

海洋計測用バイシステムの運動の数値計算法について : 総合バイシステムによる海洋計測法の開発研究 : 第2報

小寺山, 亘
九州大学応用力学研究所 : 助教授

長浜, 智基
九州大学応用力学研究所 : 助手

石井, 秀夫
九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4743623>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 53, pp.19-36, 1980-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



海洋計測用ブイシステムの運動の数値 計算法について

——総合ブイシステムによる海洋計測法の
開発研究(第2報)——

小寺山 亘* 長 浜 智 基**
石 井 秀 夫**

概 要

深海域、特に強流帯で使用する海洋計測用ブイシステムの投入、係留、揚収時の運動及び係留索張力についてランプド・マス法による数値計算を行い、模型実験及び実機の海上実験の結果と比較して、実用上十分の精度で一致する事を確認した。

Key words: Lumped masses, Oceanographic research buoy, Deployment,
Mooring, Retrieval

1. 緒 言

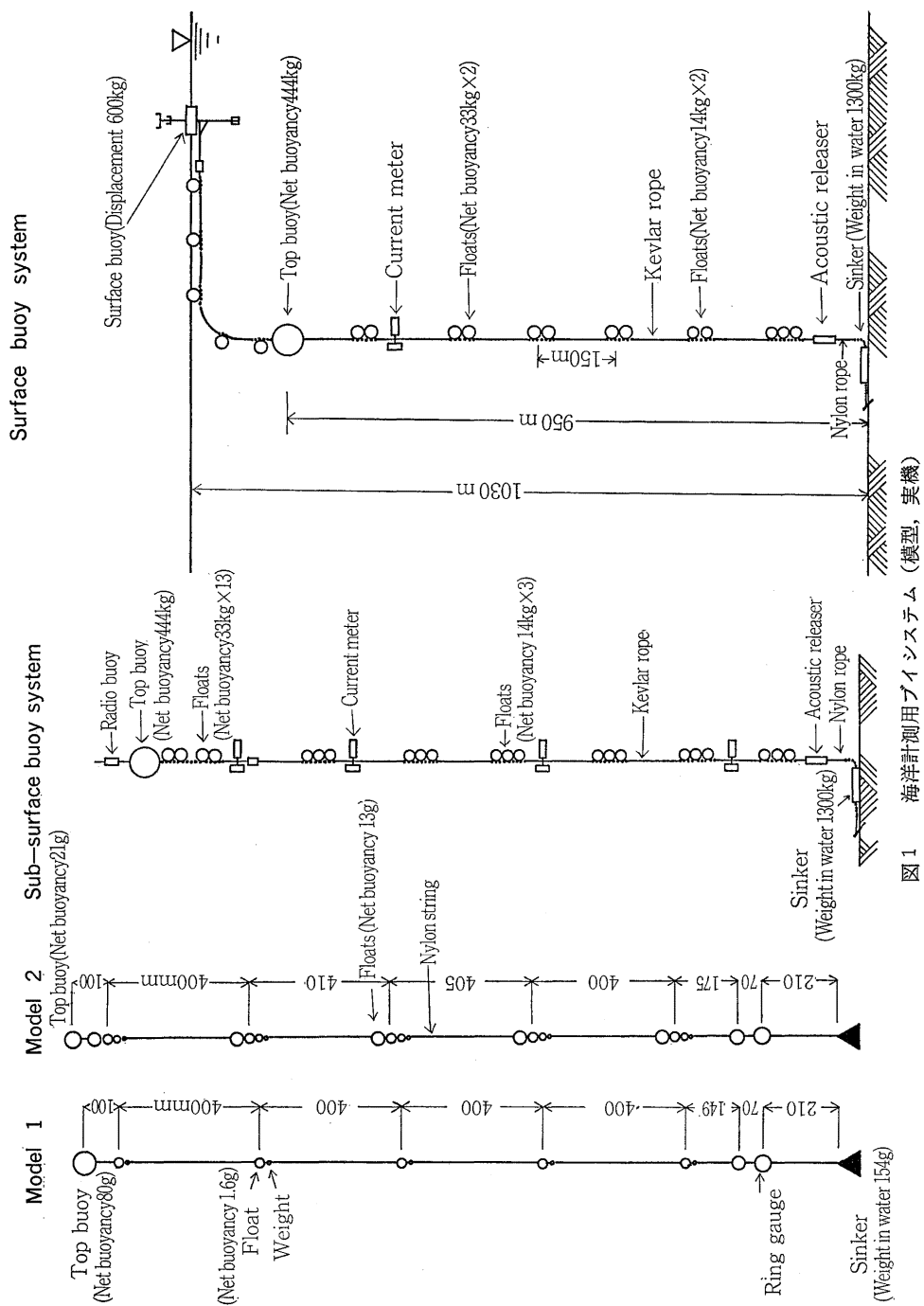
応用力学研究所においては、深海域、特に強流帯とその周辺の海洋気象、海象データを採取する目的で海洋計測用総合ブイシステムを開発し、昭和54年度に第1回黒潮計測を種子島南方海域において行った。その詳細は「総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究(第1報)」に報告されている。今後、海洋計測用ブイシステムは海洋エネルギー利用等の計画が現実化して行く中で、ますますその重要性を増して行くものと考えられるが、深海域で使用する海洋計測用ブイシステムに関する基礎的な研究は十分でなく、多くの問題が未解決のまま残されている。そこで本研究所ではブイシステムを設計するための基礎資料を得る目的で模型実験、海上実験、材料の強度試験等の基礎研究を昭和53年度～54年度に行い、一応の成果を得た。本論文はそれらの一連の基礎研究の1部をまとめたものであり、ブイシステムの運動に関する模型実験、実機による海上実験の結果とランプドマス法で行った数値計算の結果を比較し、計算法の精度の確認を行うとともに、試計算を通じて、ブイシステムの運動の特性を明らかにする。

2. 数 値 計 算 法

数値計算法としては有限要素法、ランプドマス法が考えられる。しかしながら、ブイシステムを構成

* 九州大学助教授、応用力学研究所

** 九州大学助手、応用力学研究所



する係留線の変形量は極めて大きく複雑であるために、変位のモードを固定して考える有限要素法は適用が困難であり、ブイシステムの形状がランプドマス法概念になじみやすいので、計算はすべてランプドマス法によった。計算の詳細は、ブイシステムの形状、対象となる運動の形態によって異なるが基礎的な考え方は共通しているので、まずそれを説明する。

2. 1 数値計算の基礎式

Thresher ら²⁾ はランプドマス法により、海面ブイを係留するためのアンカーをアンカーラスト方式で投入する際の係留線の形状、張力を計算した。本論でも計算法の基本的な考え方は同様であるが、計算の対象の種類が多いのでより汎用的に拡張した。

