

延縄式外海養殖施設の波による動的応答に関する研究

松原雄平*・野田英明**・河原秀昭***

1. ま え が き

従来、わが国の養殖事業は海水の交換率の低い内湾域に集中して各種の施設を設置してきたため、域内における汚濁の蓄積や養殖空間の過密化とあいまって次第に外海域に新たな漁場を求めることを余儀なくされている。しかしこのような外海域に設置された養殖施設の一部は、比較的短期間に破損あるいは流失するという事例が報告されている。これは、こうした水産構造物を設計する際に、波と構造物の動的応答関係が十分に検討されず、施設が外海の波浪に対して充分な抵抗力を有していないことによるものと考えられる。すでに著者らは外海域に設置された延縄式養殖施設の波による応答計算手法を開発するとともに模型実験によってその再現性の検討を行なっている。また、日本海に設置されている延縄式養殖施設において動揺に関する現地観測を行い、現地施設における動揺の状況ならびに数値予測との比較検討を行ってきた^{1),2)}。その結果、波浪条件によっては、施設が共振を呈しその動揺量が著しく増大することを示した。一方、このような施設の動揺は、養殖物の製品価値を低下させると言われており、動揺低減化についても検討が必要とされている。

この論文では、すでに提案している波浪応答計算モデルを用いて、種々の波浪条件に対する現地施設の応答量ならびに係留索張力を推算し、その応答特性や係留索張力の変動特性について検討し、さらに動揺については現地観測結果と比較する。また波による施設の応答を低減させるための工法についても検討し外海域に設置される延縄式養殖施設を設計する際に有益な基礎資料を与えようとするものである。

2. 延縄式海中養殖施設の概要

図-1は、解析の対象とした延縄式海中養殖施設の概要を模式的に示したものである。図からわかるように、延縄式養殖施設は、養殖籠、浮子ならびにロープから構

成される施設であって、当然波の影響を受けて動揺が生じやすい形態といえる。養殖籠を垂下するメインロープは、両端からそれぞれ二本のアンカーロープによって海底に4点係留によって固定されている。養殖用の籠は、直径 60 cm、長さ 2 m の網でその周囲を囲んだ丸籠であり、その内部は網仕切りで10段に分けられ、各段に約20枚の貝が入れられている。実際の施設では、この丸籠が縦に2連つながって、ほぼ 5 m 間隔にメインロープから垂下されている。籠は 15 m 程度の水深に係留され個々の籠の中央には籠およびロープに浮力を与えるためのブイが取り付けられている。

3. 応答計算モデルの概要

前報では誘導した数値モデルを用いて養殖施設の動揺ならびに係留索張力に関する数値計算を行うとともに、屋内模型実験を行って、その算定精度について検証をおこなった。そこでこの応答計算モデルによって、実際の養殖施設の応答特性を計算した。この波浪応答計算において、メインロープ上の各養殖籠ならびに浮子は、それぞれ実際の籠および浮子の重量と等しくなるようにその密度を与えた。各要素に作用する波力は、相対速度ならびに加速度を考慮したモリソンの波力算定式で与え波の進行方向を含む二次元空間内で各要素の運動方程式および拘束条件を導き、これを差分化し数値解析を行った。

一方、係留索張力を算定する場合も同様にアンカーロープを離散的な要素モデルに置き換えて、メインロープの張力を境界条件として与えて、これを求めた。

数値計算は、計算時間間隔を波の周期の 1/200 以下にとり、静止状態を初期条件として応答が十分に安定しかつ周期性が得られるまで行った。

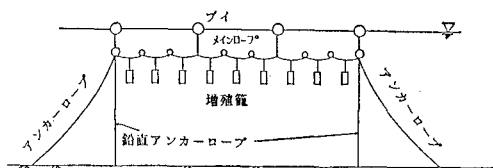


図-1 延縄養殖施設模式図

* 正会員 工修 鳥取大学助手 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 大成エンジニアリング(株)

4. 延縄式養殖施設の応答計算

図-2 は、水深 30 m の海域に設置されたメインロープスパン長 200 m、メインロープ上の籠35個の施設の波浪応答計算結果の一例であって、有義波高 2.74 m、有義波周期 10 sec の波浪条件に対するメインロープ中央部の波浪動揺ならびに係留索張力の数値計算結果を示したものである。

