

沖合養殖いけす施設の波浪応答に関する研究

松原雄平*・野田英明**・中川将秀***

1. はじめに

わが国の内海・内湾域では、いけす施設を利用した海面養殖事業が盛んに行われており、生産量および生産額ともに沿岸漁業のなかで重要な地位を占めている。(農林統計局, 1996)。また、いけす施設は養殖施設としての利用だけでなく、定置網等の漁獲物を計画的に市場出荷するための畜養施設として使用される事例も増えつつある。近年の新素材を利用した大型のいけす施設の導入等も進められていることから、今後いけす施設の利用はさらに拡大するものと考えられる。しかし一方で、内海・内湾域に係留されたいけすでは、海水交換の悪い海域を中心に、赤潮や魚病が頻発するなど、水質汚染による深刻な漁業被害が報告されている。こうしたことから沖合域を新たな養殖水域として、沖合域に施設を設置する試みが進められ、関連した研究も行われてきている(松原ら, 1993; 石戸谷ら, 1993; 松原ら, 1990)。

しかし外海域で安定的にいけす施設に係留するには、外海波浪による、いけす施設の動的な応答特性を把握しておく必要がある。可能であれば現地海域において、いけす施設が波浪によってどのような動揺を呈するかについては観測を行っておく必要がある。

そこで本研究では、沖合海域に係留されたいけす施設の波浪動揺に関して、まず2次元動揺モデルの誘導ならびに模型実験を行い、その動的応答特性について検討する。さらに、沖合域でのいけすの動揺観測を行うことにより、現地施設の実態を把握し、最終的に沖合いけすの波浪応答特性について検討するものである。

2. 波浪によるいけす動揺量の算定

通常いけす施設は、波向きが卓越する方向に平行に設置される。また、いけす施設一基の規模は10 m四方程度であるので、4～5基連結したとしても、その全長は入射波長よりも小さく、いけす動揺の場所的变化は無いものと考えてよい。そこで、図-1のような座標系のもと

で、養殖施設の運動方程式を導くために、

- 1) 来襲波浪は微小振幅波で、養殖施設は波向きに平行に設置されている。
- 2) 養殖施設に作用する流体力は浮子と網にのみ作用し、係留索の伸縮は無視できる。
- 3) 養殖施設の動揺量は、重心の変位で代表される。の基礎仮定を設定した。このとき、いけすの運動は、次のような2次元の線形減衰振動方程式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} [\ddot{X}] + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xz} & C_{x\theta} \\ C_{xx} & C_{zz} & C_{z\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta z} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} [\dot{X}] + \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} & K_{x\theta} \\ K_{zx} & K_{zz} & K_{z\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta z} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} [X] = \begin{bmatrix} f_x(t) \\ f_z(t) \\ f_\theta(t) \cdot X \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

ここに M および I : いけすの質量および慣性モーメント, X : 動揺量および回転量で, X_1, X_2 が X および Z に, X_3 が θ にそれぞれ対応する。 C_{xx} : 構造減衰係数, K_{xx} : 復元力, $f(t)$: 波浪強制力である。浮子に作用する波力については相対速度および加速度を考慮したモリソン式を用い、網地に作用する波力については、慣性力成分を無視した松原ら (1990) の網地の抵抗係数評価式から求めた。また、係留索張力については施設の動揺量が小さいものとしてカテナリー理論を用いて、弛緩状態ならびに

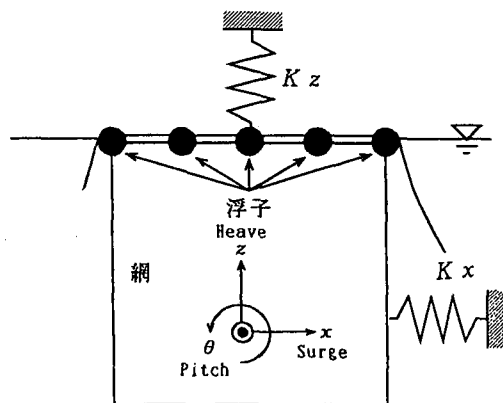


図-1 計算モデルと座標系

* 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 東洋建設

緊張状態について算出した。

方程式の解を求めるために直接数値積分法であるニューマークの β 法を使用した。特定の波浪条件に対して、静止状態から計算を開始し、周期的で安定な解が得られるまで計算を繰り返した。

