

波浪による延縄式養殖施設の動的応答

松原 雄平*・野田 英明**・田中英利***

1. ま え が き

わが国の周辺海域、特に波浪の静穏な内湾域には、魚介類の養殖を目的とした各種の水産構造物が設置されている。しかしながら近年の内湾域での汚染や養殖施設の設置空間の逼迫化から、沖合域を新たな養殖漁場として利用する試みが注目されている。従来から貝類の養殖に広く使用されてきた延縄式養殖施設も、その幾つかが上述の理由から外海域に設置されるようになってきているが、一方では外海の波浪や潮流が原因と思われる流失や破損の事例も数多く報告され大きな漁業被害を生じている。このような波浪による延縄式養殖施設の動的応答に関して、すでに著者らは離散化質量要素法による波浪応答解析モデルを提案し、その算定精度について室内実験あるいは現地での動揺観測の結果と比較して検証してきた^{1),2)}。これまでの実験的ならびに理論的検討から多くの知見を得ることができたが、従来の応答計算モデルでは、必ずしも全ての実験結果を説明するまでに至っておらず、とくにある条件下では解の収斂が遅かったり、あるいは発散する場合があった。そこで、この論文では、有限要素法によって養殖施設を等価なケーブルモデルに置き換えた波浪応答モデルを導くとともに、従来の結果と比較し、その妥当性を検証する。さらに、こうしたモデルは延縄式養殖施設の波浪動揺を厳密にモデル化し定式化したものであるが、複雑な数学的取り扱いを必要とするために必ずしも実用的ではないという観点から、より実用的な応答解析モデルを誘導し、模型実験ならびに現地観測の結果と比較し、精度を検証するものである。延縄式養殖施設の概要と従来の応答計算モデル延縄式養殖施設については、前報¹⁾で述べているので詳細は省くが、図-1に示すように、施設はスパン約200mのメインロープ部ならびにアンカーロープ部からなり、メインロープには中間ブイならびに養殖具を収める籠が等間隔に係留されている。養殖籠自体の浮力は小さいため、浮力作用のブイで水中に長期間、潜水係留し無給餌養殖を

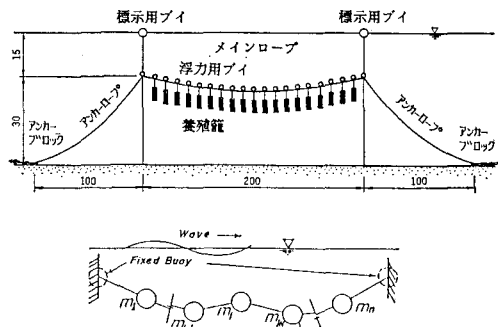


図-1 延縄式養殖施設と計算モデル

行おうとするものである。図からもわかるように両端のアンカーロープを除いてメインロープには動揺を拘束するようなロープを着けられないために、表面波の影響をうけて動揺しやすい。したがって施設の動揺によって、養殖物が損傷を受けることになる。そこで施設動揺量と来襲波浪特性との関係を明らかにするために前報では、この施設を離散化された質量要素で置換した多自由度系の応答計算モデルを誘導した。これはメロンロープから懸垂された養殖籠ならびにブイを一つの質量要素に置き換え、籠ならびにブイに作用する波力および重力を、球形要素に作用する流体力として考え、要素間のロープによる拘束条件とともに自多自由度系の運動方程式を解くものである。この応答モデルによる計算結果と実験結果の比較から、ほぼ満足しうる精度を有することが明らかとなったが、ある特定の条件では収斂する時間が極めて長かったり、あるいは発散する場合があり、すべての波浪条件に対して安定な解を得ることができなかった。これは、施設のモデル化に含まれる拘束条件の取り扱い方ならびにモデル化に問題があったものと考えられ、そこで、ここでは全く異なる計算法で応答問題を考える。

2. 有限要素法による波浪応答計算モデル

運動方程式の透導

従来、流体の運動場や構造物に作用する流体力の解析に関しては、有限要素法を用いた例は少なくない。とくに係留系の解析として吉田らは、3次元要素を用いた有限要素法を採用していくつかの係留チェーンの解析結果

