

延縄式養殖施設の三次元波浪応答に関する研究

松原雄平*・野田英明**・高木雅広***

1. ま え が き

近年わが国周辺における沿岸漁業において、従来の漁業利益を優先させた資源消耗型漁業から、資源の維持増大を図りつつ経済利益を追及していこうとする資源管理型漁業へと転換が進みつつあり、既に、いくつかの地方自治体では、マリノーション構想、海洋牧場構想として各種の沿岸・沖合域の整備開発計画がスタートしている(島根県, 1987)。この研究は、そうした沖合海域の漁場開発計画の中でも重要な位置にある延縄式養殖施設の波による動的応答に関して検討を行なうものである。

現在、延縄養殖施設は、北海道東北地方では、ホタテ貝の養殖に、そして東北以西では、イタヤ貝の養殖にと、広く用いられている。特に、イタヤ貝の養殖に関しては、従来の天然採苗から人工採苗へと、新しい採苗技術が確立されようとしており、イタヤ貝の安定的な養殖が可能となりつつあることから注目されている。

2. 延縄式養殖施設の三次元波浪応答モデル

図一1は、現在、わが国周辺の浅海域に係留されている延縄式養殖施設を模式的に示したものである。施設は稚貝を長期間、収容するための養殖用籠、プラスチック浮子、そしてロープから構成されている。ロープ部については、養殖籠および浮子を係留するメインロープ、そして施設を係留・固定するためのアンカーロープとがある。このような構造上の特性から養殖籠は当然、鉛直

ならびに水平方向に3次元運動をすると考えられる。従来、著者らは、波の進行方向が施設の設置方向と常に一致するものとして、その波浪応答現象の解明を試みてきたが、本研究では、さらに延縄施設の三次元応答について検討を行なうものである(松原・平尾ら, 1985; 松原・野田ら, 1987; 松原・野田ら, 1988)。

三次元動揺モデルを誘導するにあたり以下の仮定を設けた。

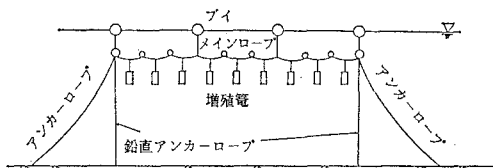
- (1) 浮子および養殖籠は、メインロープ上に配置された球形の質量要素におきかえられるものとする。
- (2) 延縄施設には、波力のみが作用し、メインロープ自身に作用する波力も質量要素に作用する波力で代表されるものとする。
- (3) 波は微小振幅波で表現されるものとする。
- (4) 両端の要素は固定点として扱える。

以上の仮定にもとづき、延縄施設の運動方程式を導いた。図一2に示したように、 x 軸を波の進行方向ととり、 y 軸をそれと直角方向、また z 軸を鉛直方向とする。

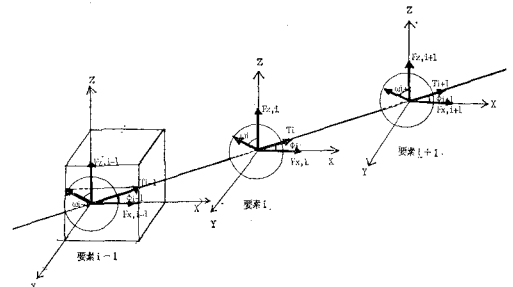
要素 i の座標を (x_i, y_i, z_i) で表わすと、その運動方程式は、

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{x}_i &= F_{x,i} + T_{x,i} - T_{x,i-1} \\ M\ddot{y}_i &= F_{y,i} + T_{y,i} - T_{y,i-1} \\ M\ddot{z}_i &= F_{z,i} + T_{z,i} - T_{z,i-1} - W \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 M は、要素 i の質量、 $T_{x,i}$ 、 $T_{y,i}$ および $T_{z,i}$



図一1 延縄式養殖施設の模式図



図一2 質量要素に作用する外力ならびに座標系

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 青木建設

は、それぞれ要素 i と要素 $i+1$ との間の x 方向 y 方向ならびに z 方向成分のロープ張力、 W は要素の水中重量である。また、 $F_{x,i}$ 、 $F_{y,i}$ および $F_{z,i}$ は、要素 i に作用する相対速度、相対加速度を考慮した波力の x 、 y 、 z 方向成分である。 $\dot{x}$ は、座標 x の時間に関する微分演算を表わしている。