同図において、対象波浪を有義波で与えているために計算結果もまた静止時の釣り合い位置を中心とした正弦的な動揺波形となっている。また動揺振幅は、約 1.5 m と表面波の変動よりも小さくなっているが、メインロープスパン長・波長比 $2ls/L$ が 2.9 であるために共振波長比 1.0 よりも大きいことによるものである。また係留索張力も、波一周期間で沖側および岸側でそれぞれ周期的な単峰型の変化を示し位相は互いに逆となっている。

図-3 (a) は、ほぼ同じ設置条件の施設に対して種々の波浪条件より算定される最大動揺量を入射波高で無次元化した相対変位量と、メインロープ・スパン長比 $2ls/L$ との関係を波形勾配をパラメーターにとり示したものである。波浪条件を設定するにあたっては、同一水深で冬期12月～2月の3ヶ月間に測定された波浪記録から最高頻度の波浪条件を基準としてそれより波高・周期がともに増大する範囲 ($H/L=0.02\sim0.08$) に選定した。さて、同図より、 $2ls/L$ の増大とともにほぼ直線的に相対変位量は減少している。とくに $2ls/L < 3.5$ では、波形勾配が小さくなるにしたがって相対変位量は増大するものの、 $2ls/L > 3.5$ ではその関係が逆転する傾向が認められる。一方、図-3 (b) は、同様の波浪条件に対

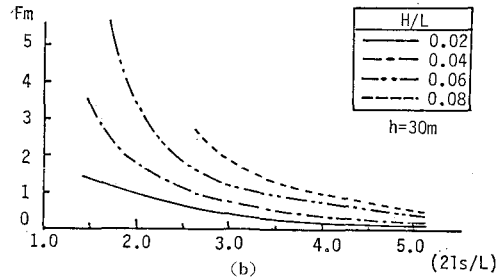
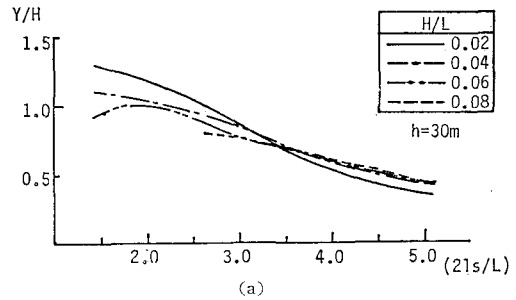


図-3 計算応答量ならびに索張力

して得られる沖側ならびに岸側係留索張力の最大値からいずれか大きい値を F_{max} とし、 F_{max} と初期張力 F_0 からの変動量を F_0 で除した値 $F_m = (F_{max} - F_0)/F_0$ を縦軸にとり $2ls/L$ との関係で示したものである。この図から、 $2ls/L$ の増加とともに F_m が小さくなること、波形勾配が大きいほど F_m は増大することがわかる。この結果は模型実験の結果と一致している。とくに $H/L > 0.06$ の結果からは、 $2ls/L$ の値が 2.0 よりも小さくなると急激に索張力の値が増大する結果となっている。同様の計算を、水深 40 m および 50 m についても行ったが、相対変位についてはほぼ一致した結果となった。索張力については、水深の増加とともに張力も増大する傾向がやや認められた。またメインロープ長 1 s が 100 m の場合についても応答計算を行った。その結果、 $2ls/L$ との関係で表示すると同様な応答特性が得られた。ただし、施設の応答が増大する $2ls/L$ の値は異なることがわかった。

5. 現地施設における動揺観測

前述のように、現地施設の応答計算値が得られたので同じ施設で加速度計による動揺観測を実施した。対象施設は、島根県八束郡鹿島町沖合の水深 30 m の海域に係留された延縄式養殖施設であり、図-1 に示したような形状で設置されている。メインロープ長 200 m、アンカーロープ 100 m であり、メインロープは、水面下約 10 m の位置にあり、約 5 m 間隔に養殖籠が垂下されている。

