ケーブルと物体から構成される系の動的運動解析法*

角 田 正 豊**

An Analytical Method for Dynamical Simulation of Cable-Body Systems

by Masatoyo SUMIDA

Mooring and towing systems are required to have minimum deviations from the fixed position and depth, and to be statically and dynamically stable under marine environments. To meet these requirements, a designer should predict the response of the systems to these environmental disturbances. This paper proposes the mode-separation method that can analyse unsteady motions of these cable-body systems. This method assumes that the propagation speed of the cable longitudinal wave is infinite, and simulates cable-shape motion separate from cable-elongation motion. Stability analysis of the numerical solution based on the Fourier method shows that the present method requires one-tenth of the computation time compared with previous methods. The calculated results are in very good agreement with experimental values and the validity of the present method is confirmed.

Key Words: Mooring, Towing, Cable-Body System, Towed Motion, Mode-Separation

1. は じ め に

浮遊式海洋構造物や海洋探査機器の開発においては、波浪や海潮流などの海象条件下でこれらを定められた位置・水深に安定に保持できる係留・えい航技術の確立が不可欠である。このためには、係留・えい航システムのようなケーブルと物体から構成される系の種々のじょう乱下における非定常運動を詳細に把握する必要がある。

海洋開発の進展にともない、ケーブル-物体系の運動解析について種々の手法が提案されている。系の運動は双曲形非線形偏微分方程式で記述されるので、特性曲線法により動的な運動解析が可能であるが⁽¹⁾⁽²⁾、計算時間が非常に長くかかる欠点があった。計算時間の短縮を図るため、平衡状態からの変動が微小であると仮定して運動方程式を線形化する手法⁽³⁾、ケーブルを等価な物理量に置換する集中定数法⁽⁴⁾が提案されている。しかし、これらの簡易化解析法を任意の非定常問題に適用するのは不可能であった。さらに従来報告では、解析法固有のこれらの問題点があるほか、検

証実験などによる解析法の妥当性の検討はほとんど行われていなかった。

本論文では非定常問題に適用できる計算時間の短い解析法としてモード分離法を提案し、模型実験により本手法の妥当性を検証した。

2. 運 動 解 析 法

2・1 モード分離法の考えかた ケーブル-物体系の運動方程式の特性曲線には、ケーブル姿勢情報を伝達する横波とケーブルの伸縮情報を伝える縦波の2種類がある。通常のケーブルでは後者の伝ば速度は前者の約10倍である⁽⁵⁾。運動の特性時間が特性曲線の伝ば速度で決定されることから、ケーブル姿勢運動と伸縮運動は物理的に独立した運動モードと見なすことができる。そこで解析において、この2種類のモードを分離し、それぞれの運動の特性時間に応じた時間精度で計算を行えば計算時間の短縮が可能になると考えられる。本論文で提案するモード分離法では、縦波の伝ば速度が無限大(ケーブルが伸縮しない)と仮定して、横波運動(姿勢運動)のみを分離して解析できるようにし、計算時間の短縮を計った。

2・2 運動方程式 ケーブルの微小部分に働く諸力を図1に示す。流体抵抗はケーブル法線成分のみが

* 昭和61年3月15日 東海支部第35期総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年5月27日。

** 正員、日本電信電話(株)電気通信研究所 (〒238 横須賀市武1-2356)。

作用するとした。

ケーブル下端よりケーブルに添って s 軸をとる。微小部分の弧長 Δs を零に近づけることにより、ケーブルの運動方程式、

$$\frac{\partial^2 \tilde{x}}{\partial \tilde{t}^2} = \frac{\partial}{\partial \tilde{s}} (\tilde{T} \cos \phi) - \frac{1}{2} C_c \tilde{\rho} \tilde{d} \sin \phi q |q| \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{y}}{\partial \tilde{t}^2} = \frac{\partial}{\partial \tilde{s}} (\tilde{T} \sin \phi) + \frac{1}{2} C_c \tilde{\rho} \tilde{d} \cos \phi q |q| - (1 - \tilde{\rho} \tilde{A}_c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$q = \frac{\partial \tilde{x}}{\partial \tilde{t}} \sin \phi - \frac{\partial \tilde{y}}{\partial \tilde{t}} \cos \phi \quad \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。ここで、 T はケーブル張力、 C_c は抵抗係数、 ρ は水の密度、 d はケーブル径、 A_c はケーブル断面積である。系を代表する長さ、質量および加速度として、それぞれ、ケーブルの全長 L 、ケーブルの全質量 mL と重力の加速度 g をとり次の無次元化を行った。 $\tilde{x} = x/L$ 、 $\tilde{y} = y/L$ 、 $\tilde{s} = s/L$ 、 $\tilde{t} = t/\sqrt{L/g}$ 、 $\tilde{T} = T/mLg$ 、 $\tilde{\rho} = \rho/(m/L^2)$ 、 $\tilde{d} = d/L$ 、 $\tilde{A}_c = A_c/L^2$ 。簡単化のため以下では無次元量を示す $\sim$ を省略する。