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

*** 正会員 工修 昭和電気建設株式会社

を示している⁴⁾。これは比較的単純なケースに対する計算結果のみで実験値との比較はなされていない。また福元らは、3節点アイソパラメトリック要素を用いてチェーンの応答計算法を示し、曳航索ならびにアンカードロップの問題に対し計算結果と実験結果の比較を行って、その妥当性を検証している⁵⁾。ここでは、こうした研究成果を参照しつつ、延縄式養殖施設の応答解析に適用を試みる。実際の延縄施設では、貝の成長とともに浮子の数を増し、メインロープ部にかかる籠の水中重量がほとんど0 kgf となるようにバランスさせる。そこで、本論文ではメインロープ部を水中重量0 kgf のケーブルによって置き換え、アンカロープ部との組み合わせによりこの施設の動的応答を解く。まず、メロンロープ部の運動方程式を誘導するに先だって以下の基礎仮定を設けた。

- 仮定 1) 波は、微小振幅波理論で表せる。
- 2) 施設は、波向きに平行に係留されている。
- 3) メロンロープ部に作用する流体力は、ケーブルに作用する流体力で代用される
- 4) ケーブルの運動は、波の進行方向を含む二次元平面内に限られる。
- 5) 両端ブイの水平ならびに鉛直方向の変位は微小で、一種の固定端とみなす。

図-2 は、延縄式養殖施設のメインロープの微小区間を取り出し、このロープ要素に作用する外力を模式的に示したものである。ロープ要素の x ならびに y 方向の運動方程式は、それぞれ以下のように与えられる

$$Mds\ddot{X} = dF_H ds + \frac{\partial}{\partial x}(T \cos \theta) dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Mds\ddot{Y} = dF_V ds + \frac{\partial}{\partial x}(T \sin \theta) dx + \omega_s ds \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 M : 単位長さ当たりの質量、 ds : 要素の微小長

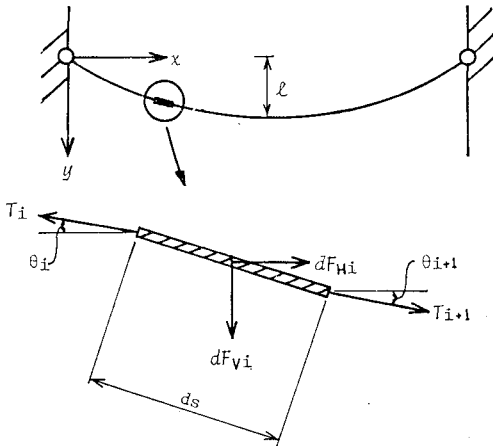


図-2 ロープ要素に作用する外力

さ、 F_H , F_V : 単位長さ当たりの水平および鉛直波力、 T : ケーブル張力、 ω_s : 単位長さ当たりの水中重量、 θ : ロープと x 軸とのなす角度 (反時計回りを正とする) である。また、要素の x , y 成分は、幾何学的関係から $dx = ds \cos \theta$, $dy = ds \sin \theta$ が得られる。また、 dF_H および dF_V は、それぞれ、水平波力および鉛直波力を表し、水粒子速度ならびに加速度と構造物との移動速度ならびに加速度の相対量をも考慮したモリソン波力式を参照すると次式で示される。

$$dF_H = \rho_0 C_M \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u} ds - \rho_0 C_{aM} \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{X} ds + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D (\omega - \dot{X}) |u - \dot{X}| ds (\sin \theta) s \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$dF_V = \rho_0 C_M \frac{\pi}{4} D^2 \dot{\omega} ds - \rho_0 C_{aM} \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{Y} ds + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D (\omega - \dot{Y}) |\omega - \dot{Y}| ds (\cos \theta) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ρ_0 : 水 (あるいは海水) の密度、 D : 部材の外径の直径、 θ : ds と x 軸のなす角度、また、 C_M , C_{aM} , C_D は、それぞれ慣性力係数、付加質量係数、抗力係数を示し、 u および $\dot{u}$ は x 方向の水粒子の速度および加速度、 ω および $\dot{\omega}$ は、 Y 方向の水粒子の速度および加速度である。また $\dot{X}$ および $\ddot{X}$ は、 X 方向の部材の速度および加速度、 $\dot{Y}$ および $\ddot{Y}$ は Y 方向の部材の速度および加速度である。部材の断面積を A とし、(1), (2) 式に (3) ならびに (4) 式を代入し整理すると、 x 方向ならびに y 方向の運動方程式がそれぞれつぎのように表される。