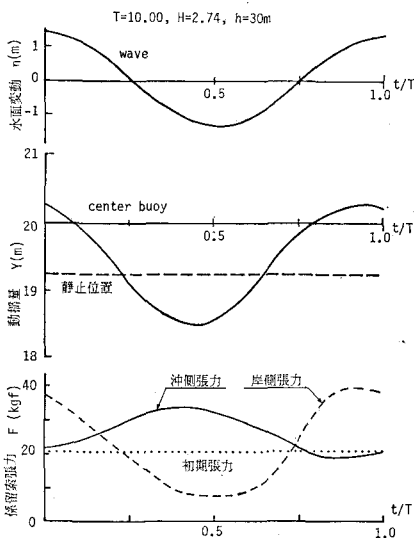


図-2 現地施設の波浪応答計算の一例

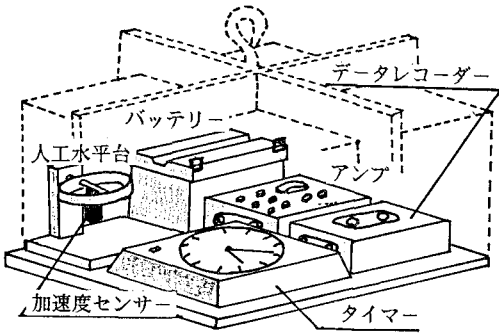


図-4 加速度測定装置

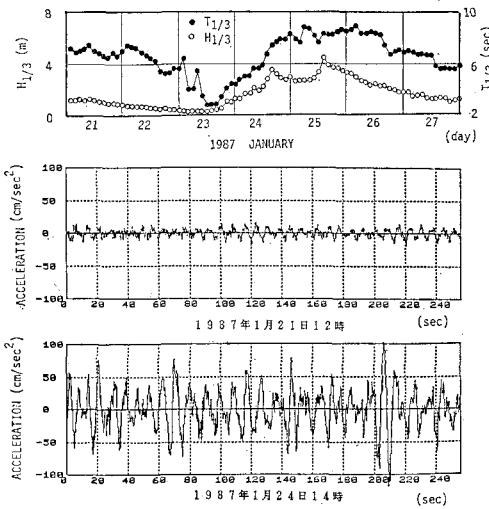


図-5 現地観測結果の一例

加速度測定装置は、図-4に示すように、加速度センサー、タイマー、アンプ、データレコーダーならびにバッテリーから構成されるものである。これらを耐水・防水処理を施した鋼製函体内に収納し、メインロープのほぼ中央部から7m下方に垂下した。加速度計は、その感応方向が常に鉛直方向を指向するように、人工水平器の上に搭載されている。加速度観測は、2時間毎に6分間行なえるようにタイマーをセットした。観測期間は1978年1月22日～2月20日までの約1ヶ月である。

図-5は、同観測期間中に得られた波浪観測記録ならびに加速度記録の一部である。波浪観測資料は運輸省第三港湾建設局により鳥取港沖にて測得されたものであり、図中の値は、2時間毎の有義波高ならびに有義周期の経時変化を示している。また、同図中の加速度の測定結果は1月21日の12時ならびに1月24日14時に測定された2例を示したもので、前者は比較的静穏な海象条件における加速度記録であり、後者は波浪の発達期における加速度記録である。これより静穏時では、施設に大きな加

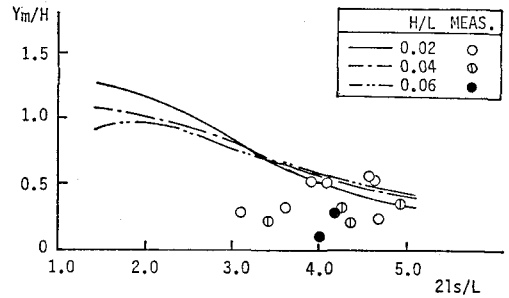


図-6 現地観測結果と数値計算結果との比較

速度は加わっておらず、わずかな振動が見られるのみである。しかし有義波高ならびに有義波周期の増大とともに施設には大きな加速度が作用することがこの結果から明らかである。また加速度記録はかなり不規則な変動を示しているが、ほぼ有義波周期にちかい周期で変動を示しており、このような施設は表面波の影響を強くうけて動揺することがわかる。