ケーブルは伸縮しないと仮定しているので、

$$\left(\frac{\partial x}{\partial s} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial s} \right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \cos \phi, \quad \frac{\partial y}{\partial s} = \sin \phi \quad \dots\dots\dots (5)$$

境界条件はケーブル端に取付けられた物体の運動方程式もしくはケーブル端の拘束条件から得られる。えい航問題の場合には例えば次のようになる。ケーブル下端 ($s=0$) では、

$$M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = T \cos \phi - \frac{\rho C_m A_m}{2} \frac{\partial x}{\partial t} \left| \frac{\partial x}{\partial t} \right| \quad \dots\dots (6)$$

$$M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \sin \phi - \frac{\rho C_m A_m}{2} \frac{\partial y}{\partial t} \left| \frac{\partial y}{\partial t} \right| - M \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、 M は被えい航体の質量、 C_m は被えい航体の抵抗係数、 A_m は被えい航体の代表面積であり、

図1 ケーブルの微小部分に働く力

いずれも無次元化されている。一般に、ケーブル上端 ($s=1$) では、ケーブル運動に影響されず一定速度 V で動くと考えられるので、

$$\frac{\partial x}{\partial t} = V, \quad \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。

2.3 差分近似による解法 $s-t$ 平面を Δs と Δt を周辺とする長方形の網目に分割する。 j と n を整数として、格子点 $(j\Delta s, n\Delta t)$ での関数 f の値を、 $f(j\Delta s, n\Delta t) = f_j^n$ と表す。 s と t に関する微分を次の中心差分で近似する。

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_j^n = \frac{f_j^{n+1} - f_j^{n-1}}{2\Delta t},$$

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right)_j^n = \frac{f_j^{n+1} - 2f_j^n + f_j^{n-1}}{(\Delta t)^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial s} \right)_j^n = \frac{f_{j+(1/2)}^n - f_{j-(1/2)}^n}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(9)、(10)を式(1)～(8)に代入して、差分近似されたケーブルの運動方程式

$$x_j^{n+1} - 2x_j^n + x_j^{n-1} = a (T_{j+(1/2)}^n \cos \phi_{j+(1/2)}^n - T_{j-(1/2)}^n \cos \phi_{j-(1/2)}^n) - \frac{b}{2} (\sin \phi_{j+(1/2)}^n + \sin \phi_{j-(1/2)}^n) q_j^n |q_j^n| \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$y_j^{n+1} - 2y_j^n + y_j^{n-1} = a (T_{j+(1/2)}^n \sin \phi_{j+(1/2)}^n - T_{j-(1/2)}^n \sin \phi_{j-(1/2)}^n) + \frac{b}{2} (\cos \phi_{j+(1/2)}^n + \cos \phi_{j-(1/2)}^n) q_j^n |q_j^n| - c \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$q_j^n = \frac{1}{4\Delta t} (x_j^{n+1} - x_j^{n-1}) (\sin \phi_{j+(1/2)}^n + \sin \phi_{j-(1/2)}^n) - \frac{1}{4\Delta t} (y_j^{n+1} - y_j^{n-1}) (\cos \phi_{j+(1/2)}^n + \cos \phi_{j-(1/2)}^n) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$(x_j^{n+1} - x_{j-1}^{n+1})^2 - (y_j^{n+1} - y_{j-1}^{n+1})^2 = (\Delta s)^2 \quad \dots (14)$$