図1に示すようなブイシステムに加わる外力は地面からの反力と流体力（浮力、抗力、付加質量力）、重力である。それらを図2に示すようにブイシステムの何点かに集中的に加わると仮定して各点の運動を求める。ただし各計算点間は係留線によって結ばれているので各点に対する外力としては係留線の張力も加わる事となる。同時に係留線に加わる流体力、重力は計算点に加わると考える。各部の質量はすべて計算点に集中しているので、計算点としてはできるだけフロート、流速計、シンカーのようにもともと大きな質量をもつ部分を選ぶと実際のブイシステムと計算のモデルが近くなる。計算点に加わる流体力はそれを構成する種々の物体に加わる流体力の和として求められる。一般に物体の抗力係数、付加質量係数は流れに対する角度によって変化するので図2に示すように係留線の接続方向と法線方向に分けて考えると便利である。 i 番目の計算点に加わる接続線方向の抗力 F_{Dti} と法線方向の抗力 F_{Dni} は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} F_{Dti} &= \frac{1}{2} \rho |v_{ti}| v_{ti} A_{ti} C_{Dti} \\ F_{Dni} &= \frac{1}{2} \rho |v_{ni}| v_{ni} A_{ni} C_{Dni} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし ρ : 流体密度, v_{ti} : 計算点における流体に対するブイシステムの相対速度の接続方向成分, v_{ni} : 計算点における流体に対する相対速度の法線方向成分 A_{ti} C_{Dti} は以下のようにして求める。 i 番目の計算点があると係留線、フロート、流向流速計からなるとすれば、

$$A_{ti} C_{Dti} = A_{tL} C_{DtiL} + A_f C_{Dfi} + A_{tm} C_{Dtim} \quad (2)$$

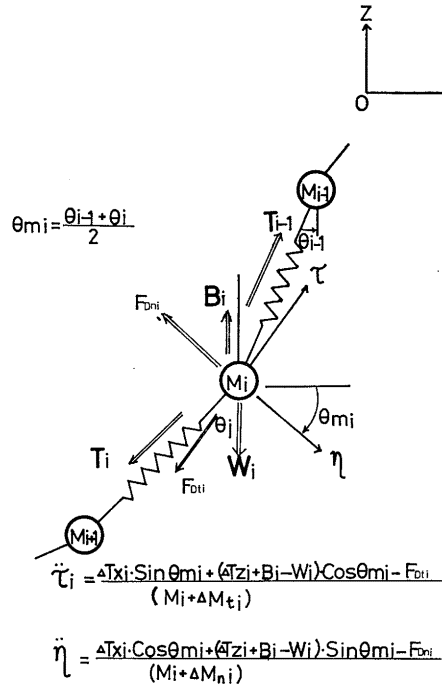


図2 計算の概念図

ただし, A_{tL} , A_f , A_{tm} はそれぞれ係留線, フロート, 流向流速計の接線方向投影面積, C_{DtL} , C_{Df} , C_{Dtm} は抵抗係数である. A_{ni} , C_{Dni} も同様にして求める.

図2に示すように i 番目の係留線の傾斜角を θ_i とすれば計算点での係留線に対する接線の傾斜角 θ_{mi} は近似的に次式で求められる.

$$\theta_{mi} = (\theta_{i-1} + \theta_i) / 2 \quad (3)$$

ただし $i=1$ の場合は以下のように定める.

$$\theta_{m1} = \theta_1 \quad (3')$$

空間に固定した座標軸を $X-Z$ として潮流は X 方向に $u_0(z)$ の流速で流れているとすれば

$$\left. \begin{aligned} v_{ti} &= \dot{\tau}_i - u_{0i} \sin \theta_{mi} \\ v_{ni} &= \dot{\eta}_i - u_{0i} \cos \theta_{mi} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし, $\dot{\tau}_i$, $\dot{\eta}_i$: i 番目の計算点の接線, 法線方向速度, $u_{0i} = u_0(z_i)$.

フロートのように流れに対する角度によって抵抗係数が変化しないものは (2) 式中においても接線方向と法線方向で同じ係数を用いる. 付加質量力も抗力と同様に考えて各要素の付加質量を加え合せて

$$\left. \begin{aligned} F_{Mti} &= \rho \ddot{\tau}_i V_i C_{Mti} = \Delta M_{ti} \ddot{\tau}_i \\ F_{Mni} &= \rho \ddot{\eta}_i V_i C_{Mni} = \Delta M_{ni} \ddot{\eta}_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし F_{Mti} , F_{Mni} : 計算点 i に加わる接線, 法線方向の付加質量力. $\ddot{\tau}_i$, $\ddot{\eta}_i$: 計算点 i の加速度の接線, 法線方向成分. V_i : 排水体積, C_{Mt} , C_{Mn} : 付加質量係数, ΔM_{ti} , ΔM_{ni} : 付加質量.

また, 張力 T_i は計算点間の係留線の伸びを Δl_i とすれば次式で求められる.

$$\left. \begin{aligned} T_i &= E_i S_i \frac{\Delta l_i}{l_i}, \quad (T_i \geq 0) \\ \Delta l_i &= \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2} - l_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし E_i : 係留線の弾性係数, S_i : 係留線の断面積, l_i : 係留線の長さである. また Δl_i が負の場合は $T_i = 0$ とする.

係留線の張力によって計算点 i に加わる水平方向, 鉛直方向の力 ΔT_{Xi} , ΔT_{Zi} は結局次式で与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{Xi} &= T_{Xi-1} - T_{Xi} = T_{i-1} \sin \theta_{i-1} - T_i \sin \theta_i \\ \Delta T_{Zi} &= T_{Zi-1} - T_{Zi} = T_{i-1} \cos \theta_{i-1} - T_i \cos \theta_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$i=1$ の場合は

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{X1} &= T_{X1} = -T_1 \sin \theta_1 \\ \Delta T_{Z1} &= T_{Z1} = -T_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad (7')$$

(1)~(7) 式を使って計算点 i の運動方程式は次式で表わされる.

$$\left. \begin{aligned} (M_i + \Delta M_{ti}) \ddot{\tau}_i &= \Delta T_{Xi} \sin \theta_{mi} + (\Delta T_{Zi} + B_i - W_i) \cos \theta_{mi} - F_{Dti} \\ (M_i + \Delta M_{ni}) \ddot{\eta}_i &= \Delta T_{Xi} \cos \theta_{mi} - (\Delta T_{Zi} + B_i - W_i) \sin \theta_{mi} - F_{Dni} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし W_i , B_i : 計算点 i の重量, 浮力, $M_i = \frac{W_i}{g}$

以上のようにして $\ddot{\tau}_i$, $\ddot{\eta}_i$ が求めれば $\ddot{X}_i$, $\ddot{Y}_i$ は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_i &= \ddot{\tau}_i \sin \theta_{mi} + \ddot{\eta}_i \cos \theta_{mi} \\ \ddot{Z}_i &= \ddot{\tau}_i \cos \theta_{mi} - \ddot{\eta}_i \sin \theta_{mi} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$\ddot{X}_i(t)$, $\ddot{Z}_i(t)$ を与えて $\ddot{X}_i(t+\Delta t)$, $\ddot{Z}_i(t+\Delta t)$ を求める数値積分法は数多くあるがここでは予測子・修正法³⁾を用いた。予測子としては修正オイラーの公式，修正子として台形公式を用い，誤差の評価を行いながら積分を進め，誤差が制限値を越した場合は時間刻み Δt を $\frac{\Delta t}{2}$ にして計算を進めた，また刻み Δt を変更する場合と， $t=0$ における積分はルンゲ・クッタ・ギル法によった。計算のフローチャートを図3に示す。