さらに、張力の各方向成分量と、張力ベクトル T_i となす空間角を ϕ_i 、その $y-z$ 平面への写像と z 軸となす角度を ω_i とすると、三方向の張力成分は、以下のよう書き改められる。

$$\left. \begin{aligned} T_{x,i} &= T_i \cos \phi_i \\ T_{y,i} &= T_i \sin \phi_i \cos \omega_i \\ T_{z,i} &= T_i \sin \phi_i \sin \omega_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

さらに $\sin \phi_i = S_i/L_i$ 、 $\cos \phi_i = (x_{i+1} - x_i)/L_i \sin \omega_i = (y_{i+1} - y_i)/S_i$ 、 $\cos \omega_i = (z_{i+1} - z_i)/S_i$ となる。ここに $S_i = \{(y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2\}$ である。

以上の関係を、式 (1) に代入するとともに、波力の算定式としてモリソン式を導入するならば、最終的に運動方程式は、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_i &= (1/2)C_D\rho A_i(u_i - \dot{x}_i)|u_i - \dot{x}_i| \\ &\quad + C_M\rho V_i u_i - C_a\rho V_i \ddot{x}_{i-1} \\ &\quad + Q_{i+1}(x_{i+1} - x_i)/L_i - Q_i(x_i - x_{i-1})/L_{i-1} \\ &\quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M\ddot{y}_i &= (1/2)C_D\rho A_i(-\dot{y}_i)|\dot{y}_i| + C_a\rho V_i \ddot{y}_i \\ &\quad + Q_{i+1}(y_{i+1} - y_i)/L_i - Q_i(y_i - y_{i-1})/L_{i-1} \\ &\quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M\ddot{z}_i &= (1/2)C_D\rho A_i(\omega_i - \dot{z}_i)|\omega_i - \dot{z}_i| \\ &\quad + C_M\rho V_i W_i - C_a\rho V_i \ddot{z}_i \\ &\quad + Q_{i+1}(z_{i+1} - z_i)/L_i - Q_i(z_i - z_{i-1})/L_{i-1} \\ &\quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 $Q_{i+1} = k[\{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2\}^{1/2} - L_i] + T_i$ であり、 C_D 、 C_M および C_a は、それぞれ球の抗力係数、慣性力係数および付加質量係数である。 A_i および V_i は、要素 i の、断面積ならびに容積であり、 ρ は水の密度である。また u_i 、 w_i は、 x 方向ならびに z 方向の水粒子速度である。

時間積分に関しては、New-Mark の β 法を採用した。また、計算時間間隔 $t = 0.1 \text{ sec}$ とした。応答計算については、便宜上、要素数を 7 とし、両端を固定端として支えた。また、計算開始時の初期ロープ張力ならびに各要素の位置については、後述する模型実験時の値を用いることとした。延縄施設に対する波の入射角を、 0° (波の進行方向と施設の設置方向が一致する)、 20° 、 40° 、 60° の範囲に設定し、波の周期を 1.0 sec、2.0 sec、3.0 sec の各周期に対して波高を 3.0 cm と一定とする条件で計

算を行なった。

3. 養殖施設の三次元動揺実験

前述した数値計算手法の適用性、その精度等について検討するために、模型実験を行なった。延縄施設模型の 3 次元動揺を測定するために 2 次元動水槽ならびに 3 次元平面水槽を使用した。2 次元水槽は、長さ 25m、幅 0.6m、深さ 1.1m の片面ガラス張鋼製水槽である。メインロープおよびアンカーロープには、ビニール被覆ワイヤーを用い、養殖籠および浮力用ブイには、プラスチック浮子を用いて施設模型を作製した。

模型のメインロープ長は 1.6m、アンカーロープ長は 0.5m とし、これを 2 次元水槽内に係留した。この際、波の進行方向に対して $0^\circ \sim 40^\circ$ の間で 10° 毎に変化させ、各ケースの係留角度を設定した。アンカーロープには、内部に重りを入れてほぼ水中重量が近くなるように浮力調整をした浮子を 7 個、等間隔に取り付けて、その両端のアンカーロープとの接点に浮子を取り付けた。各浮子の静水中での静止位置は底面より約 10 cm となるようにした。

水槽外部には、図-3 に示すようにレール上を走行する台車の上にビデオカメラを設置し、メインロープ上の各浮子の運動を撮影した。波の進行方向と直角方向 (y 方向) の浮子の動揺量は、水槽底面に水平方向と 45° の角度に鏡を設置して撮影した。