$$\cos \phi_{j+(1/2)}^n = \frac{x_{j+1}^n - x_{j-1}^n}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\sin \phi_{j+(1/2)}^n = \frac{y_{j+1}^n - y_{j-1}^n}{\Delta s} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$x_0^{n+1} - 2x_0^n + x_0^{n-1} = \frac{(\Delta t)^2}{M} T_{1/2}^n \cos \phi_{1/2}^n - \frac{\rho C_m A_m}{8M} (x_0^{n+1} - x_0^{n-1}) |x_0^{n+1} - x_0^{n-1}| \quad \dots (17)$$

$$y_0^{n+1} - 2y_0^n + y_0^{n-1} = \frac{(\Delta t)^2}{M} T_{1/2}^n \sin \phi_{1/2}^n - \frac{\rho C_m A_m}{8M} (y_0^{n+1} - y_0^{n-1}) |y_0^{n+1} - y_0^{n-1}| - (\Delta t)^2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$x_t^{n+1} - x_t^{n-1} = 2\Delta t \cdot V \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$y_t^{n+1} - y_t^{n-1} = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

が得られる。ここで、 $a = (\Delta t)^2 / \Delta s$ 、 $b = C_c \cdot \rho d (\Delta t)^2 / 2$ 、

$c=(\Delta t)^2 \cdot (1-\rho A_c)$ であり、添字 $j=0$ と l は、それぞれ、ケーブルの下端と上端をしめす。

いま、 $t=n\Delta t$ までの x_j^n, y_j^n が既知であるとする、方程式(11)～(20)は、 $x_j^{n+1}, y_j^{n+1}, T_{j+(1/2)}^n$ を未知数とする連立方程式となる。式(11)～(13)、(15)～(20)を式(14)に代入して x_j^{n+1}, y_j^{n+1} を消去すると、 $T_{j+(1/2)}^n$ に関する連立二次方程式が得られる。これをニュートン・ラフソン法で解き、解 $T_{j+(1/2)}^n$ を式(11)～(13)、(15)～(20)に代入して x_j^{n+1}, y_j^{n+1} をもとめる。この操作を順次繰返すことにより、ケーブル-物体系の非定常運動の解析が可能である。

2.4 解の安定性 フーリエ級数法⁽⁶⁾で演算中の誤差成長をもとめ、差分方程式の解の安定性を調べる。 $t=0$ でフーリエ級数 ($\beta_p=p\pi$) で表される次の誤差が発生したとする。

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j^0 &= \sum_p A_p e^{i\beta_p \cdot j \Delta s} \\ \delta y_j^0 &= \sum_p B_p e^{i\beta_p \cdot j \Delta s} \\ \delta T_j^0 &= \sum_p C_p e^{i\beta_p \cdot j \Delta s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

時間の進展に伴う誤差の成長は、差分方程式(11)～(16)より求めることができる。誤差は微小であるので差分方程式(11)～(16)を線形化し、誤差の成長方程式

$$\begin{aligned} \delta x_j^{n+1} - 2\delta x_j^n + \delta x_j^{n-1} &= a \{ \delta T_{j+(1/2)}^n \cos \phi_{j+(1/2)}^n + T_{j+(1/2)}^n \delta \cos \phi_{j+(1/2)}^n - \delta T_{j-(1/2)}^n \cos \phi_{j-(1/2)}^n \\ &\quad - T_{j-(1/2)}^n \delta \cos \phi_{j-(1/2)}^n \} - \frac{b}{2} \{ (\delta \sin \phi_{j+(1/2)}^n + \delta \sin \phi_{j-(1/2)}^n) q_j^n |q_j^n| + 2(\sin \phi_{j+(1/2)}^n \\ &\quad + \sin \phi_{j-(1/2)}^n) |q_j^n| \delta q_j^n \} \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta y_j^{n+1} - 2\delta y_j^n + \delta y_j^{n-1} &= a \{ \delta T_{j+(1/2)}^n \sin \phi_{j+(1/2)}^n + T_{j+(1/2)}^n \delta \sin \phi_{j+(1/2)}^n - \delta T_{j-(1/2)}^n \sin \phi_{j-(1/2)}^n \\ &\quad - T_{j-(1/2)}^n \delta \sin \phi_{j-(1/2)}^n \} + \frac{b}{2} \{ (\delta \cos \phi_{j+(1/2)}^n + \delta \cos \phi_{j-(1/2)}^n) q_j^n |q_j^n| + 2(\cos \phi_{j+(1/2)}^n \\ &\quad + \cos \phi_{j-(1/2)}^n) |q_j^n| \delta q_j^n \} \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta q_j^n &= \frac{1}{4\Delta t} \{ (\delta x_j^{n+1} - \delta x_j^{n-1})(\sin \phi_{j+(1/2)}^n + \sin \phi_{j-(1/2)}^n) + (x_j^{n+1} - x_j^{n-1})(\delta \sin \phi_{j+(1/2)}^n + \delta \sin \phi_{j-(1/2)}^n) \} \\ &\quad - \frac{1}{4\Delta t} \{ (\delta y_j^{n+1} - \delta y_j^{n-1})(\cos \phi_{j+(1/2)}^n + \cos \phi_{j-(1/2)}^n) + (y_j^{n+1} - y_j^{n-1})(\delta \cos \phi_{j+(1/2)}^n + \delta \cos \phi_{j-(1/2)}^n) \} \dots (24) \end{aligned}$$