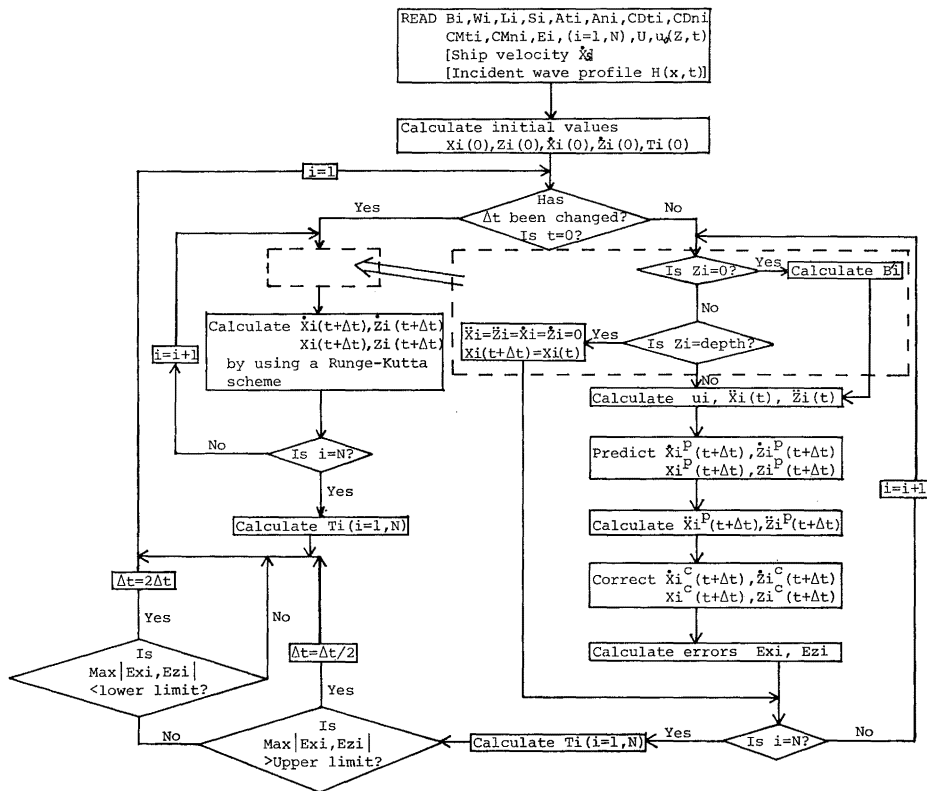


図3 計算のフローチャート

2. 2 投入の計算

2. 2. 1 初期値

計算の初期値は船上のシンカー位置をX-Z座標系の原点とし，潮流速度分布 $u_0(Z)$ と船速 $\dot{X}_s$ を与えれば，計算点に加わる水平方向の力 F_H ，鉛直方向の力 F_V は平衡状態であり，次式で表わされる。ただし今回の計算では潮流による鉛直方向の流速は0としている。またこの状態では係留線は概ね水面に浮かんでいる。

$$\left. \begin{aligned} F_H &= \Delta T_{xi} + \frac{1}{2} \rho A'_{ii} C_{Dii} |u_{0i} - \dot{X}_s| (u_{0i} - \dot{X}_s) = 0 \\ F_V &= \Delta T_{zi} + B'_i - W_i = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$\dot{X}_s$ は船速, u_{0i} は潮流の流速である. また B'_i は計算点の浮力であるが, 水面に浮かんでいる場合は次の関係が成り立つ.

$$B'_i = W_i - \Delta T_{zi} \quad (11)$$

$B'_i < B_i$ の場合は有効投影面積 A'_i は次式で求める.

$$A'_i = A_i \times \frac{B'_i}{B_i} \quad (12)$$

また B'_i , A'_i の上限値は B_i , A_i である. (10) 式を使って $i=1$ から次々に T_i を求めて, 次に θ_i を定め, 以下くり返し計算で計算点の位置 (X_i , Z_i) と張力 (T_{xi} , T_{zi}), 傾斜角 θ_i を求める. その場合に θ_i の初期値として $u_{0i} - \dot{X}_s > 0$ の場合は $\frac{\pi}{2}$, $u_{0i} - \dot{X}_s < 0$ の場合は $-\frac{\pi}{2}$ を与える. また図 1 に示すような海面ブイシステムの場合は $i=1$ の海面ブイの係留点の深さ Z_1 は設計値のまま固定とし, 係留索張力の鉛直成分 T_{z1} を変化させてくり返し計算を行なった.

2. 2. 2 シンカー落下中

シンカー落下中は次々とフロート, 流速計等を引き込んで行くから, 各計算点の浮力と有効抵抗面積は変化する. また水面上にある時のフロート等に加わる造波抵抗もかなり大きいと思われるが, 今回の計算では無視した. 計算に使用する抵抗係数, 付加質量係数等は各種便覧によって求め, 複雑な形状のものは類似したものから推定した.

2. 2. 3 シンカー着底とそれ以後

計算点の数を N 個とすれば, シンカーは n 番目の計算点である. 計算の過程で Z_i = 水深となった瞬間から, Z_n , X_n は固定し, $\dot{X}_n$, $\dot{Z}_n$, $\ddot{X}_n$, $\ddot{Z}_n$ は 0 とする. その他の計算点はそのまま計算を続行する.

2. 3 係留中のブイシステム

図 1 に示すような海中ブイシステムに加わる変動力は潮流変動による力だけであるから, (4) 式中の u_{0i} を時間及び場所の函数として与えればよい. また図 1 中の海面ブイシステムの場合は潮流変動の他に風, 波による外力が加わる. 海面ブイは風による力は受けにくい形をしているので風による表層流の影響と波力を受けるとして計算を行う. その場合海面ブイに加わる外力は粘性抗力, 付加質量力, 圧力勾配による力及び造波減衰力であるが, ブイに比較して波長が十分に長い場合は造波減衰力は他の力に比べて小さい. 風と波の影響を受ける流場はシンカーの真上の水面上に原点をとって表わせば次式で表わされる.

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u_0(Z) + 0.03U(3Z/H + 1.0)(Z/H + 1.0) + \frac{\omega h}{2} e^{Kz} \sin(Kx - \omega t) \\ u_z &= -\frac{\omega h}{2} e^{Kz} \cos(Kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_x &= -\frac{\omega^2 h}{2} e^{Kz} \cos(Kx - \omega t) \\ \dot{u}_z &= -\frac{\omega^2 h}{2} e^{Kz} \sin(Kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ただし ω : 波の円振動数, h : 波高, $K = \frac{\omega^2}{g}$, U : 風速, H : 水深.

粘性抗力は u_x, u_z を τ, η 方向の流速 u_t, u_n に変換し, $\dot{\tau}, \dot{\eta}, u_t, u_n$ から v_t, v_n を求めて (1) 式に代入し, 計算する. その粘性抗力 F_{Dti}, F_{Dni} を (8) 式に代入して求めた $\ddot{\tau}_i, \ddot{\eta}_i$ を (9) 式を使って $\ddot{X}_i, \ddot{Z}_i$ に変換した後に, 波粒子の運動による付加質量力と圧力勾配による力の影響を次のように取り入れる.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{X}_i &= \ddot{X}_i + \frac{C_{MX} \rho V_i \dot{u}_x}{(M + \Delta M_{Xi})} \\ \ddot{Z}_i &= \ddot{Z}_i + \frac{C_{MZ} \rho V_i \dot{u}_z}{(M + \Delta M_{Zi})} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし, $\Delta M_{Xi}, \Delta M_{Zi}$: X, Z 方向の運動による付加質量, C_{MX}, C_{MZ} : 質量力係数

(15) 式は全部の計算点に適用されるが, 波及び表層流の影響を強く受けるのは海面 ブイ と表面付近のフロート だけである. また係留線の傾斜が大きくない場合, $\Delta M_{Xi}, \Delta M_{Zi}$ は $\Delta M_{ti}, \Delta M_{ni}$ でそれぞれ近似できる.

2. 4 ブイシステムの揚収

揚収の計算は係留中の運動計算プログラムにおいて, シンカーの直上の係留線の張力を 0 とすればよい. さらに水面に浮かび上がった部分の浮力及び有効抵抗面積は投入の計算で述べた方法で計算する.