$$(\rho_s + \rho_0 C_{aM}) A ds \ddot{X} + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D |\omega - \dot{X}| \sin \theta ds \dot{X} - \frac{\partial}{\partial x}(T \cos \theta) dx = \rho_0 C_M A ds \dot{u} + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D (\omega - \dot{X}) |\sin \theta| ds \dot{u}$$

$$(\rho_s + \rho_0 C_{aM}) A ds \ddot{Y} + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D |\omega - \dot{Y}| \cos \theta ds \dot{Y} - \frac{\partial}{\partial x}(T \sin \theta) dx = \rho_0 C_M A ds \dot{\omega} ds + \frac{1}{2} \rho_0 C_D D (\omega - \dot{Y}) \cos \theta ds \dot{\omega} - \omega_s ds$$

ここでは、有限要素法による第1段階として、ケーブルを直線要素に分割し、個々の要素がピン接合されているとしてモデル化を行う。そこで、図-3 に示すように x , y 座標を ξ の直線座標に変換するために、以下に示すような形状関数を導入する

$$X = x_1 N_1 + x_2 N_2, \quad Y = y_1 N_1 + y_2 N_2$$

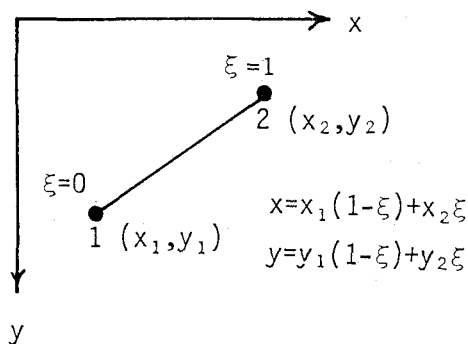


図-3 局所座標への変換

ここに、 N_1 、 N_2 は形状関数を示しており、 $N=[N_1, N_2]=[1-\xi, \xi]$ で与えられる。以上の形状関数を導入し、運動方程式中の各項を ξ について積分操作を施し整理すると最終的に流体中の構造物に関する時間領域での応答解析の基礎式を有限要素で離散化された系について書き表すと次のようになる。

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = [F] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに $[M]$: 質量行列, $[C]$: 減衰行列, $[K]$: 剛性行列, $[F]$: 流体力ベクトルである。水粒子の速度, 加速度は微小振幅波理論を適用し, 時間積分については Newmark の法を用いて行った。以上の計算方法によって, 両端固定のケーブルの波浪応答のシミュレーションを行った。波力の算定における流体力係数は x 成分ならびに, y 成分ともに等しいものとし, $C_M=2.0$, $C_D=1.17$, $C_A=1.0$ と円柱の値を用いた。また, バネ定数を $k=2 \text{ gf/cm}$ とし, 時刻の刻み幅を $t=T/50 \text{ (sec)}$ とし安定な周期解が得られるまで繰り返し計算を行った。数値計算を行うにあたってメインロープの直径を波動場での実験時のメインロープ部の総体積とあうようにした。

図-4 は水深 $h=45 \text{ cm}$, 周期 $T=1.62 \text{ sec}$, 波高 $H=5.67 \text{ cm}$ での波浪条件におけるメインロープ上の各浮子(黒丸印)の最大振幅量の包絡線を示したものであり, 点線は従来の離散化要素法による結果また実線が, 今回の有限要素法による結果である。この図より実験値ならびに計算値のいずれもロープ中央部に節が生ずる振動パターンを呈しており, 有限要素法の結果と離散化質量要素法との間に大きな違いは認められず, 実験結果とほぼ一致していることがわかる。一方, 図-5 も, 同様に $T'=0.92 \text{ sec}$, $H=5.54 \text{ cm}$ の入射波の条件下で得られる各浮子の動揺量の最大値を計算値と比較したものである。この波浪条件ではメインロープは二つの節を持つ振動パターンを呈しているが, 有限要素法の結果にも明確に現れている。また従来の離散化質量要素法の結果ともほぼ一致している。この結果から, ここで採用した有限要素モデルで, ほぼ実験時の現象は再現されていること