$$(x_j^{n+1} - x_j^{n+1}) (\delta x_j^{n+1} - \delta x_j^{n+1}) + (y_j^{n+1} - y_j^{n+1}) (\delta y_j^{n+1} - \delta y_j^{n+1}) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

$$\delta \cos \phi_{j+(1/2)}^n = \frac{1}{\Delta s} (\delta x_{j+1}^n - \delta x_j^n) \dots\dots\dots (26)$$

$$\delta \sin \phi_{j+(1/2)}^n = \frac{1}{\Delta s} (\delta y_{j+1}^n - \delta y_j^n) \dots\dots\dots (27)$$

を得る。誤差の成長方程式が線形であり解の重ねあわせが可能なので、以降ではフーリエ級数の一成分のみを扱うこととし、添字 p を省略する。 $t=n\Delta t$ での誤差を

$$\left. \begin{aligned} \delta x_j^n &= A e^{i\beta \cdot j \Delta s + \alpha n \Delta t} \\ \delta y_j^n &= B e^{i\beta \cdot j \Delta s + \alpha n \Delta t} \\ \delta T_j^n &= C e^{i\beta \cdot j \Delta s + \alpha n \Delta t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

として、誤差の成長方程式(22)～(27)に代入する。 $\alpha' = \alpha \cdot \Delta t$, $\beta' = \beta \cdot \Delta t$ とする。 $T_{j+(1/2)}^n = T_j^n + \Delta_1$, $T_{j-(1/2)}^n = T_j^n - \Delta_1$ ($\Delta_1 \ll T_j^n$); $\sin \phi_{j+(1/2)}^n = \sin \phi_j^n + \Delta_2$, $\sin \phi_{j-(1/2)}^n = \sin \phi_j^n - \Delta_2$ ($\Delta_2 \ll \sin \phi_j^n$); $\cos \phi_{j+(1/2)}^n = \cos \phi_j^n + \Delta_3$, $\cos \phi_{j-(1/2)}^n = \cos \phi_j^n - \Delta_3$ ($\Delta_3 \ll \cos \phi_j^n$) と近似して微小項を無視すると、

$$\lambda A + \mu \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_j \sin \phi_j^n \cdot B - \nu \cos \phi_j^n C = 0 \dots (29)$$

$$\mu \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)_j \cos \phi_j^n \cdot A + \lambda B - \nu \sin \phi_j^n C = 0 \dots (30)$$

$$\cos \phi_j^n \cdot A + \sin \phi_j^n \cdot B = 0 \dots\dots\dots (31)$$

ここで、

$$\lambda = e^{\alpha'} - 2 + e^{-\alpha'} + 4 T_j^n \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \sin^2 \frac{\beta'}{2}$$

$$\mu = 2i\eta |q_j^n| \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \sin \beta'$$

$$\nu = 2i \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \sin \frac{\beta'}{2}$$

$$\eta = C_0 \rho d / 2$$

が得られる。式(29)～(31)が自明でない解をもつためには、

$$\begin{aligned} &\left\{ e^{\alpha'} - 2 + e^{-\alpha'} + 4 T_j^n \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \sin^2 \frac{\beta'}{2} \right\} \\ &\quad - i\eta |q_j^n| \frac{(\Delta t)^2}{\Delta s} \sin 2\phi_j^n \sin \beta' \left\{ \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_j \sin \phi_j^n \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)_j \cos \phi_j^n \right\} = 0 \dots\dots\dots (32) \end{aligned}$$