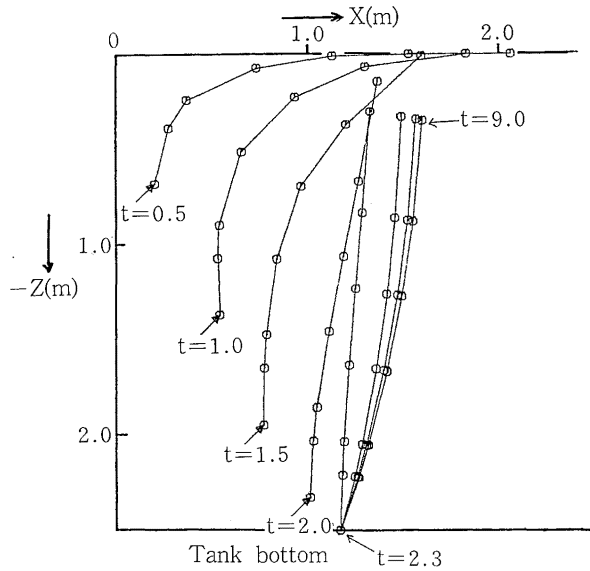


図4 シンカー落下中の係留線形状の計算結果 (模型 1)

3. 実験と計算の比較

本節では前節までに述べた方法で計算した結果と模型実験及び実海面で行った実機テストの結果と比較する。実験については第1報¹⁾にくわしいので参照されたい。模型実験及び実機テストに使用したブイシステムの概略図を図1に示す。

3.1 投 入

模型実験は流速を変化させて行い、シンカーが着底するまでの時間 t と流下距離 X_D 、シンカー部での張力 T_A を計測した。図4は模型1のシンカー落下中の係留線形状の計算結果である。流れはシンカーがブイの上流になるように流れている。またシンカー水平速度の初期値は0としている。シンカーの水平速度の初期値、すなわち実機における船速はシンカー投入後の運動に対する粘性抗力による減衰が極めて大きいために、その後の運動に影響をほとんど及ぼさない。計算結果は実験中に水中ビデオカメラで観測した結果とよく一致している。また、シンカーが着底してから海中ブイシステムが定常的な

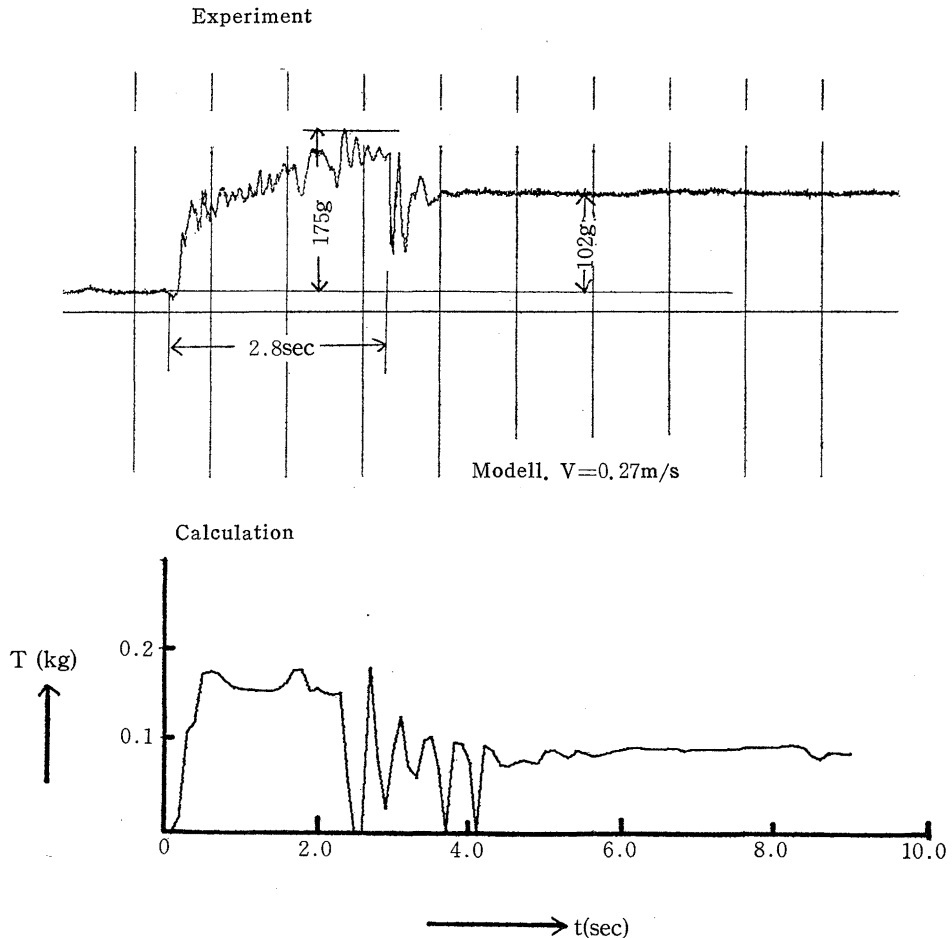


図5 シンカー落下中の張力の計算と実験結果（模型1）

姿に落ち着くまでにはかなりの時間がかかる事がよくわかる。図5はシンカー部での張力 T の計算結果と実験結果の比較である。この例では着底までの時間に計算と実験で少し差があり、シンカー投入直後の張力に計算ではピークが表われているが、実験には表われていない。しかし実験ではこのピークが表われる場合もあるので、この2つのくいちがいの原因は投入直後のシンカーそのものの姿勢によるものと考えられる。またシンカー着底の瞬間に計算ではシンカー部での張力が0になっているが実験では小さくなるが0にはならない。この差は係留線に使用した細紐の弾性係数の取り方によると思われる。しかし、図4からもわかるように係留線のフロート間の相対運動は小さく、この場合にはからみつきの恐れは少ない事がわかる。図6はシンカーの落下速度である。供試模型の全長と水深の差が大きくないので、定常速度の期間はごく少ない。しかし、トップブイが引き込まれてから定常速度に落ち着くまでの時間はかなり短い事が計算からわかった。

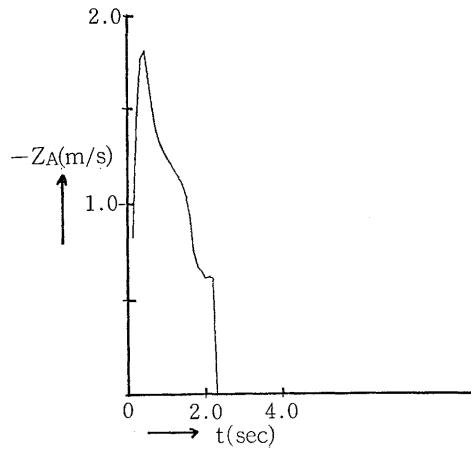


図6 シンカー落下速度（模型1）

図7はシンカー着底までの時間 t と水平流下距離 X_D に関する模型実験と計算の比較である。時間に関しては実験と計算の一致はよい。 X_D に関しては計算値は高めになっている。特に流速が小さい場合に

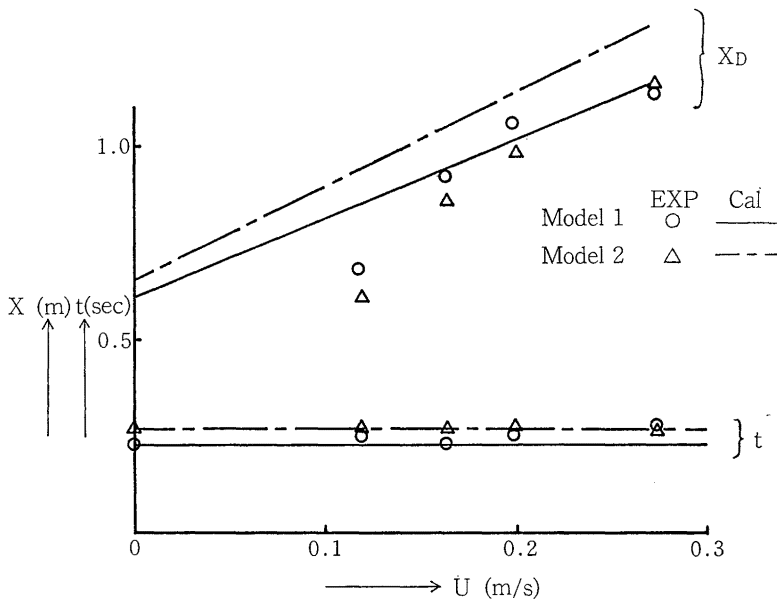


図7 シンカー着底までの時間と水平流下距離（計算と実験）

差が大きい。これは実験値に対する低速流の流速測定誤差の影響と思われる。いずれにしても、投入時の主要な問題であるシンカーの水平流下距離、最大張力、係留線のからみつき、シンカー着底までの時間等の予測には実用上十分の精度がある事がわかった。

