

外洋に面した海浜上にある係船浮標の挙動について

重村 利幸*・林 建二郎**・神崎 智志***

1. まえがき

東京都下の硫黄島には未だ港湾がない。このため、同島に駐屯する海・空自衛隊では島の西海岸の沖合に4基の係船浮標(6t(58.8kN)のこま型ブイ、沈錘びょう鎖式)を設置し、不定期に来島するタンカーや貨物船の係留に使用している。

これら係船浮標の設置に際しては事前に既存の設計例等について十分な検討がなされたようであるが、設置場所が外洋に面したところであるため、過去10年間においても、台風時にはハーブシャックルの逸脱や浮体鎖の切断等の事故が数度、発生している。これらの事故は外洋に面した海浜上に係船浮標の設置を計画する場合には、係船時の安全性についてよりも、むしろ異常気象及び海象下における浮体や係留鎖の動的な挙動及び係留鎖に生ずる張力等について十分に検討しなければならない事を示唆している。

そこで、本研究では外洋に面した浅海域に設置される係船浮標を念頭におき、比較的大きな波浪を受ける非係留時の浮標の挙動ならびに係留鎖に生ずる張力について規則波を用いた模型実験を行ない、併せて簡単なモデルによる浮体の動的挙動のシュミレーションを試みる。

2. 浮体の運動方程式と数値解析

(1) 係留鎖に生ずる静的張力の算定式

係留鎖に生ずる静的な張力は鎖の長さ、水深及び浮体のアンカー点からの変位等の相対的な大きさによって、それぞれ、図-1に示すような3通りの場合に分けて算定される。すなわち、係留鎖が浮体の真下に垂れ下がっている状態(①)、アンカー点の近傍で鎖の一部が長さ a だけ海底を這っている状態(②)並びに、全長にわたって水中に浮かび、アンカー点の近傍で海底と θ_a なる角度を有する状態(③)に分類して算定される。

庄司¹⁾は上記3通りの場合に対して、係留鎖の弾性変形を考慮に入れた張力算定式を誘導した。ただし、この

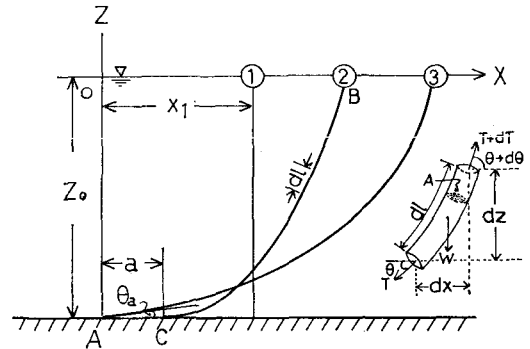


図-1 係留鎖の展張状態

式は張力に関する高次方程式に展開して表わされているため、解の判定にやや難点があること、並びに②の状態に対する張力算定式の誘導に一部不明確な点がある。そこで、本研究では庄司の方法とまったく同じ方法で上記3通りの状態にある係留鎖の張力算定式を導びき直し、高次方程式に展開しない形で残す事にする。

図-1の右端には②の状態にある係留鎖上の微小部分 dl の応力状態が模式的に示してある。図中、 A は係留鎖の断面積、 T は張力を示す。いま、 dl の変形前の長さを dS とし、 E を弾性係数とすると、両者の間には

$$dl = (1 + T/EA)dS \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係が成り立つ。また、 dl と dx 及び dz の間には

$$dx = dl \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$dz = dl \sin \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が近似的に成り立つ。次いで dl 上において、静的な力の均合いを考えると、水平及び垂直方向には、それぞれ、次の関係式が成り立たなければならない。

$$\Sigma H = (T + dT) \cos(\theta + d\theta) - T \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Sigma V = (T + dT) \sin(\theta + d\theta) - T \sin \theta - W dS = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 W は係留鎖の単位長さ当りの水中重量である。