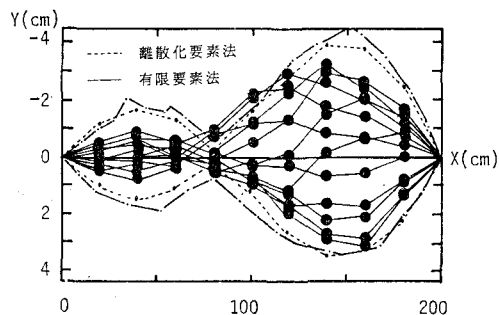


図-4 浮子の最大変位包絡線の実験値と計算値の比較

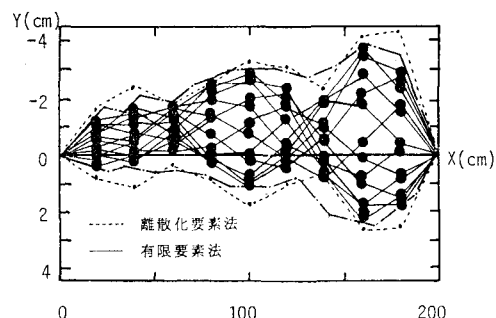


図-5 浮子の最大変位包絡線の実験値と計算値の比較

がわかる。また, 有限要素法による解は, 波を作用させて 6~8 周期後には安定な周期性が得られ, ロープ要素の取り方を工夫することで, 従来の離散化質量要素手法では安定な解が得られにくかった条件でも比較的早く安定な解がえられることがわかった。この点に関しては, 従来のモデルよりも優れているといえよう。

3. 施設の応答計算法の簡略化(1次元解析モデル)

これまで述べてきた有限要素法による波浪応答解析モデルは取り扱いに厳密であるが, 極めて多様な係留条件のもとで設置される実際の施設の波浪動揺量を算定しようとする場合, 種々の境界条件ならびに拘束条件に対応した数学的取扱が必要となること, また多大の計算時間を必要とすることなど, 必ずしも十分な実用性あるいは適用性を有していない。そこで以下では厳密解析法よりも精度はいくぶん低下するものの, より単純な数学的取り扱いのみで養殖施設の波浪応答を推算する実務的な計算法を導き, 実験結果と比較する。

図-6 は, 模型実験から得られたメインロープの鉛直ならびに水平方向の動揺量の波の一周期における変化を示したもので, この図より, $L \gg L_s$ (L_s : メインロープ長) の時, 鉛直方向の動揺振幅に比べ, 水平方向のそれは, 極めて小さく無視できることがわかる。すなわち 0, 0 とおける。またカテナリー理論から明らかにように, 水中に自由係留されている場合のロープ張力 T は, 場

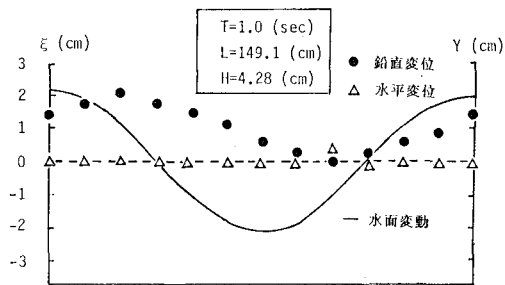


図-6 浮子の水平ならびに鉛直立位置の時間的变化

所的に変化しない。したがって $M=\sigma_s A$, $\omega_s=(\rho_s-\rho_0)gA$ とおくと、水平ならびに鉛直方向の波力 dFH , dFV をモリソン式で与えると、 x 方向の運動方程式は次のようになる。

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_0}{\rho_s} C_D \frac{D}{A} |\sin \theta| u_i |u_i| + C_M \frac{\rho_0}{\rho_s} \ddot{u}_i + \frac{T_i \cos \theta_i}{Mds} - \frac{T_{i-1} \cos \theta_{i-1}}{Mds} = 0 \quad (6)$$