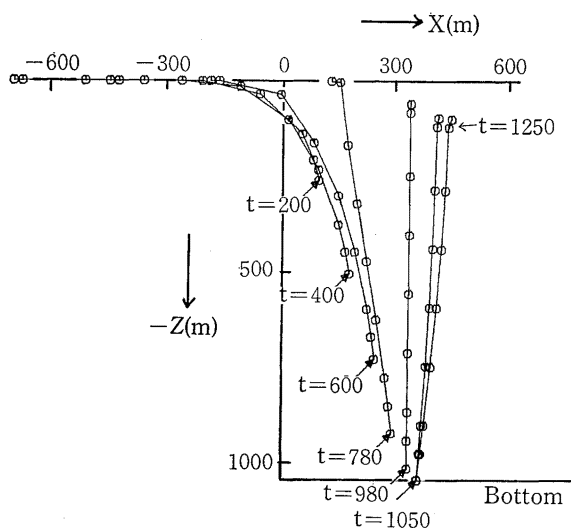


図8 シンカー落下中の係留線形状（海中ブイシステム）

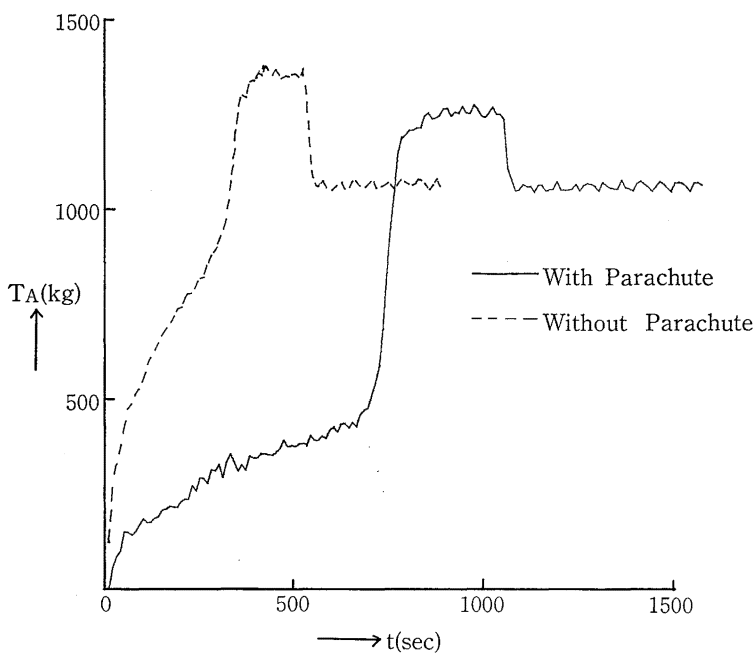


図9 シンカー落下中の張力（海中ブイシステム）

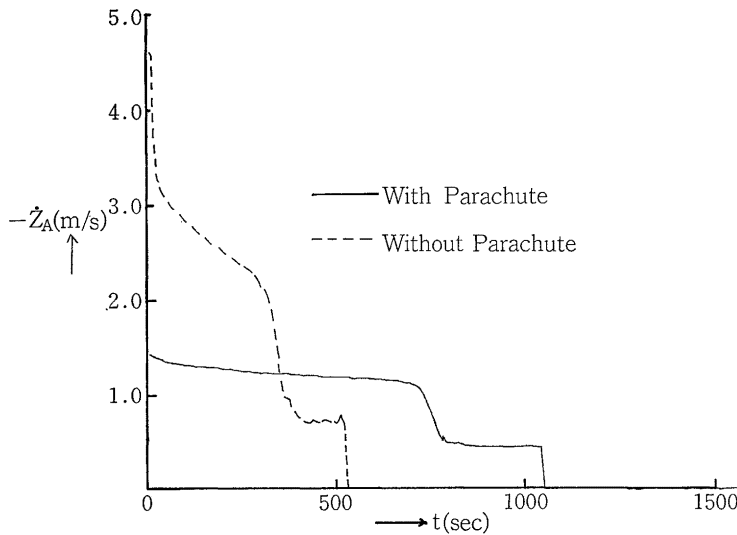


図 10 シンカー落下速度 (海中ブイシステム)

図8～図10は種子島南方海上で行った海上実験に対応する海中ブイシステムの数値計算結果である。実験の詳細については参考文献(1)を参照されたい。投入は流れに乗って対水速度1ノットぐらいで行ったので、計算もそれに合わせている。しかし投入時の船速の影響は極めて少ない事がすでになっている。潮流の流速は投入前に海上実験で測定した値の0.75 m/sを表面流速とし深さ方向に対数的に減衰し海底では表面の1/2の流速であるとした。またその方向はシンカーが下流側になるように流れている。水平流下距離 X_D は流れに乗って投入する場合は小さい事が図からわかる。もし流れに逆らって投入すると、試算の結果によれば約3倍程度になる。また実験ではトップブイが引き込まれるまでの時間はシンカー投入後792秒であったが、数値計算結果は820秒でほぼ一致している。着底までの時間は、パラシュートに加わる抗力に大きく依存する。パラシュートの抵抗係数は文献⁴⁾によれば $C_D=1.1$ ($D=0.182$ m), 1.1 ($D=0.35$ m), 0.735 ($D=0.672$ m), 1.371 ($D=1.5$ m), 1.4～2.4 ($D=3.05$ m) と大きなバラツキがある。これは尺度影響もあるが、パラシュートの直径が荷重を受けて伸びる影響が大きいと考えられる。本論では低荷重の時にパラシュートの直径を計測し、 $C_D=1.1$ を採用した。

図9はシンカー部での張力 T_A の計算結果である。海上実験の結果ではトップブイの直下で最高張力は約1.45 tonであったが、計算結果は1.3 tonでほぼ一致している。張力計で計測した部分より上方の余剰浮力は約880 kgであるから約1.6倍の張力を記録した事になる。図中には参考までにパラシュートを用いない場合の計算結果を破線で示している。シンカーの重さが、総浮力に比較してそれほど小さくなく、従って最終速度も小さいので、両者に大きな差はないが、シンカーが重い場合はかなりの差が生じると考えられる。図10はシンカーの落下速度 $\dot{Z}_A$ である。パラシュートの効果で最高速力は1.6 m程度でかなりゆっくりとしているが、破線に示すようにパラシュートがない場合は投入直後

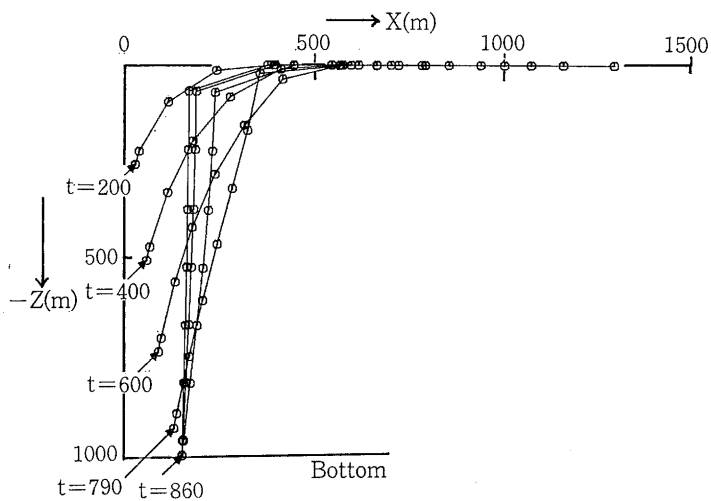


図 11 シンカー落下中の係留線形状 (海面ブイシステム)

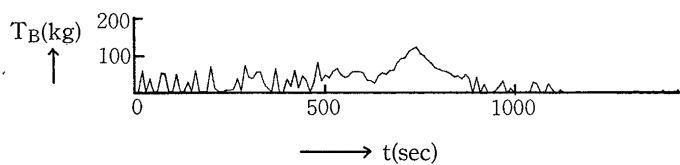


図 12 シンカー落下中の海面ブイ係留反力 (海面ブイシステム)