いま、 $d\theta \ll \theta$ とし、二次以上の微小項の積を無視すると、(4)及び(5)式は、それぞれ次式のように整理され

* 正会員 Dr.Eng. 防衛大学校教授 土木工学教室

** 正会員 Ph.D. 防衛大学講師 土木工学教室

*** 海上自衛隊幹部候補生学校

る。

$$Td\theta = W \cos \theta dS \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$dT = W \sin \theta dS \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、全張力 T とその水平及び垂直方向成分 T_x 及び T_z の間には、次の関係式が成り立つ。

$$T_x = T \cos \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T_z = T \sin \theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

(1)及び(8)式を(2)式に代入すると

$$dx = T_x/T ds + T_x/EA dS \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。また、(6)、(8)式及び(9)式から T_z は $W(l-a')$ となる。従って、全張力 T は次式で与えられることになる。

$$T = \sqrt{T_x^2 + \{W(l-a')\}^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 a' 及び l はアンカー点から測った C 点及び BC 間の任意点までの変形前の長さである。(11)式を(10)式に代入して A 点から B 点まで積分すると、浮体変位 x 、鎖の長さ S 及び水平張力 T_x の間に次のような関係式が得られる。

$$\begin{aligned} x = & S(1 + T_x/EA) - (S - a') \\ & + \frac{T_x}{W} \ln \left\{ \frac{W}{T_x} (S - a') + \sqrt{\left\{ \frac{W(S - a')}{T_x} \right\}^2 + 1} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

z_0 についても (1) 及び (9) 式を (3) 式に代入し、同様な操作を行なうと

$$\begin{aligned} z_0 = & \sqrt{\left\{ \frac{T_x}{W} \right\}^2 + (S - a')^2} - T_x/W \\ & + \frac{W}{2EA} (S - a')^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

が得られる。なお、この時の係留鎖の頂部における T_z は次式から算定される。

$$T_z = W(S - a') \quad \dots\dots\dots (14)$$

従って、浮体の変位 x に対して係留鎖の頂部に生ずる水平及び垂直方向の張力、 T_x 及び T_z は、(12)、(13) 及び(14)式から、 a' を任意に与える事により、簡単に定める事ができる。

また、浮体の変位が大きくなり、係留鎖が③の状態になった場合にも、上記とまったく同様な操作によって、以下に示すような関係式が得られる。

$$\begin{aligned} x = & \frac{T_x S}{EA} + \frac{T_x}{W} \left\{ \ln \left[\tan \theta_a + \frac{WS}{T_x} \right. \right. \\ & \left. \left. + \sqrt{\left(\tan \theta_a + \frac{WS}{T_x} \right)^2 + 1} \right] \right. \\ & \left. - \ln \left[\tan \theta_a + \sqrt{(\tan \theta_a)^2 + 1} \right] \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} z_0 = & \frac{T_x}{W} \left\{ \sqrt{\left(\tan \theta_a + \frac{WS}{T_x} \right)^2 + 1} - \sqrt{(\tan \theta_a)^2 + 1} \right. \\ & \left. + \frac{WS}{EA} \left(\tan \theta_a + \frac{WS}{2T_x} \right) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (16)$$

なお、この時の T_z は次式で与えられる。

$$T_z = T_x \tan \theta_a + WS \quad \dots\dots\dots (17)$$

従って、この場合にも浮体の変位 x に対して、係留鎖の頂部における各張力成分、 T_x 及び T_z は θ_a を任意に与える事によって、(15)、(16)及び(17)式から簡単に定めることができる。

一方、係留鎖が①の状態にある場合には T_x は当然ゼロとなる。また、 T_z は垂れ下がりの部分の変形前の長さに対する水中重量となるから、次式で算定される。

$$T_z = Wz_0(1 - z_0/2EA) \quad \dots\dots\dots (18)$$

なお、①から②及び②から③の状態へ移行する際の浮体変位の限界を、それぞれ x_1 及び x_2 とすると、

$$x_1 = S - z_0 + Wz_0^2/2EA \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\begin{aligned} x_2 = & \frac{T_x S}{EA} + \frac{T_x}{W} \ln \left\{ \frac{WS}{T_x} + \sqrt{\left(\frac{WS}{T_x} \right)^2 + 1} \right\} \\ & \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