3. 動揺量の計算結果と実験結果との比較検討

波浪動揺の計算結果の妥当性を検証するため水理模型実験を行い、両者の結果を比較した。実験は、長さ 24 m、幅 0.6 m、高さ 1.1 m の二次元波動水槽において行われた。水深 45 cm の水槽に一辺 20 cm の立方体のいけす模型を二点係留で潜水浮遊させ、規則波を作用させたときの二次元動揺量をビデオカメラで、また係留索張力をロードセルを用いて計測した。表-1 に実験波の条件を示す。

図-2 は、模型の無次元回転変位 $\theta h/H$ と波形勾配 H/L との関係を示したものである。実線は計算結果を、×印は実験結果を示している。模型の構造減衰係数を決定するため、減衰係数を変化させて動揺計算を行った。図中の cal 1 は、非減衰の条件で、一方、cal 2~cal 4 は、それぞれ構造減衰係数を順に増大させ、ピッチ量の計算を行った結果である。図から、減衰係数の変化とともにそのピッチ量も変わり、係数の値が大きくなるとともに回転量も小さくなっている。また、実験値を最もよく再現したのは、cal 3 の減衰係数で計算を行った場合であった。以下の考察では、この値を減衰係数とした。

図-3 および図-4 は、それぞれいけす模型の無次元サージ量 X/H とヒープ量 Z/H について、波形勾配 H/L との関係を示したものである。実線は $H=3$ cm としたときのサージとヒープのシミュレーション結果を示し、×印は実験結果を示している。図-3 よりサージ方向の最大動揺量は、実験値および計算値ともに波形勾配が緩やかになるほど最大変位量が増大する傾向が認められる。また、波形勾配が 0.006 よりも大きくなると最大変位量の計算値は一定値を示しているが、これは、係留索がトート状態となり係留索によって運動が拘束されていることによるものである。一方、実験値の変化を見るとケース 2 とケース 3 の結果が計算値より大きな値をとっているが、これは、実験波高が 3 cm よりやや大きかったことによるものと考えられる。

図-4 のヒープ方向動揺量と波形勾配の関係を調べると、明確ではないが実験値および計算値ともに最大動揺量は波形勾配が小さくなるほど増大する傾向が認められる。また、前出の結果と同様に、この図においても実験値に比べ計算値がやや小さく現れている。これも、前述の要因によると考えられるが、減衰係数や付加質量力係数の設定方法も含めてさらに検討すべき点であろう。

表-1 模型実験での波浪条件

	周期 (sec)	波高 (cm)	水深 (cm)
CASE 1	1.0	2.8	45.0
CASE 2	1.5	3.2	
CASE 3	2.0	3.3	
CASE 4	2.5	2.7	