この式からわかるように、 x 方向の運動方程式は、要素に作用する流体力と張力の釣り合い式となっている。一方、 y 方向の運動方程式も同様に

$$\ddot{Y}_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_0}{\rho_s} \right) C_D \frac{D}{A} |\cos \theta| (\omega_i - \dot{Y}_i) |\omega_i - \dot{Y}_i| + C_M \frac{\rho_0}{\rho_s} \ddot{\omega}_i - C_{AM} \frac{\rho_0}{\rho_s} \ddot{Y}_i + \frac{T_i \sin \theta_i}{Mds} - \frac{T_{i-1} \sin \theta_{i-1}}{Mds} + \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s} \right) g$$

となる。

さらに、 $(\sigma_0/\sigma_s)=S$ とすると最終的な Y 方向の運動方程式は、次のようになる。

$$\ddot{Y}_i = \frac{1}{2} S C_D \frac{D}{A} |\cos \theta_i| (\omega_i - \dot{Y}_i) |\omega_i - \dot{Y}_i| + C_M S \ddot{\omega}_i - C_{AM} S \ddot{Y}_i + \frac{T_i \sin \theta_i}{Mds} - \tan \theta_{i-1} \left\{ \frac{1}{2} S C_D \frac{D}{A} |\sin \theta_i| u_i |u_i| + C_M S \ddot{u}_i + \frac{T_i \cos \theta_i}{Mds} \right\} + (1-S)g \quad (7)$$

ただし、 $T_i=H$ で与えた。また、 θ については、ロープの動揺の時間的変化が微小であるとして、1ステップ以前の値を用いることにすれば、上式から、ロープの鉛直変動量 Y が算定される。具体的には、この式は、非線形の微分方程式であるので、4次のルンゲ・クッター法によって、ゼロ初期条件のもとで数値的に解いた。また H は、カタナリー理論から求められる値を用いた。応答計算は、メインロープスパン長 2m、要素数 9、ロープの設置水深 15 cm の施設模型に水深 45 cm、波高 1 cm~10.5 cm、周期 0.9 sec~2.0 sec の範囲の波浪特性を有する波が来襲する条件で行った。

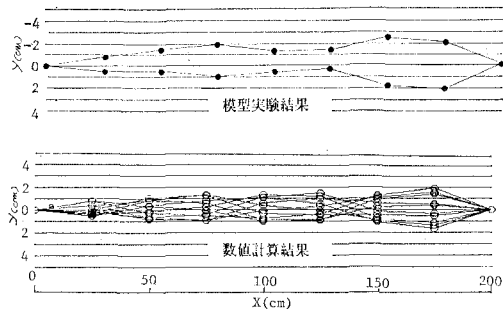


図-7 一次元解析例と実測値との比較

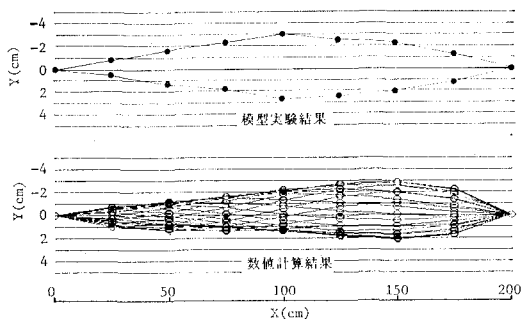


図-8 一次元解析例と実測値との比較

図-7 および図-8 は、周期 0.9 sec、波高 4 cm ならびに周期 2.0 sec、波高 6 cm の波浪条件に対して、式(7)を積分して得られたメインロープの算定動揺波形と、ほぼ同一の条件で行われた実験結果を比較したものである。これらの図で、特徴的なことは、波の一周期間の動揺振幅が場所的に異なり、いわゆる動揺量が小さくなる節の点と、逆に大きくなる腹が現れることである。こうしたメインロープの動揺特性は、これまでの実験結果においても認められており興味深い。また周期が短い場合、その節が多く現れており、ロープ長と波長の比が、共振パタ振幅に関しては、計算値はほぼ実験値に一致していること、また波の進行とともに動揺量も増大する傾向が計算値から認められ、ほぼ実験結果の傾向と一致することがわかる。