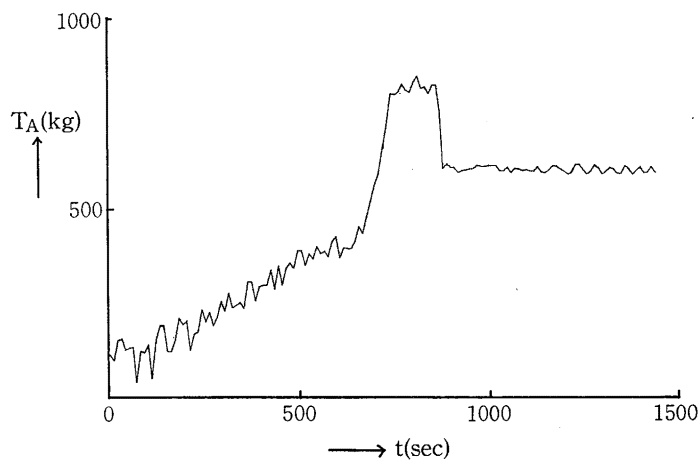


図 13 シンカー落下中の張力 (海面ブイシステム)

は 4.6 m/sec にも達する。図 11～図 14 は海面ブイシステムの投入の数値計算結果である。図 11 はシンカー落下中の係留線形状図である。海面ブイシステムの場合は海中ブイシステムの場合と異なり流れに逆らって投入した。数値計算の結果では、流れに乗って投入した方が、水平流下距離及び海面ブイ対

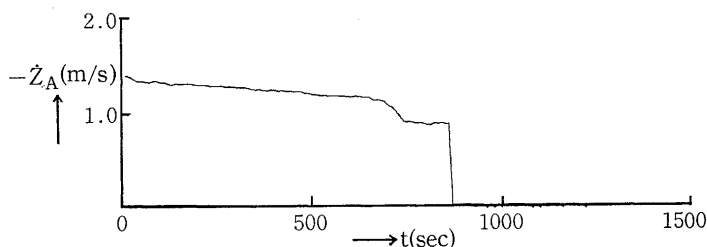


図 14 シンカー落下速度 (海面ブイシステム)

水速度が小さくなる等の利点がある。しかし、一方落下中の係留線の形が複雑になるのでからまる心配があり、流れに逆らって投入する方を選んだ。その結果は図 11 に示すように落下中の係留線の形は単純で互いにかからまる心配はない。また今回の海面ブイ投入海域の表面流速は 0.1 m/s で水平流下距離もそれほど大きくない。トップブイが引き込まれるまでの時間は海上実験では約 800 秒であるが、計算値は 760 秒であり、ほぼ一致している。

図 12 は海面ブイの係留索の張力 T_B である。最高でも 145 kg に過ぎない。したがって投入中に海面ブイが破壊される心配はない事がわかった。図 13 はシンカー部での張力 T_A である。最高値は 840 kg で係留時の静的張力の約 1.3 倍である。シンカー部での張力は海面ブイ、海中ブイ共に模型の場合と異なり着底の時に急激に小さくなることはない。これは緩衝材として係留線にナイロンロープを一部使用している事とパラシュートの効果が表われたと考えられる。また係留線の形状が定常状態に落ち着くまではかなりの時間がかかるが、シンカー部の張力は短時間に一定となる事が図からわかる。図 14 はシンカーの落下速度 $\dot{Z}_A$ である。海面ブイの場合も海中ブイと同様にシンカー投入後、次々とフロートを引き込んで行く状態、トップブイに力が加わり始めて落下速度が急に減少して行く状態、トップブイを引き込んでしまっって一定速度で落下して行く状態の 3 状態に別けられる事が図から読みとれる。

3. 2 係 留 中

係留中に流速が変動した時の海中ブイシステムの運動応答を調べるために模型実験を行った。また数値計算を行い、実験と比較した。

図 15 の実験は変動流中に係留された模型 1 に関する計測結果、破線は計算結果である。下から、流速 u 、トップブイの流れ方向変位、直角方向変位、シンカー位置での張力変動 T_A 、トップブイの鉛直方向変位 Z_B である。流速は実験値を正弦波に近似して計算したが、数値的に与えてもよい。流れ方向水平変位 X_B は計算と実験はよく一致している。ただ実験の場合の 0 秒は計測を始めた時刻を示すのに対し、計算の場合は定常流から非定常流に移った時を示すので、0 秒付近の様子は計算と実験で多少様子が異なる。直角方向の運動はトップブイから流れ出る渦によるもので、今回の数値計算法では計算できない。シンカー部での張力変動も渦による高周波数の変動力以外は計算と実験はよく一致している。トップブイの鉛直方向の運動は流れ方向の運動に付随して起るものであるが実験では計測していないので、計算値だけを示す。以上の実験と計算の比較により変動流が 2 次元的である場合は本論の計算法でも十分の精度があることがわかったが、3 次元的にねじれた流場中及び流出渦により主流と直角方

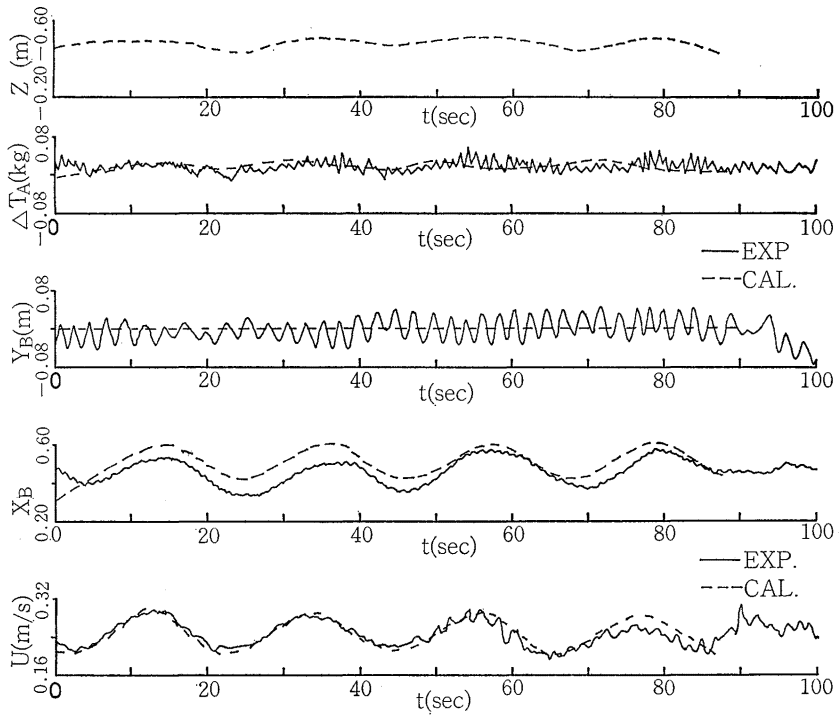


図 15 変動流中に係留された海中ブイシステムの運動と張力の計算と実験結果 (模型 1)

向に運動する場合は別の計算方法を待たねばならない。

図 16～図 21 は波、風、潮流を受ける海面ブイシステムの運動の計算結果を示したものである。

図 16 は風 (風速 15 m/s), 潮流 (表面流速 0.5 m/s) を受けた場合の係留線の形状の静的計算の結果である。図 17 は張力分布, 図 18 は計算に使用した鉛直方向流速分布である。

図 19 は図 18 で示した潮流及び表面吹送流の上に波高 5 m, 周期 10 秒の波を受けた時の海面ブイの運動である。ただし波向と流向は一致しているとしている。図の上方から流れ方向水平変位 X_B , 上下方向変位 Z_B , 海面ブイ係留反力 T_B , その鉛直成分 T_{BV} である。潮流と波を同時に受ける場合には潮流による定常抗力以外に波と流れの干渉による定常抗力が働く, 例えば (13) 式において, $Z=0$, $x=0$ を代入して原点におかれた物体に働く力の抗力成分を求めると