となる。

(2) 浮体の運動方程式

一般に係留浮体は三次元の複雑な運動をするが、本研究では簡単なモデルでどの程度、浮体の挙動をシュミレートできるかを知る意味もあり、以下の仮定の下に運動方程式を誘導する。

- 浮体は二次元運動をし、 xz 面内では回転しない。
- 係留鎖に生じる張力は先きに述べた静的張力で評価できる。
- 係留鎖の動的な挙動は考えない。
- 外力には変動浮力その他、風力及び波力を考える。

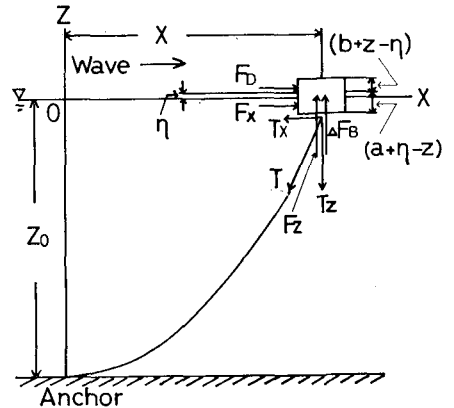


図-2 浮体に作用する外力と解析に用いる座標系

図-2 は時刻 t における浮体の位置、作用外力並びに解析に用いる座標系を示す。この図を参考にして、上記の仮定の下で浮体の運動方程式を求めると、次の2式が得られる。

$$(m + mx') \ddot{x} = F_D + F_x - T_x - C_x \dot{x} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$(m + mz') \ddot{z} = F_z - T_z + \Delta F_B - C_z \dot{z} \quad \dots\dots\dots (22)$$

上式中、 m は浮体の質量、 mx' 及び mz' は浮体の付

加質量, F_D は風力, F_x 及び F_z は水平及び鉛直方向に作用する波力の成分, ΔF_B は波面の変動と浮体の変動との位相差によって生ずる変動浮力, C_x 及び C_z は水平及び鉛直方向の減衰係数を表わし, T_x 及び T_z は係留鎖の頂部における張力の水平及び垂直方向成分を示す。

さて, 上記の2式中, 風力 F_D は空気密度を ρ_a , 風速を V , 浮体の直径を D , 静止時の乾舷高を b , 波面水位を η , 浮体の上昇高さを z , 抗力係数を C_d とすれば, 次式から算定できる。

$$F_D = 0.5 \rho_a C_d D (b + z - \eta) V^2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

また, 波力の算定にはモリソン式を使うことにすれば, F_x 及び F_z は, それぞれ次式から算定できる。

$$F_x = C_{Dx} \cdot \frac{1}{2} \rho_w D (a + \eta - z) u |u| + C_{Mx} \cdot \frac{1}{4} \rho_w \pi D^2 (a + \eta - z) \dot{u} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$F_z = C_{Dz} \cdot \frac{1}{2} \rho_w \cdot \frac{1}{4} \pi D^2 v |v| + C_{Mz} \cdot \frac{1}{4} \rho_w \pi D^2 (a + \eta - z) \dot{v} \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに, C_{Dx} , C_{Dz} 及び C_{Mx} , C_{Mz} は, それぞれ水平及び垂直方向に運動をする時の浮体の抗力係数及び質量係数を示し, u, v 及び $\dot{u}, \dot{v}$ は水粒子の水平及び垂直方向の速度及び加速度成分, a は静水時の浮体の吃水高を表わす。

また, 変動浮力 ΔF_B は次式で評価される。

$$\Delta F_B = \frac{1}{4} \rho_w \pi D^2 (a + \eta - z) \quad \dots\dots\dots (26)$$

従って, 適当な波動理論によって波動による流れ場を推定すれば(21)及び(22)の両運動方程式の右辺各項は任意時刻において定めることができる。

3. 模型実験

模型実験は現在, 硫黄島に設置されている係船浮標を対象に選り縮尺を1/35として行なうことにした。表-1には現地にある浮体及び係留鎖の諸元と使用した模型の寸法が示してある。

表-1 浮体及び係留鎖の諸元と模型寸法

	浮体外径	浮体高さ	設置水深	係留鎖径	係留鎖長
現 地	2.74 m	1.83 m	11.0 m	68 mm	20.0 m
模 型	8.0 cm	5.6 cm	45.7 cm	1.9 mm	58.0 cm

