottom
(Equivalent cable length is 1m, Lighting of the stroboscope
is 2400 rpm)

3.6. 成果概要

3.6.1. 静特性試験

- (1)カメラシステムに作用する流力の姿勢角特性を得た
- (2)落下時浮上時の速度および釣合い姿勢が推定された
- (3)カメラシステムをできるだけ速い速度で浮上させるためには、カメラシステムが縦の姿勢で浮上し、釣合い迎角が $\pm 20^\circ$ 以内になるように設計すべきであることが明らかになった。
- (4)上述の条件を尾翼によって達成させるため、必要な条件が計算された
- (5)おのおのの場合の落下速度および浮上速度が、次のように推定された
 - (a)フェアリングなしのカメラシステムに空中重量 433kg の封入容器を付けた場合;
落下速度 2 m / s
 - (b)フェアリングなしのカメラシステムを横姿勢($\alpha = 90^\circ$)で浮上させる場合;

- 浮上速度 0.6 m / s
- (c)フェアリングなしのカメラシステムを縦姿勢($\alpha = 0^\circ$)で浮上させる場合;
浮上速度 1.6 m / s

3.6.2. フルード模型による封入容器つきカメラシステムの水槽落下試験

- (1)落下中の挙動が定性的にはかなり明らかになった
特に封入容器とカメラシステムを結合するケーブルの長さがある条件を満たすと、カメラシステムが竹とんぼの翼のように回転する可能性があることが指摘された。
- (2)上述の現象が望ましくない場合には、封入容器から支柱をだす方法が有効であることが分った
- (3)結合ケーブルを1mよりも短くすると、着底時にカメラシステムが封入容器に接触する危険性があることが指摘された