図-6は、現地観測から得られる加速度記録をもとに、数値積分を行って動揺記録に変換した結果と、前述の数値計算から計算される最大相対変動量の結果を比較したものである。加速度を変位量に変換する数値積分においては、地震応答解析でしばしば使用されているフーリエ変換法とデュアル積分法を試験的に採用したが、計算精度ならびに計算時間の面において充分でなかったため、加速度記録を一波一波切り出して、それを直接積分する方法をとった。

図-6より、実測値と観測値との一致は必ずしもよくないが、これは加速度観測装置がメインロープ中央に垂下されたため、波浪条件によっては、かならずしも中央部が最大変動点とならないことや、現地海域での海象条件が充分把握できないために入射波浪条件が異なることなどが考えられる。現地データは、波形勾配が大きいほど相対変動量は少ない傾向が認められるが、全体としては数値計算結果と同程度の動揺量となっており、この数値計算モデルでほぼ現地の施設の動揺が再現されていると思われる。

6. 波浪動揺低減化に関する検討

上記のように、現地の施設は波によって大きく変動することがわかったが、この施設の動揺は養殖物の成長を阻害することが知られている。以下では、実験的に施設の動揺を低減させるための係留方法について検討する。ここでは、とくに養殖籠模型の沈子に抵抗板を設置してその径の変化による施設応答の変化に注目した。抵抗板は、図-7に示すようにメインロープから垂下された沈子の下面に、径の異なる5種類の円盤を接着したもので

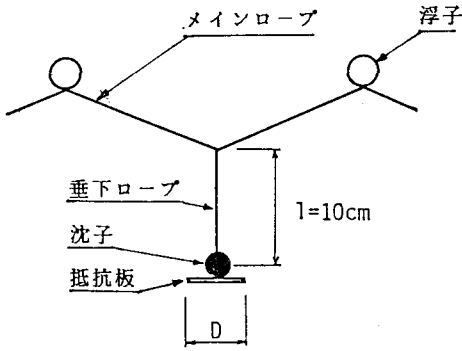


図-7 抵抗板の設置状況

表-1 抵抗板諸元

	RUN 3	RUN 4	RUN 5	RUN 6	RUN 7
D (cm)	20	30	35	40	50
形状	材質	厚さ	体積	重量	水中重量
円板	プラスチック	0.04 cm	0.08 cm ³	0.099 gf	0.019 gf

(単位面積当り)

ある。表-1に抵抗板の諸元を示す。

実験では、浮子・沈子が一本のメインロープに等間隔に位置するようにモデルを作成した。係留ロープ模型としては、径 0.8 mm のステンレステグスを用い、沈子には鉛製のおもりを用いている。

動揺低減化の実験は、長さ 25 m、幅 0.6 m の綱製二次元波動水槽で行った。施設の動揺量は、水槽ガラス壁を通してビデオカメラによって撮影し、これをビデオ解析装置によって解析した。また係留索張力は、ロードセルを作製し、これを模型両端のアンカーロープに装着してロープに作用する張力を測定した。水面波形は容量波高計によって測定し、ロードセルの記録とともにレコーダーに収録した。

図-8は、ビデオ解析によって得られた抵抗板モデルの最大変動量を抵抗板を装着しない場合の動揺量で除した相対変動量と、 $2l_s/L$ との関係を板径と浮子径の比をパラメータにとり示したものである。この図で特徴的なことは、run-3 から run-7 へと抵抗板の径が増加するにつれて動揺量が減少し、最も径の大きい run-7 では、抵抗板を設置しない場合の約 50% 程度までに低減できることである。また浮子径よりも抵抗板の径が小さい run-3 の結果では、逆に抵抗板を着けることで動揺量が増加する結果も生じている。動揺量の最小値は抵抗板の径の変化に関わらず $2l_s/L = 2.3$ 近傍で現われている。これは、他の波形勾配に対しても同様な結果が得られた。