なお, 模型の形状は簡単のために同筒型とし, アクリルパイプ及びアクリル板で作製した。ただし, 現地浮標は自重が3t(29.4kN)であるため, 浮体模型の内部には多少のパラストを貼りつけ, 重さ70g(0.686N)と

した。一方, 係留鎖には市販の鉄製鎖りを用いた。ただし, 鎖の長さは58cmの他に92cmのものも併せて用意した。

さて, 実験は長さ39.6m, 幅0.6m, 高さ0.8mの両面ガラス張り造波水槽を用いて行なうことにした。図-3は浮体の取付け状況を示す。すなわち, 浮体模型の下面中央部にはフックを設け, これに水密型の小型張力計(三計エンジニアリング社製, LT-6-05型, 最大出力500g(4.9N))を取り付けた。次いで, 張力計の他端に係留鎖の模型を取りつけ, その他端を水路床中央部に固定した。また, 風荷重については実験中, 一定の風速をもつ強風が吹いていると仮定し, 40m/sの風に相当する等価荷重として12.9gの重りを釣糸を介して浮体中央部の吃水線上に載荷した。静水時の浮体の真横には容量式波高計も設置し, これら計測器の出力はペンレコーダーで記録することにした。また, 水槽の外部にはビデオカメラを設置し, 浮体及び係留鎖の挙動を記録することにした。

実験波には周期が1.0s, 1.6s及び2.2sの3種類, 波高が3cmから17cmにまたがる合計24種の波を用意した。これら作用波の波形勾配は0.03から0.09の範囲である。実験は水深45.7cmと一定にし, 先きに述べた2種の長さをもつ係留鎖に接続された浮体模型に対して各実験波を作用させて実施した。

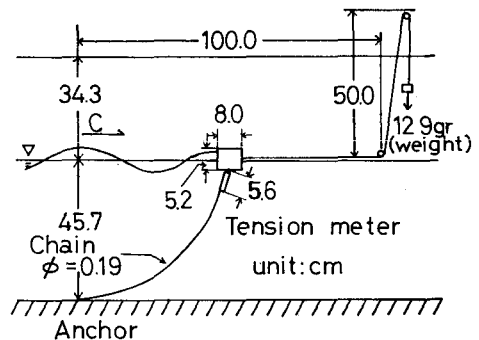


図-3 実験装置

4. 実験結果及び考察

(1) 張力算定式の精度

実験に先き立ち, 張力計の静的検定を行なった。検定は水深を35.7, 45.7及び52.0cmの3通りに変え, 各水深毎に浮体に静的変位を与えながら鎖の上端に生ずる張力を測定した。図-4は先きに示した張力の各算定式から求めた計算張力 T_x と, 実測値から換算した T_x とを比較したものである。ただし, T_x の算出にあたっては弾性係数 E の値を 2.1×10^6 kg/cm² (2058 Pa)と仮定した。

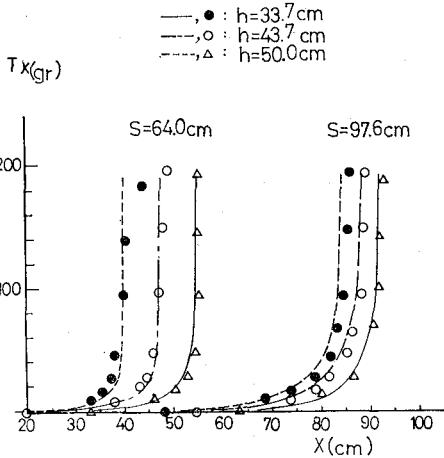


図-4 計算張力と実測張力の比較 (T_x)