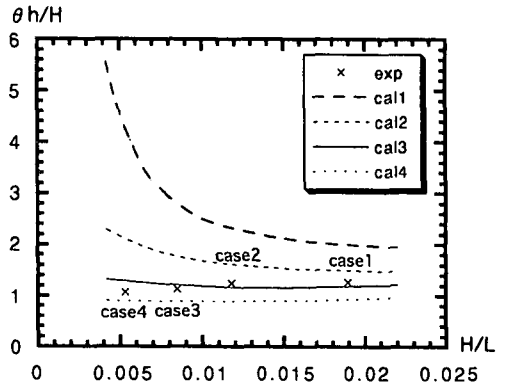


図-2 ピッチ量と波形勾配の関係

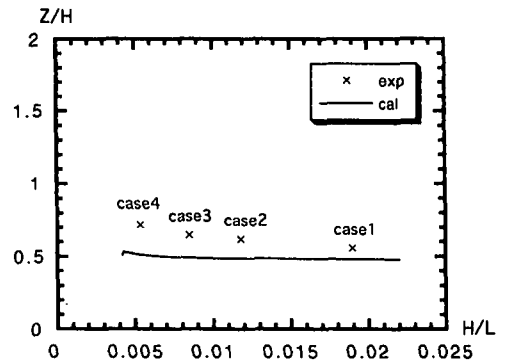


図-3 サージ量と波形勾配の関係

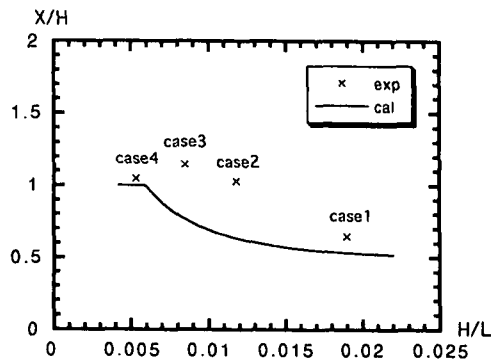


図-4 ヒープ量と波形勾配の関係

4. 観測概要および観測結果

(1) 現地観測装置と方法

図-5は、現地観測装置の概要を示したものであり、装置は、厚さ3mmのアルミ製の防水函体に収納されている。内部は、4室に分けられており、第1室にバッテリー、第2室に加速度計アンプ、第3室にセンサー類、第4室にレコーダがセットされている。センサー部は、アンプ内蔵型圧電型三成分加速度トランスデューサー、二成分傾斜計ならびにホール素子コンパスから成る。ツインタイマーを使用することで、特定の時間間隔での動揺観測の開始および停止を制御できる。また、各計測器で測定されたデータは、超低速度型のカセットデータレコーダに記録された。二時間に五分間の間欠的観測を行う場合は、上記のシステムを使用すると、一月以上の連続観測が可能となった。予備実験から各センサーの応答直線性は十分に認められた。

現地観測は、図-6に示す神奈川県小田原市の相模湾

西部の江之浦沖、水深約70mの地点に設置されている養殖いけす施設において行なわれた。観測は、1995年3月下旬と1996年2月上旬の2回行われた。第1回目の観測では観測装置の加速度計の応答特性を確認することを目的として施設に網が設置されていない状態、すなわち、いけす上部枠のみの動揺を観測した。この場合、施設は網の影響を受けていないため、施設の波浪動揺は来襲波浪の水面変動をほぼ反映するものと考えられる。したがって、観測加速度から算定される計算動揺量と観測波浪データとを比較し、波浪動揺と一致するよう加速度計の応答係数を求めた。

(2) 現地観測結果

図-7および図-8は、2回の観測期間中に得られた鉛直動揺量の加速度スペクトルを比較したものである。図-7は、いけす網が設置されていない状況で観測された鉛直動揺の加速度スペクトルを示したものである。図中の矢印は、観測時の来襲波浪の卓越周波数を示したものである。これより、高周波成分側にノイズが認められるが、加速度スペクトルの卓越周波数0.2Hzと来襲波浪のそれがほぼ一致していることから、施設は波浪と同期して動揺していたと考えられる。一方、図-8は、いけす