図-9は、相対変動量の図をもとに、変動量が最も小

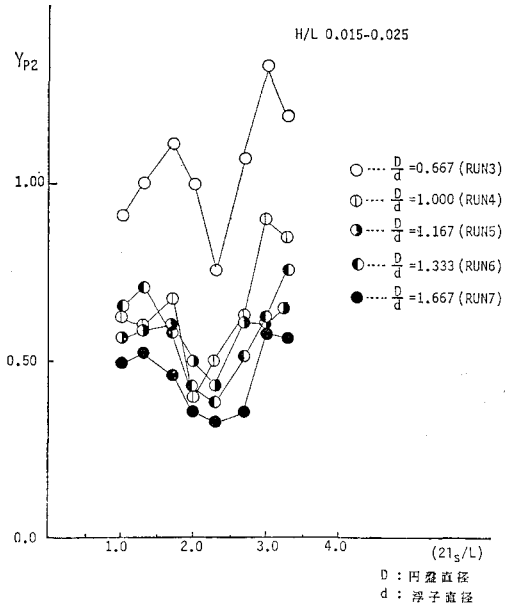


図-8 抵抗板径の変化と低減効果

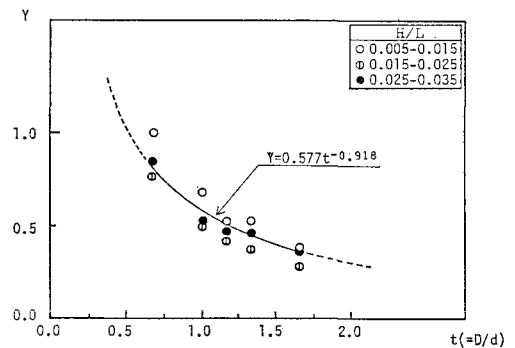


図-9 動揺低減曲線

さくなる $2l_s/L$ の値が 2.0~2.3 の範囲での相対変動量と抵抗板径との関係を波形勾配をパラメータとして示したものである。これより相対変動量は波形勾配の影響を若干受けるがどの結果においても抵抗板の径が増大すると指数的に減少することが認められる。また抵抗板の径も 1.5 程度からは低減率が鈍化する傾向となることもわかる。図中の実線は、最小二乗法で求めた低減曲線であり、抵抗板の径が決まれば動揺低減量が見積もられる。

以上は抵抗板の径の変化と動揺量の関係であるが、図-10は、索張力と板径の関係を示したものである。縦軸に、アンカーロープ張力の変動量 F_b をとり、 $2l_s/L$ と H/L との比 (LH) との関係を全索張力の実験値についてプロットしたものである。これより、 $2l_s/L$ が増加するにつれ、また波形勾配が減少するにつれて係留

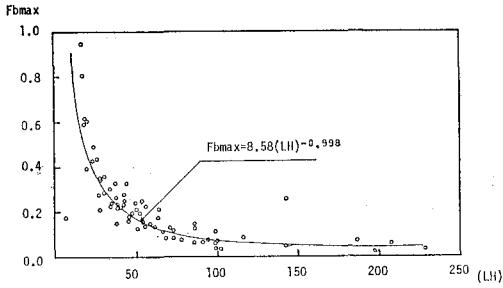


図-10 索張力と LH の関係

索の変動量は減少するといえる。図中に示した実験式は、最小二乗法で求めた索張力の算定式であるが、抵抗板モデルにおける索張力変動は、若干のデータのばらつきはみられるもののこの式ではほぼ推定できる。

7. 結 語

この研究では、延縄式養殖施設の波浪応答に関して数値計算に現地施設の動揺特性の解明を試みるとともに、現地観測を行って、その推定精度の検証を行った。また波浪動揺の低減化のための係留方法について実験的に検討を加えた。その結果、現地施設をモデル化するうえで養殖籠あるいは浮子をどのように置き換えてモデルに取り込むかについてはなお検討の余地はあるが、この数値計算モデルで、ほぼ現地施設の動揺量の推算が可能と思われる。また、施設の動揺を低減させるために抵抗板の設置が有効であることがわかった。今後現地での実証実験も含めて、さらに検討をすすめる必要がある。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、現地観測では島根県水産試験場鹿島分場の服部分場長、由木研究員ならびに石田研究員には多大な御協力を賜った。ここに記して厚く謝意を表します。