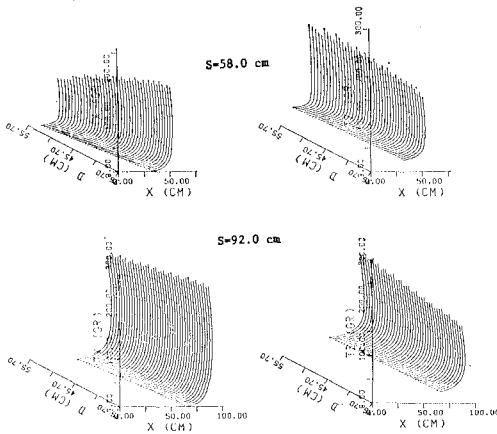


図-5 係留鎖に作用する張力成分 T_x , T_z の計算値

図中, S は係留鎖の長さであり, h は係留鎖上端までの水深である. この図から両係留鎖長の場合とも, 3 種の線で示した計算張力は記号で示した実測張力と極めて満足すべき精度で一致することが明らかになった. この事は先き求めた張力の各算定式が十分に使える事を示唆しているものと思われる.

図-5 は両係留鎖に対して, 水深 D を 35.7 cm から 55.7 cm まで 5 mm 毎に変えた時に浮体に与えた変位に対する張力の各成分 T_x 及び T_z を先きの算定式から算出したものである. これは後に浮体の運動方程式を解く際に用いるものである.

(2) 浮体の挙動と係留鎖の端部に生ずる張力

浮体の挙動をシュミレートするために(24)式から(26)式で与えられる波力成分及び変動浮力は微小振幅波理論を用いて算定することにし, これと先きの張力の計算値を用いて, (21)及び(22)式で表わされる運動方程式をルンゲ・クッタ・ジル法で解く事にした. ただし, 実際の

表-2 浮体運動の減衰係数 C_x 及び C_z の値

係留鎖長	C_x	C_z
58.0 cm	1.6 g·s/cm	0.8 g·s/cm
92.0 cm	2.0 g·s/cm	0.6 g·s/cm

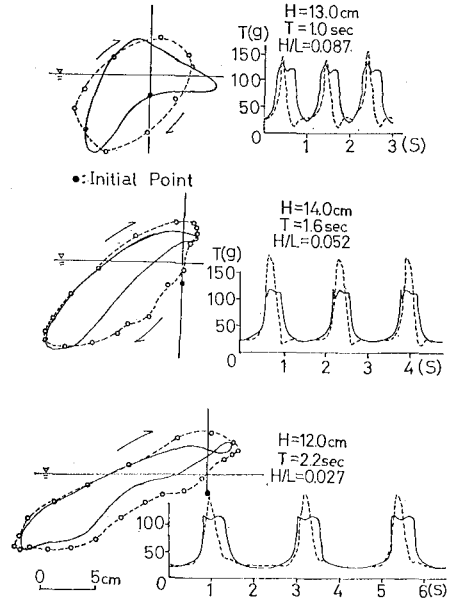


図-6 浮体の軌跡と全張力 T の変動 ($S=58$ cm)

計算においては運動方程式の中に含まれている m_x' 及び m_z' は共に浮体の没水部が排除した水の質量とし, 波力式中に含まれる C_{Dx} 及び C_{Dz} は共に 1.0, C_{Mx} 及び C_{Mz} は共に 2.0 と仮定した. また, 運動式中の減衰係数 C_x 及び C_z については庄司の用いた値を一応の目安とし, x 及び z 方向への浮体変位の計算値が実測値に近い値をとるまで, 種々変えながら試行錯誤的に定めた. その結果, 表-2 に示すような値を用いることにした.

計算は刻み幅を 0.02 秒とし, 作用波周期の 20 波分以上にわたって継続した. 図-6 は係留鎖の長さが 58 cm の場合の浮体の軌跡と係留鎖の頂部に生ずる全張力 T の計算値をそれぞれの実測値と比較したものである. また, 図-7 は同じく係留鎖長が 92 cm の場合の比較である. これら両図とも, 実測値は点線で, また計算値は実線で示してある.

これらの図から明らかな様に(21)及び(22)式は多くの仮定の下に導びいた運動方程式であるにも拘らず, 波形勾配の著しく大きい場合を除いて浮体の挙動をほぼ忠実にフォローしている事が判る. また, 計算張力も, 実測張力の変動パターンをほぼ忠実に再現している事が判る.