さらに入射角の大きい波浪条件に対しては、長さ 12 m、幅 5m、深さ 0.5m の三次元平面水槽を用いた。平面水槽内部に前述の延縄施設模型を設置し、波の入射角が $0^\circ \sim 90^\circ$ の間の条件で実験を行なった。平面水槽では、動揺量の測定が困難であったため、係留索張力の測定のみを行なった。索張力の測定のために幅 1 cm、長さ 10 cm、厚さ 0.7 mm のアルミ板の両面に防水ひずみゲージを貼付し 4 ゲージ法による索張力測定器を作製した。この張力計は、較正の結果、良い直線性が得られた。

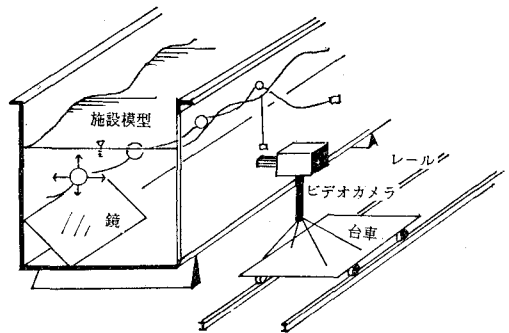


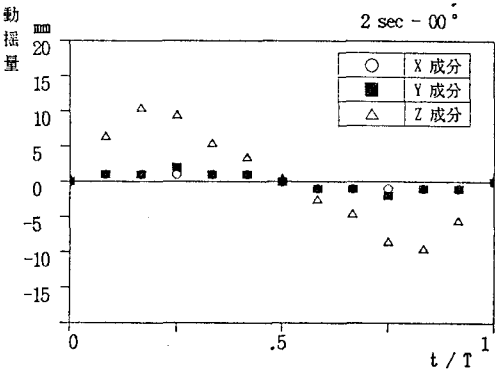
図-3 3次元動揺測定

波浪条件は、2次元水槽ならびに平面水槽のいずれでも、水深を35 cm、波高を約3 cmと、それぞれ一定に保ち、波の周期を1 sec、2 sec および 3 sec の3ケースに設定した。

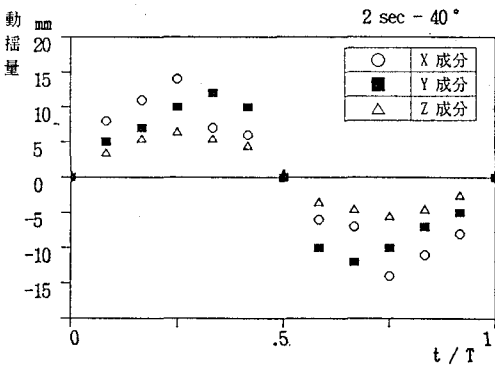
4. 実験結果の検討と計算結果との比較

図-4 (a) および (b) は、それぞれ三次元動揺実験の測定結果の一例を示したもので、周期 2 sec、波高 3 cm の波に対して、入射角が 0° の場合と 40° の場合のメインロープ中央の浮子の x, y, z 方向の動揺量の時間的変化を一周期について示したものである。図-4 (a) では、入射角が 0° すなわち施設の設置方向と一致して波が進入する場合、波の進行方向である x 成分ならびに波向きと直角方向である y 成分の動揺量は、殆んど認められず、鉛直方向の z 成分のみが卓越して現われている。一方、図-4 (b) より、波の入射角が 40° に変化すると、図-4 (a) の結果と対称的に x, y 成分の水平動揺成分が卓越し、鉛直方向の動揺量が減少している。周期 1 sec ならびに 3 sec の波を作用させた場合からもほぼ同様の結果が得られたことから、延縄施設の波浪動揺特性は波の入射角の変化とともに変わり、入射角が大きく

なると、浮子の水平面内での動揺が卓越してくること、また波の周期が長くなると、浮子の鉛直動揺は、入射角の増大とともに減少することがわかる。図-5 (a) および図-5 (b) は、以上の関係を、さらに広範な波浪条件の下で示したものである。図-5 (a) は、縦軸に、波の一周期間の、浮子の x 方向最大変位量を入射波高で無次元化した値を、横軸には、入射角をとって示したものである。図-5 (b) も同様にして z 方向の最大変位量を示している。図-5 (a) より、波の周期の変化に関わらず、入射角の増大にともなって浮子の動揺振幅が増大することがわかり、特に、周期が短い条件に顕著となっている。また、 y 方向の動揺量についても、図-5 (a) と同様な結果が得られた。一方、図-5 (b) から z 方向の最大振幅は、入射波の周期の違いによって、特徴的な変化を示していることがわかる。すなわち、周期 1 sec の場合、入射角が 30° 以上になると、急激に増大すること、また周期 2 sec の条件では、入射角が 20° を越えると動揺量が減少していること、さらに周期が 3 sec の場合では、さらに鉛直方向の動揺量が小さくなり、また、入射角が 10° よりも大きい条件で、入射角の増大とともに鉛