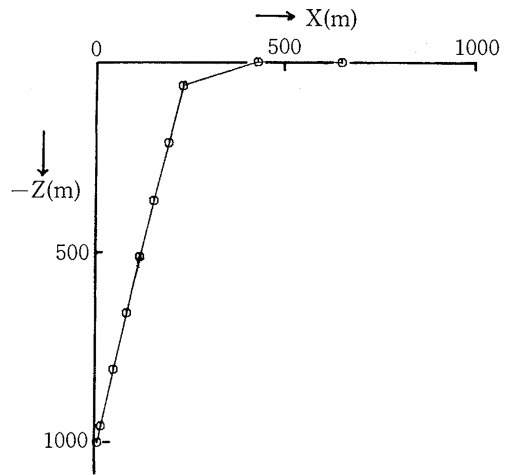


図 16 潮流と風を受ける海面ブイシステム係留線形状図

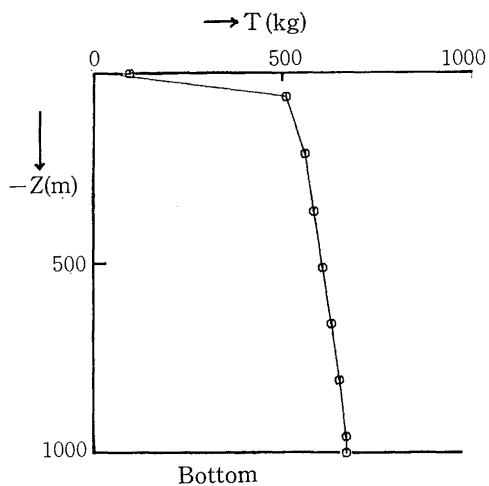


図 17 張 力 分 布

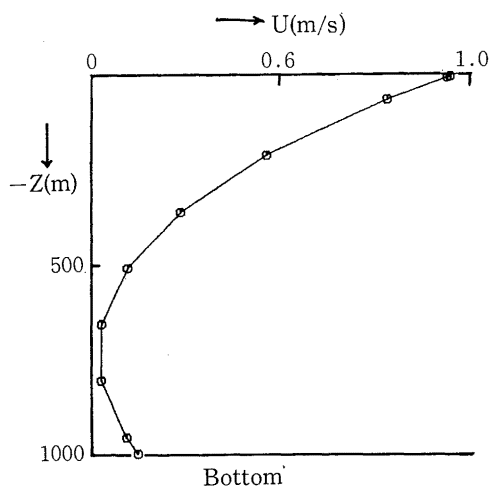


図 18 鉛直方向流速分布

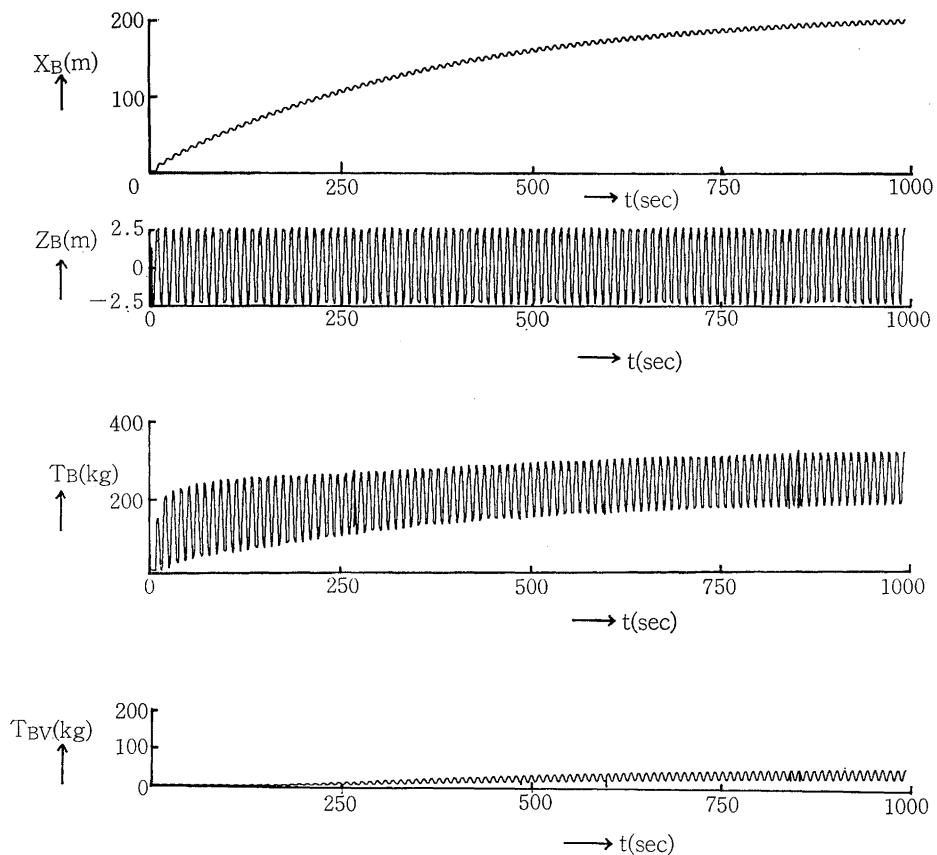


図 19 潮流と風、波を受ける海面ブイの運動と張力

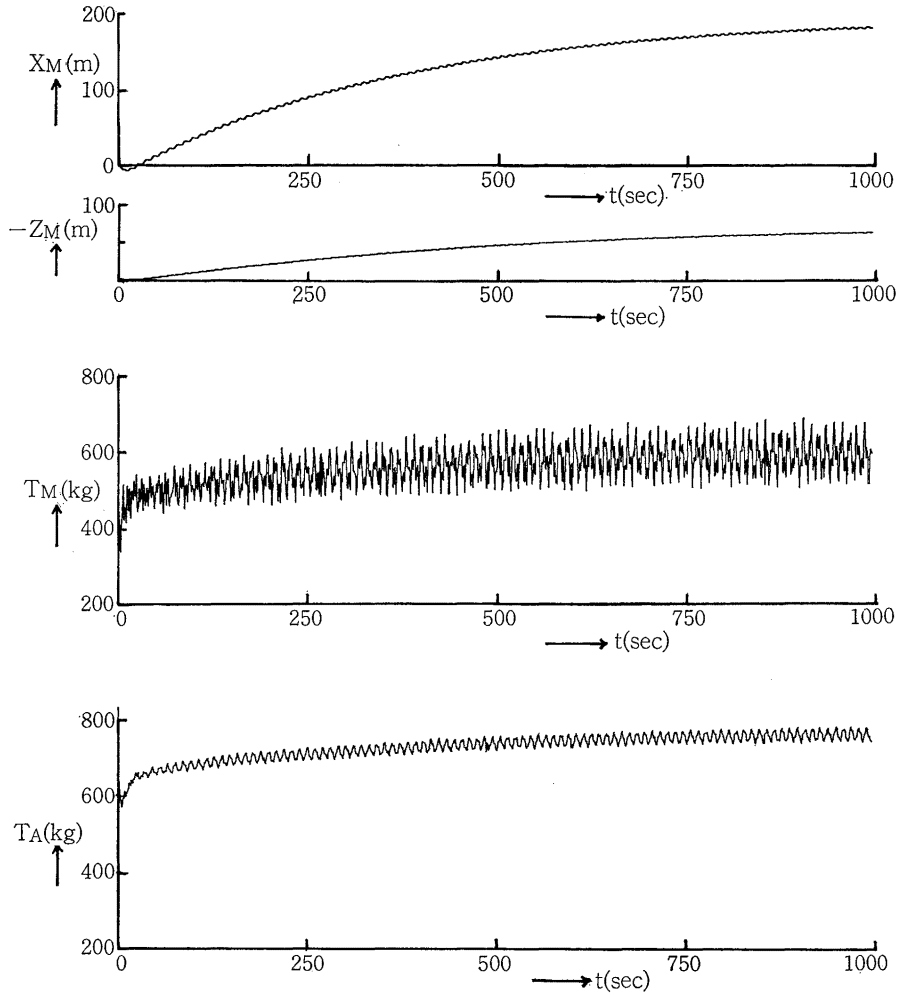


図 20 中間ブイの運動と張力及びシンカー部張力

$$\begin{aligned}
 F_D &= \frac{1}{2} \rho A_X v_X |v_X| C_{DX} \\
 &= \frac{1}{2} \rho A_X C_{DX} (u_0 + 0.03 U - \frac{\omega h}{2} \sin \omega t) |u_0 + 0.03 U - \frac{\omega h}{2} \sin \omega t|
 \end{aligned} \quad (16)$$