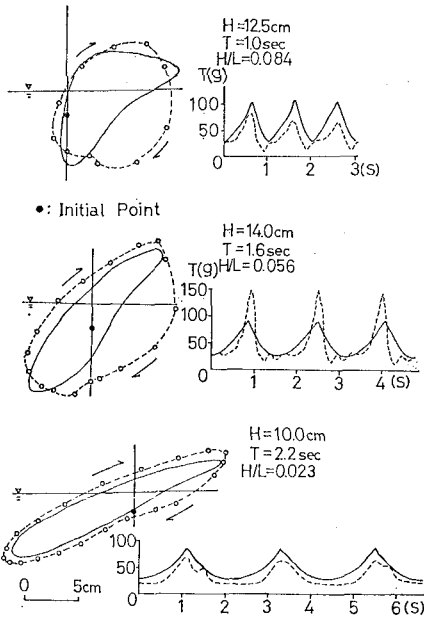
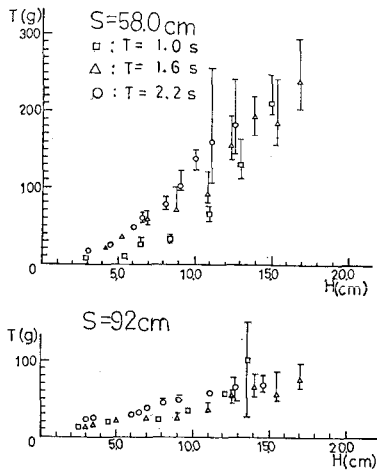

 図-7 浮体の軌跡と全張力 T の変動 ($S=92\text{ cm}$)


図-8 最大全張力と作用波との関係

る。ただし、計算張力は全般的に張力のピーク値を過小評価しており、更に張力の立ち上がり点及びピーク値が現われる点の近傍では実際の変動パターンを必ずしも忠実に再現していない。これは演算の過程で設けた多くの仮定や本モデル本来の不備に帰因するものと考えられるので、今後更に検討を要する点である。

さて、図-8 は浮体に作用する全張力 T のピーク値

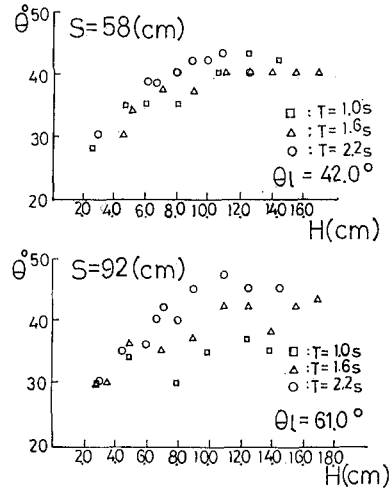


図-9 係留鎖の頂部における傾斜角と作用波の関係

の平均ならびにその分散幅を作用波の周期をパラメーターとして波高に対してプロットしたものである。実験データも多くなく、整理方法ももっとうまい方法があると思われるが、この図から両係留鎖長の場合とも、波高が大きくなり、波形勾配が増大するにつれて係留鎖の頂部に生ずる張力は非線型的に増大すること、並びに張力の増大の割合は水深に対して係留鎖が長い程、小さい事も判る。

図-9 は最大張力が生じた時の係留鎖が静水面に立てた垂線 (z 軸) となす角度を、同じく作用波の波高に対してプロットしたものである。なお、図中の θ_l は傾斜角の仮想上の限界角を示す。この図から、 $S=58\text{ cm}$ の場合には波高がある値以上になると傾斜角 θ は、ほぼ限界値の θ_l に達することが判った。

5. おわりに

係留浮体の挙動及び係留鎖の頂部に作用する張力について、浮体が二次元運動をすると仮定して運動方程式を求め、同方程式の適用性を実験的に検討した。その結果、浮体の挙動及び張力は、これらの方程式によって、ほぼ満足できる精度で予測できる事を確かめた。同方程式を用いたハーブシャクルの逸脱事故に関する検討結果は講演会で報告したい。

参考文献

- 1) 庄司邦昭：係留浮体の運動と係留索の張力に関する研究，日本造船学会論文集第138号，pp. 233~246, 1975.