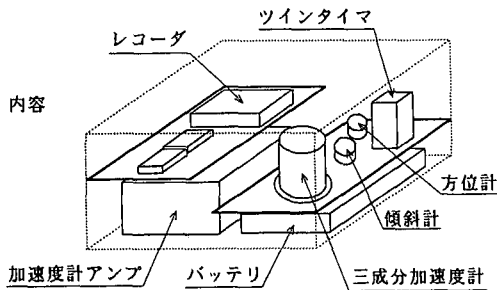


図-5 現地観測装置の概要

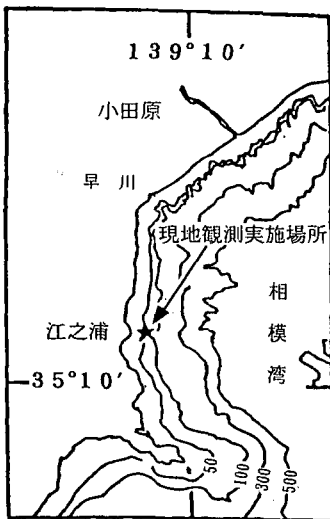


図-6 現地観測場所

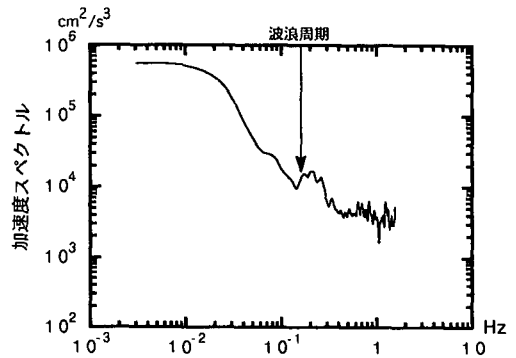


図-7 いけすの鉛直動揺スペクトル（網無し）

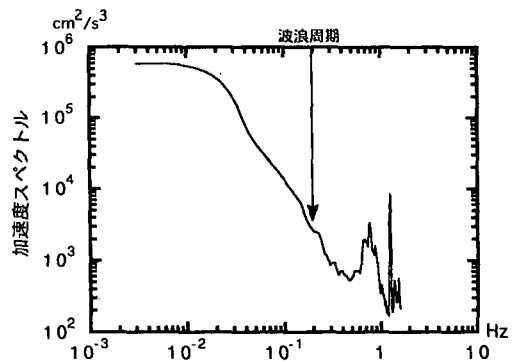


図-8 いけすの鉛直動揺スペクトル（網有り）

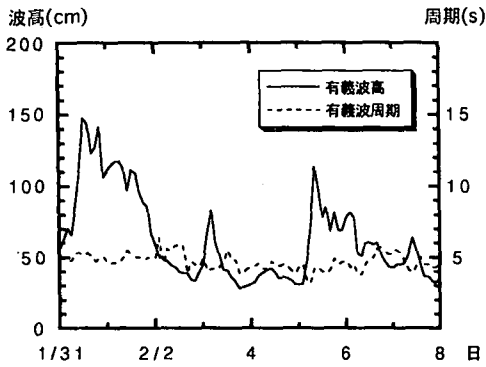


図-9 観測期間中の有義波特性

網が設置された後の第2回目の観測期間中の同様の加速度スペクトルを示したものである。この図で、1 Hz 付近にスペクトルピークが明確に認められるが、計測上のノイズと考えるべきであろう。また図中の来襲波浪の卓越周波数近傍での、スペクトル変化をみると若干の変化はみられるもののきわめて微弱である。したがってこのとき施設の鉛直動揺は小さなものであったと考えられる。網の設置によって、施設の動揺特性は大きく変化し、その動揺量は減少すると考えられる。

以下では、前後2回の現地観測のうち、いけす網が設置されていた1996年1月31日から2月8日の間に行った現地観測の結果について検討する。

図-9は、観測期間中の有義波高ならびに周期の時間的変化を示したものである。1月31日の午後から2月1日にかけて1.5 m程度、2月3日に1 m、そして2月5日に1 m程度の波浪が来襲している。また2月4日頃は静穏であったことがわかる。現地観測結果との比較のために、各観測時点での有義波の条件を入射波条件として、いけす動揺量の計算を行った。

図-10は、各観測時刻のいけすのヒープ量の観測値と計算値とを比較したものである。これより、期間中での観測ヒープ量は最大で約50 cm程度と図-9の表面波の振幅に比べて五分の一程度となっていること、期間中の波浪条件の変化とヒープ量の変化と対応が明確でないこと、観測値の最大ヒープ量は、75 cm程度で、計算結果とほぼ一致するが、発生する時刻は異なっていることなどがわかる。

図-11は、同様に観測期間中の最大サージ量の観測結果と計算結果の経時変化を表したものである。実線は、計算結果を、点線は観測結果を示している。ヒープ量の計算結果と同じく、波浪データをもとにサージ量は計算されるため、有義波の変化パターンと同じ傾向となっている。1月31日から2月2日にかけて実測値と計算値の最大値はほぼ等しいものの、その出現する時刻は大きく