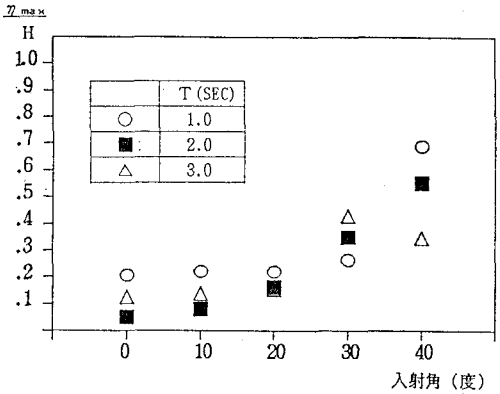


(a) 入射角=0°

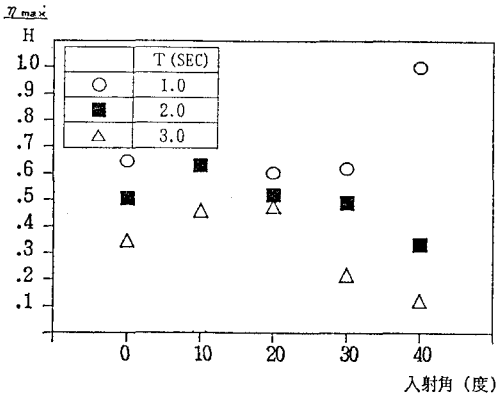


(b) 入射角=40°

図-4 中央浮子の三次元動揺測定結果



(a) x 軸方向の最大動揺振幅



(b) z 軸方向の最大動揺振幅

図-5 相対最大振幅と入射角の関係

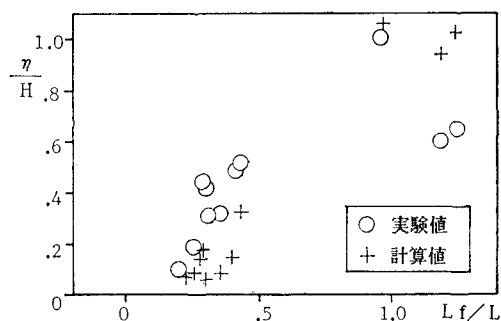


図-6 計算結果と実験結果の比較

直動揺が減少していることなどがわかる。特に、入射角が 40° の場合、周期が 1 sec の結果と 3 sec の結果とは、動揺量に大きな差が生じている。

前述のように、浮子の動揺量については、明確な周期特性が見られることがわかった。著者らは、すでに延縄養殖施設の動的応答現象は、施設の共振現象が重要となることを示し、施設のスパン長・波長比が、そのパラメータとなることを明らかにした。そこで、ここでは、施設長と換算波長比（施設設置方向へ波長を投影した距離）との比をとって検討した。図-6 は、施設長 (L_f)・換算波長 (L) 比をとり、相対鉛直動揺量を示したものである。また同図中には、前述の数値計算結果も合わせて示してある。この図より、換算波長が、施設長と等しくなるにつれ、相対変位量が增大する傾向が認められ、両者の比が 1.0 付近で、最大の動揺量が生じている。また、その比が 1.0 より大きい領域では、動揺量は、減少する傾向が見られる。従来の結果も合わせて考えると、入射波の換算波長と施設長の比で、延縄施設の動揺現象は、規定されると考えられる。以上の実験結果と計算結果を比較すると、 L_f/L の比の値が 0.5 以下の領域では、計算値が実験結果よりもやや小さく現われているものの、その傾向は一致している。また L_f/L の値が 1.0 近傍では、実験値と計算値とは、ほぼ一致しているが、さらに比の値が増大すると、計算値は、実験値よりも大きくなっていることがわかる。この原因については、現在のところ必ずしも明らかではないが、計算モデルに対して与えた、ばね定数ならびに波力算定係数が妥当でなかったことや、数値計算時の誤差処理の問題などが考えられる。しかしながら、精度を向上させる余地はあるものの、この研究で導いたモデルで、波向きが変化する条件に対しても、動揺量の算定が、ほぼ可能であることがわかった。そこで、このモデルを用いて現地施設の動揺シミュレーションを試み、実測結果と比較した。比較に用いた実験資料は、鳥取県東伯郡泊村の沖合、水深 45m の海域に係留された延縄式養殖施設において、昭和58年3月23～25日の間に測定されたものである。動揺量の観