一方、図-9 においては、計算から得られたロープの

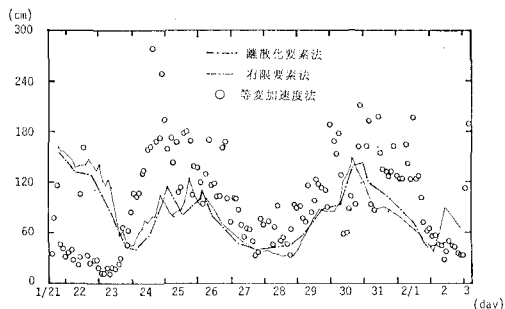


図-9 現地施設の波浪応答

振動波形は、 $x=150$ cm 付近ではほぼ最大値を示し、前述のような節となる点没有出现していない。また、実験値においては中央付近で最大となっており、必ずしも計算結果とは一致していない。しかし、最大動揺振幅に限っては、計算値と実験値とはほぼ一致していることから、ここで導いた一次元応答解析手法で、必ずしもすべての実験結果を再現するまでには至っていないが、実験で得られたロープの振動振幅をほぼ推定できることがわかった。

図-9 は、以上の二つの計算手法を用いて、現地施設の波浪応答について動揺シミュレーションを行った結果であり、現地施設の振動加速度データから算定された動揺量と比較したものである。現地観測記録は、島根県の恵曇沖約 2 km (水深 28m) の海域に係留されている延縄式イタヤ貝養殖施設で昭和 62 年 1 月 21 日 12 時～2 月 3 日 4 時に測定されたものである。現地観測期間中の波浪観測記録は、浜田沖と賀露沖で観測された値を採用した。現地観測から得られた加速度記録をもとに施設の波浪応答を推定するために、加速度が直線的に変化するものと仮定して、加速度を時間 t に関し 2 重積分を行うことにより変位が算出される。このとき積分をおこなう際に生ずる定数をいかに与えるかが問題となるが、ここでは積分定数を、(1) 加速度が極値をとる位相での速度をとする加速度から得られた速度波形を一周期にわたって積分した値は、0 となる、という二点に基づいて決定した。

さて、図-9 から、現地施設の動揺量の算定値は、有限要素法ならびに一次元解析法のいずれもほぼ等しい値を示している。また、計算結果は現地施設の加速度記録から求めた推定動揺量の約 50% 程度と低く現れている。これは現地施設のモデル化における不備、加速度解析時

における誤差、また動揺量の算定に必要なとなる施設設置海域での波浪資料が未知であることなどによるものと思われる。しかし動揺量の時間的変化に関しては、その傾向は一致していることから、現地施設のモデル化についてさらに検討すれば延縄式養殖施設の動揺量の推定精度は向上するものと期待できる。

4. 結 語

この研究では、有限要素法ならびに一次元解析法によって、波による延縄式養殖施設の動的応答の解明を試みるとともに従来の実験結果との比較を行い、その算定精度の検証を行った。その結果、(1) 有限要素法による算定法は従来の離散化質量モデルとほぼ同程度の算定精度を有しており、その収斂は比較的早い、(2) 一次元解析モデルで、延縄式養殖施設の応答量が算定できること、しかしながら尚モデル化に検討の余地がある等の結果が得られた。

参 考 文 献

- 1) 松原雄平・平尾 章・野田英明：波動下における海中養殖施設の動的応答に関する研究，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp. 420～424，1983。
- 2) 松原雄平・河原秀昭・野田英明：延縄式養殖施設の波による動的応答，第 34 回海岸工学講演会論文集，pp. 626～630，1987。
- 3) 長崎作治：海洋浮遊構造物とその係留に関する設計考察，土木施工 20 巻 6 号～22 巻 1 号，1979～1981。
- 4) 吉田宏一郎・米家卓也・飯田国広：有限要素法による水中線状構造の応用解析，日本造船学会論文集 第 144 号，pp. 195～204。
- 5) 福元裕彦・中西 宏・波田凱夫：海中ケーブル構造の波浪応答解析とその計算プログラム，土木学会論文集 第 356，pp. 455～464，1985。