でなければならない。式(32)で第2項は第1項に比べて無視できるので、 $\xi = \exp(\alpha \cdot \Delta t)$ とおいて

$$\xi^2 - 2 \left\{ 1 - 2 \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 T \sin^2 \frac{\beta'}{2} \right\} \xi + 1 = 0 \dots\dots (33)$$

となる。差分方程式の解が安定なためには、

$$|\xi| \leq 1 \dots\dots\dots (34)$$

でなければならない。式(33)が任意の β に対して式(34)を満たす解をもつためには、

$$\frac{\Delta T}{\Delta s} \leq \sqrt{\frac{1}{T}} \dots\dots\dots (35)$$

が、必要十分条件である。したがって、式(35)を満足するように、格子間隔 Δs と Δt を選べば、差分方程式は安定な解をもつ。 Δs を小さくすれば計算精度が良くなるが、解の安定性条件より Δt も小さくする必要があり計算時間が長くなる。

特性曲線の伝ば速度は、縦波が $C_t = \sqrt{A_c E}$ 、横波が $C_t = \sqrt{T}$ である⁽¹⁾。ただし、 E は無次元化されたケーブルの弾性係数である。したがって、計算精度からある Δs が与えられて、特性曲線法で安定な解を得るためには、

$$\frac{\Delta t}{\Delta s} \leq \frac{1}{C_t} = \sqrt{\frac{1}{A_c E}} \dots\dots\dots (36)$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta s} \leq \frac{1}{C_t} = \sqrt{\frac{1}{T}} \dots\dots\dots (37)$$

の両式を満たすように Δt を選ぶ必要がある⁽⁶⁾。一般に、 C_t は C_t の 10 倍程度であり、特性曲線法の計算時間は縦波の安定条件〔式(36)〕で決定される。一方、本解析法の安定条件式(35)は、特性曲線法の横波の安

定条件式(37)と一致しているので、本解析法は特性曲線法に比べ計算時間が約 1/10 ですむことがわかる。

3. 検証実験

3.1 実験装置

本論文の解析手法の有効性を検証するため、図 2 に示す実験装置を用いて、床面から乾性摩擦を受ける物体のけん引実験を行った。曲げ剛性や伸縮性による影響を除くため、鎖を用いてけん引した。被けん引物体に搭載された加速度計と鎖上端に取付けられた張力計により、物体の加速度とけん引張力を測定した。ベルトにより駆動される移動体の高さは 95 cm であり、移動距離は 2 m である。

床の材質はアクリル樹脂板を用い、摩擦力の再現性を向上するため物体の底面には木綿布をてん付した。摩擦係数の速度依存性を図 3 に示す。静止最大摩擦係数は約 0.6 であった。動摩擦係数はほぼ 0.35 であり、すべり速度の増加とともに微量の増加がみられた。両摩擦係数のばらつきは数%であった。静止摩擦係数はばね定数の小さいばねを介して物体を非常にゆっくり引っ張り、物体が滑り出す時の力から求めた。動摩擦係数は、物体を斜面に沿って滑らせて、物体の加速度から測定した⁽⁷⁾。

3.2 実験結果

物体の加速度およびけん引張力の時間変動の一例を図 4 に示す。実線と破線は、それぞれ、計算値と実測値である。条件は物体質量：1.006 kg、鎖の線密度：0.185 kg/m、鎖の長さ：1.9 m、けん引速度：5 cm/s である。差分の刻み幅は、 Δs ：0.05、 Δt ：0.03 とした。物体は間欠運動いわゆるスティックスリップ運動を行っており、鎖がばねとして作用していることがわかる。なお本例の計算時間は、0.5 MIPS の計算機で約 10 min であった。

間欠運動の周期と物体質量の関係を図 5 に示す。○、●印は実験値、実線は計算値である。実験・計算条件を

図 2 けん引実験装置

図 3 摩擦係数の速度依存性

図 4 物体のけん引運動

図5 物体質量と間欠周期の関係

図6 物体質量とけん引力変動幅の関係

表1に示す。運動周期と質量はそれぞれ $t/\sqrt{L/g}$ と mL で無次元化している。鎖の質量 mL が増えるに従って間欠運動周期が長くなっており、鎖が付加質量として働いていることがわかる。物体質量 M が大きくなると周期が短くなっている。このことから、大きなけん引力を得るため鎖の姿勢が直線に近くなると、鎖の等価ばね定数が増加することがわかる。