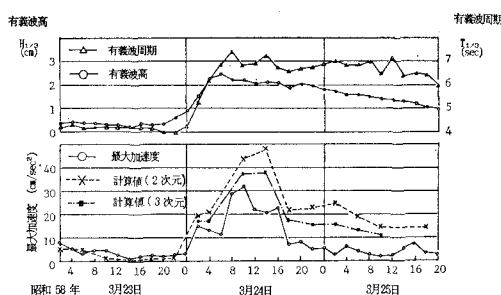


図-7 現地観測結果と計算値の比較

測には、鋼製の防水函体中の加速度センサー、タイマ、バッテリー、記録計を収納した無人観測器を用いた。図-7 は、2 時間毎に 5 分間計測した加速度記録から最大加速度を選びだし、観測期間中の変化を示したもので、同期間中の波浪記録もあわせて示している。また、図中の点線および破線は、それぞれ 2 次元および 3 次元の動揺計算モデルから得られた計算結果を示したものであり、計算値は、いずれも加速度の値で示されている。この図より、3 月 24 日の早朝から波浪が急激に発達し始めると施設の動揺加速度も増大することが明瞭に認められる。こうした変化は、数値解析の結果にも認められるものの、観測値に比較して、二次元モデルならびに三次元モデルのいずれの結果も、過大に現われている。二次元モデル (x, z 成分のみ考慮) とここで導いた三次元モデルによる結果を比較すると、この対象期間内では、いずれも、三次元モデルの結果が小さく、より観測値には近い結果となっており、若干の計算精度の向上は認められる。この観測値と解析値との不一致の原因としては次のようなことが考えられる。

- (1) 解析モデルへの入力データとなる来襲波浪の波高、周期ならびに波向きの資料が、必ずしも施設設置点（動揺観測点）において得られたものではないこと、
- (2) 養殖籠、ブイ、ロープ等から構成される現地施設と離散化した球形要素に置き換える際に、合理的な、あるいは基準的な手法が不明であり、波力算定係数を試行錯誤的に変化させて計算する便宜的方法しかないこと、
- (3) 現地施設の養殖籠や養殖貝の水中重量、容積の長期間の変化や、ロープの強度や弾性係数等の特性量の経時変化が不明であること、

などが考えられる。(2)、(3)の点については、今回の計算では、施設設置時における、養殖籠ならびブイと等価な容積を持つ球形の要素を考え、その水中重量は、籠と養殖貝とブイの水中重量と等しくなるように支えた。また、要素を連結するロープに作用する波力については今

回のモデルでは特に考慮していないことも、不一致の要因と考えられる。上記の現地施設のモデル化の方法の妥当性については、今後、さらに現地観測データを蓄えて検討する必要がある。現地施設の籠や貝などの長期の経時変化や、係留施設の資料を集めるとともに、施設の三次元動揺現象の観測結果を蓄積し、より優れた三次元動揺解析モデルを作り上げる必要がある。

5. あとがき

本研究では、波浪による延縄式養殖施設の動的応答に関して、三次元動揺解析モデルを誘導し、模型実験結果との比較を行うとともに、現地施設の動揺シミュレーションを行い観測値と比較検討を行った。得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 施設に來襲する波浪の入射角が増大するにつれ、浮子の鉛直動揺よりも水平動揺が卓越することが明らかになった。また、その動揺現象には、明瞭な周期特性が認められた。

(2) 種々の方向から入射する波浪については、施設の設置方向に投影した換算波長を用いて、施長スパン長との比をとったパラメータ L_d/L が有用であることがわ

かった。この L_d/L を用いることによって、最大鉛直変位量は、 $L_d/L=1$ の条件で急増し、施設と波の共振現象として説明できた。また、三次元解析の結果も、ほぼ実験結果と一致することがわかった。

(3) 現地の延縄式養殖施設の動揺観測結果と数値シミュレーション結果の比較から、従来、提案していた二次元動揺解析モデルよりも、ここで誘導した三次元動揺モデルが、より良い精度で、現地施設波浪応答を再現することがわかった。しかしながら、いずれの応答解析モデルの結果も、現地観測値よりも過大となった。

参 考 文 献

- 島根県 (1987): 沿岸・沖合域総合整備 開発条件調査検討事業 報告書, p. 384.
- 松原雄平・平尾 章・河原秀昭・野田英明 (1985): 波による延縄式養殖施設の動的応答に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 647~651.
- 松原雄平・野田英明・河原英昭 (1987): 延縄式外海養殖施設の動的応答に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 626~630.
- 松原雄平・野田英明・田中英利 (1988): 波浪による延縄式養殖施設の動的応答, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 752~756.