ここで最も簡単な場合は $u_0 + 0.03 U \geq \frac{\omega h}{2}$ であり、その時 (16) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1}{2} \rho A_X C_{DX} (u_0 + 0.03 U - \frac{\omega h}{2} \sin \omega t)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \rho A_X C_{DX} (u_0 + 0.03 U)^2 + \frac{1}{4} \rho A_X C_{DX} \frac{\omega^2 h^2}{4} - \frac{1}{4} \rho A_X C_{DX} \frac{\omega^2 h^2}{4} \cos 2\omega t \\
 &\quad - \frac{1}{2} \rho A_X C_{DX} (u_0 + 0.03 U) \omega h \sin \omega t
 \end{aligned} \quad (17)$$

(17) 式において, 1 項目は定常流による抗力, 3 項目, 4 項目は変動力であるが, 2 項目は波と潮流の干渉による定常抗力である。ただし, ここでは定常流中の粘性抗力係数と変動流中の抗力係数は同じとしている。 $u+0.03U < \frac{\omega h}{2}$ の場合でも同様の定常抗力が存在する。したがって図 18 に示すような定常流だけを受けていた海面ブイが波をさらに受ければ図 19 に示すように前後, 上下揺を行いながら新しい平衡位置に達するまで移動する。その定常値に達するまでの時間は図 1 に示すような海面ブイの場合約 1000 秒である事が図からわかる。その場合でも, 前後揺の振幅は実験結果¹⁾ に示されたと同様に図からはわかりにくい波高とほぼ

等しい。図 19 に示した上下揺は実験結果¹⁾ により, 波面に追従するとして与えている。海面ブイの係留反力 T_B の平均値は海面ブイが移動して行くにつれて少しずつ増加しているが, 振幅はかえって減少している。上下方向の係留反力 T_{BV} はわずかなずつ増加して行くが, この程度の潮流, 風, 波浪ではそれ程大きくならず上下揺を妨げる程ではない。図 20 は中間ブイの運動と張力及びシンカー部での張力を示している。水平変位 X_M は海面ブイの移動と共に増加する。また前後揺も行いが, 海面ブイほどではない。係留法から考えて当然ではあるが, 上下揺はほとんど行わず, 水平変位の増加と共に沈み込んで行く。中間ブイ直下の係留索張力 T_M は, シンカーからの拘束と海面ブイからの強制力を受けて複

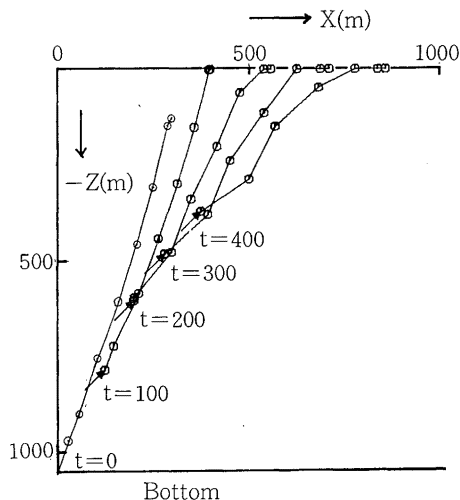


図 22 揚収中の海中ブイ係留線形状図

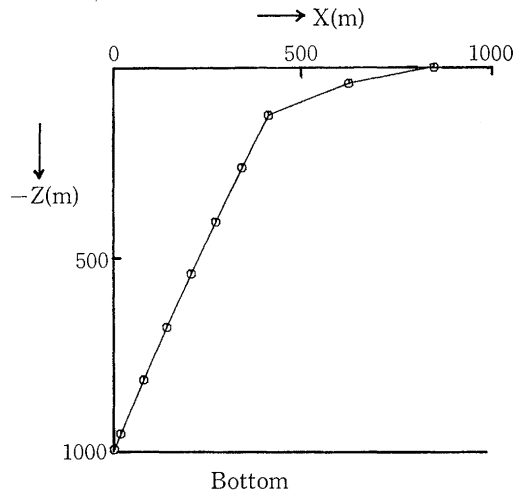


図 21 潮流と風, 波を受ける海面ブイシステムの係留線平均形状図

雑な様子を示すが図の一番下に示すシンカー部での張力 T_A と比較して大きいという事はない。図 21 は潮流, 波, 風を受けた場合の係留線の平均形状図である。波を受けた場合は海面ブイと中間ブイの間の係留線は平均的にも水面下に没する事がわかる。

3. 3 揚 収

図 22 はシンカー切り離し後に海中ブイシステムが上昇して行く姿である。表面流速は 1.5 m/s として計算している。この計算例では係留線はからまる事はないように見えるが, もし風と潮流が逆向きであれば, 表面付近の流向と深い所の流向が逆になる可能性があるのだから危険性がある。風, 波がある時の揚収は手早く行わなければ

ならない。

4. 結 論

海中ブイシステム、海面ブイシステムに関する模型実験、実機テストと数値計算結果を比較して得た主な結論を以下に示す。

- 1) ランプドマス法による投入、係留、揚収に関する 計算結果は実用上十分の精度で実験と一致する。
- 2) パラシュートを使用すれば実機の最大降下速度は $1/3$ 程度に減らすことができる。
- 3) ブイシステムをアンカーラスト方式で投入する時のシンカーの最終的な横流れ量は流れに乗って投入すれば逆って投入する場合に比べて $1/3$ 程度になる。
- 4) 係留線の一部に緩衝材としてナイロンロープ等を使用すればシンカー着底時にも張力は 0 になることはない。
- 5) 海面ブイシステムの投入を流れに逆って行えば係留線がからまることはない。
- 6) 波と流れの共存する流場では両者を分離して考えれば定常抗力を過小に評価することになる。

以上であるが、今後はブイシステムの各構成要素の抗力係数、付加質量係数や潮流の鉛直方向速度分布等をより精密に算定することによって、運動、張力の推定精度を向上させて行きたい。

謝 辞

本研究を行うに当たり適切なる助言をいただき、また海上実験で得たデータを使用することを許可下さった海洋工学臨時事業小委員会の皆様に深く感謝します。特に貴重な討論をいただいた海洋災害部の田才福造教授ならびに川建和雄教授に感謝します。さらに海上実験、模型実験を行うにあたり多大の貢献をされた篠崎高茂技官、田代昭正技官、稲田勝技官、原稿の作成に協力していただいた谷章子事務補佐員に謝意を表します。

最後に数値計算には、応用力学研究所電算室 MELCOM-COSMO-900 を使用したことを付記します。

参 考 文 献

- 1) 田才福造, 栖原寿郎, 光易恒他, “総合ブイシステムによる 海洋計測法の 開発研究 (第1報)” 九州大学応用力学研究所所報第52号 (1980).
- 2) Thresher, R. W. and Nath, J. H., “Anchor-Last Deployment Simulation by Lumped Masses.” Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. WW4, Proc. Paper 11709, Nov. (1975).
- 3) 赤坂 隆, “数値計算”, 応用数学講座第7巻, コロナ社.
- 4) 日本船用機器開発協会, “大型船の急速停止用パラシュート開発研究報告書” (1970).

(昭和55年6月2日 受理)