けん引張力変動幅と物体質量の関係を、実験値を○、●印、計算値を実線を用いて図6に示す。実験・計算条件を表1に示す。張力変動幅と物体質量 M は、それぞれ、 mLg と mL で無次元化した。変動幅と物体質量 M は線形関係にあることがわかる。実験値が計算値に比べて小さくなっているのは、鎖の環間の摩擦のため系のエネルギーが散逸され、散逸エネルギーを補うため図3に示されるようにけん引張力の最低値が大きくなるためと考えられる。

図4～6に示されるように計算値と実験値は非常に良く一致しており、本論文で提案したモード分離法が物体-ケーブル系の運動解析に十分な有効性をもっていることが確認された。

表1 実験計算条件

Chain length	1.9 m
Towing velocity	5 cm / sec
Mass per unit length of chain	A-chain : 0.185 kg / m B-chain : 0.133 kg / m
Mass of towed body	656 ⁽¹⁾ , 806 ⁽¹⁾ , 856 ⁽²⁾ 956, 1006, 1056 g

Towed bodys⁽¹⁾ were used only in case of A-chain, towed body⁽²⁾ was used only in case of B-chain.

4. ま と め

ケーブルと物体から構成される系においては、ケーブルの姿勢情報を伝える横波と伸縮情報を伝える縦波の伝ば速度が1けた程度異なっており、姿勢運動と伸縮運動が物理的に独立な運動モードと見なすことができる。このことに注目してケーブルの弾性定数が無限大と仮定することにより、横波運動を縦波(伸縮)運動から分離して取扱うモード分離法を提案した。フーリエ級数法により差分近似数値計算解の安定性を調べ、本解析法が従来報告されている特性曲線法に比べ計算時間を約1/10に節減できることを明らかにした。模型を用いたけん引実験結果は計算結果と非常に良く一致しており、本解析法の妥当性を確認した。

係留やえい航システムの開発において最も重要な問題である係留物やえい航体の安定性は、ケーブル-物体系の姿勢で主に決定されるので、本解析法はシステムの設計において有効な手法である。なお、縦波(伸縮波)の共振現象によるケーブルの破断などの検討については、本解析法で求めたケーブル姿勢を仮定して伸縮波の伝ばを解析すればよいと考えられる⁽⁸⁾。

おわりに、本研究を進めるにあたり終始ご指導頂いたNTT茨城研究所 森光調査役、有益なご助言を頂いた横須賀研究所 野村調査役(元幹海室長)、吹抜幹海室長、北沢調査員、西調査員に深謝いたします。また、日頃ご指導頂く伝送処理研究室 青山室長、鶴沢調査役、辻調査役に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Huffman, R. R., The Dynamical Behavior of an Extensible Cable in a Uniform Flow Field, *Aeronaut. Q.*, 22-2 (1971), 183-195.
- (2) Nath, J. H. and Felix, M. P. Dynamics of Single Point Mooring in Deep Water, *J. of Waterway & Harbors, ASCE*, 96-WW4, Paper 7700 (1970), 815-833.
- (3) Kerney, K. P., Small-Perturbation Analysis of Oscillatory Tow-Cable Motion, *Naval Ship Center, Rep.* 3430, (1971).

- (4) Wilson, B. W., Dynamics of Ship-Anchor Lines in Waves and Currents, J. of Waterway & Harbors ASCE, 95-WW4, Paper 6888 (1969), 449-465.

(5) Reid, R. O., Dynamics of Deep-Sea Mooring Lines, Project 204, Ref. 68-11 F, Dept. Oceanography, Texas A & M Univ, (1968).
 - (6) Smith, G. D., *Numerical Solution of Partial Differential Equations*, (1965), Oxford Univ. Press.

(7) 角田, 動摩擦係数測定方法, 特許第 1146134 号 (昭 57).

(8) 角田, 海底光ケーブル布設時の変動張力の一推定法, 信学会昭和 56 年度全国大会講演論文集, No. 1908 (昭 56).
-