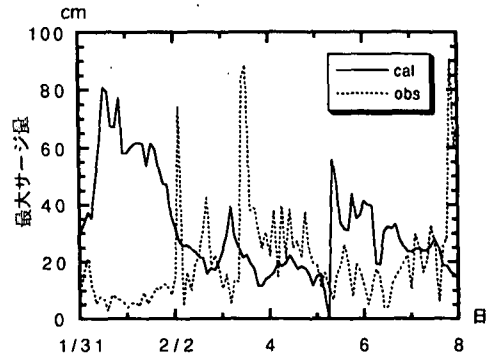


図-10 最大ヒープ量の経時変化

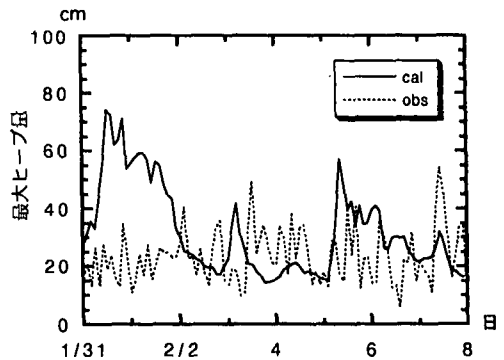


図-11 最大サージ量の経時変化

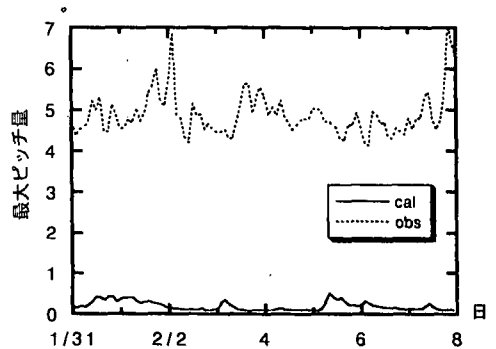


図-12 最大ピッチ量の経時変化

異なっている。観測結果に特徴的なことは、来襲波高が大きい場合、サージ量の観測値が小さい値をとり、逆に、波高が小さい場合に大きなサージ動揺量を示している。また、図中で急激に動揺量に変化している点が3カ所ほど現れているが、これについては加速度計の衝撃などによる誤作動によるものと思われる。

図-12は、最大ピッチ回転量の計算結果の時系列変化に表したものである。ピッチ量の計算値と観測値とを比

較すると、計算値は $1(^{\circ})$ 未満であるのに対して、観測値は $4\sim 7(^{\circ})$ の値を記録している。これについては、計算値では、養殖施設の重心に対する回転角を求めているのに対して、観測値は、枠組施設の上で観測されたもので、枠組施設の変形角も含まれて観測されたことによると考えている。

また、同じ観測記録から、いけすのロール運動やヨー運動について以下のことが明らかとなった。

- 1) いけすのロール運動は、あまり大きな変化を示さず、ほぼ $2\sim 3(^{\circ})$ 程度一定して存在する。
- 2) ピッチ運動は、最大ロール量の約2倍以上の回転量を示し、 $5(^{\circ})$ 付近を中心として、 $4\sim 8(^{\circ})$ の間で変化している。
- 3) ヨー回転量は、観測期間中はほぼ一定で、東北東の値を示していた。係留タイプの養殖いけす施設では、ほぼ一定方向に安定的に係留されるとしてよい(守村ら、1993)。

5. ま と め

本研究では、沖合いけす施設の波浪動揺に関して解析的かつ実証的な観点から研究を行った。得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- 1) 無人かつ長期間の測定を可能にした観測装置を開発し、改良を加えた。この観測装置を用いることにより、現地施設の正確な応答特性を知ることができる。

- 2) 本数値シミュレーションにより実験室での模型動揺については本モデルでほぼ予測可能であるが、現地施設の動揺について完全に再現できるまで至っていない。

- 3) いけすに設置される網によって、その動揺特性は大きくことなり、動揺量は減少すると考えられる。

現地観測にあたって、神奈川県相模湾水産試験場の石戸谷氏をはじめ、試験場の皆様には、多大な御協力を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

なお、この研究の一部は、文部省科学研究費補助金一般研究C(代表者松原雄平)により行われた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 石戸谷博範・高木 力・岩田静夫 (1993): 沖合養殖いけすにおける網の挙動について、平成5年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 115-116.
- 農林統計協会 (1995): 漁業白書 (平成6年度版), (財)農林統計協会, p. 328.
- 松原雄平・野田英明・西平福広 (1990): 外海いけす施設の波による動的応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 714-718.
- 松原雄平・野田英明・黒岩正光・安倍伸弥 (1993): 沖合養殖筏施設の波浪動揺に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 916-920.
- 守村真次・菊池省吾・大谷誠二・田上征志 (1993): 沖合養殖パイロットファームについて, 平成5年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 111-1114.