

沖合養殖筏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**・安倍 伸弥***

1. 緒 言

わが国における栽培漁業は、内海域をその主な漁場として発達を遂げ、種々の増養殖施設が開発されてきた。本研究で取り上げる養殖筏施設も、カキ、ホタテならびに真珠などの有用貝類の養殖を目的とする水産構造物の一つである。平成元年度の漁業白書（農林水産統計協会, 1989）によれば、海面筏養殖は、わが国の総海面養殖事業の中で、2割以上の生産額を上げており、主要な養殖施設の一つであると言える。

しかし、近年、油濁ならびに赤潮に代表される内海域での突発的な水質汚濁の発生によって、海面養殖業は、大きな漁業被害を被っている。とくに、赤潮の発生に関しては、継続期間が長期にわたる汚濁件数は減少する傾向を示していない（産業技術会議, 1990）。

このため、漁業被害を低減するとともに養殖スペースを拡大する目的で、沖合海域に養殖筏施設を設置する事例が増えつつある。しかしながら、外海域に試験的に設置された養殖施設の流失や破損などの報告がなされていることから、養殖筏施設の構造設計ならびにその係留施設の耐波設計法の確立が急務とされている。そこで、この研究では外海域に設置された養殖筏施設が波浪に対して、いかなる動的応答現象を呈するか、また、それともなう養殖貝の運動特性等について、解析的ならびに実験的に検討しようとするものである。また、貝類は中間育成時期に養殖籠が動揺すると、斃死や貝殻の変形を起こすことが知られており、筏養殖の機能向上という側面からも、筏および養殖塊の運動特性を明らかにすることが必要と考えられる。

以上の観点から本研究では、①筏施設ならびに貝籠を多自由度系の離散化質量モデルで置き換えた波浪応答モデルを導き、波による施設の動的な応答量を算定すること、②水理模型実験を行って、解析モデルによる動揺量の算定精度の検証を行うこと、さらに③外海に係留された現地施設を想定した波浪応答シミュレーションを行な

い、波による現地施設の動揺特性ならびに養殖塊の2次元動揺を明らかにすることを主目的としている。

2. 養殖筏施設の概要

養殖筏施設は、一般に垂下式養殖施設と呼ばれる係留施設のひとつで、図-1に示すように、浮子によって海面に保持される梁材（筏部）、筏部からロープによって養殖物を懸垂した垂下連部ならびにロープ等でアンカブロックに固定する係留部から成っている。垂下連には、カキ・真珠などの貝類を収容し、養殖期間中に、人為的に給餌しなくても貝類は海中のプランクトンを摂餌し、成長する。筏部の大きさは、10m～20mの規模で、垂下連長は約10mである。筏1基あたり約500本程度の垂下連が設置されている。係留方法としては、2点係留方式がとられ、外力に対しては必ずしも十分ではないが、以上のような構造形式から、これまでは内湾性の海域に設置されてきた。

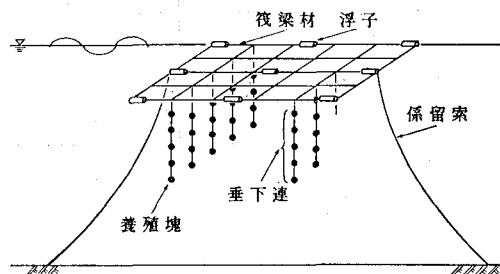


図-1 養殖筏施設の概要

3. 養殖筏施設の波浪応答モデルの誘導

中村・上北ら（1977）は、筏施設の設計外力を算定するために、筏部と垂下連部とを便宜的に分離し、垂下連が単体で、波動下で動揺する時の垂下連に作用する鉛直ならびに水平力について算定方法を示し、模型実験および現地観測結果との比較検討を行っている。しかし、中村・上北らの計算では、垂下連の最上部の養殖塊の境界条件として水粒子の軌道を与えていること、また単一垂下連の二次元運動に限られており、筏施設の動揺と垂下

* 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

*** 学生会員 鳥取大学大学院

連の運動との相互の連成運動が考慮されていないことなど必ずしも十分ではないと考えられる。そこで、本研究では、波浪に対する養殖筏の応答量を算定し、その結果を使用して、垂下連の二次元動揺量を算定する方法を採用した。

3.1 筏部の動揺算定法

まず、筏部の2次元運動を計算するために以下のよう
な仮定を設けた。

- 1) 筏施設は、波向きに平行に設置されている。
- 2) 筏から垂下された養殖塊は、球で代表でき、養殖塊に作用する流体力は、垂下連が変形しないものとして求めた流体力が上部の筏部に直接作用する。
- 3) 係留索に作用する流体力は無視できる。
- 4) 波は微小振幅波で表される。

以上の仮定に基づいて、筏施設に作用する流体力を与えて、筏部の応答計算モデルを誘導した。図-2は、応答計算モデルを誘導する際の座標系ならびに筏部に作用する外力を模式的に示したものである。

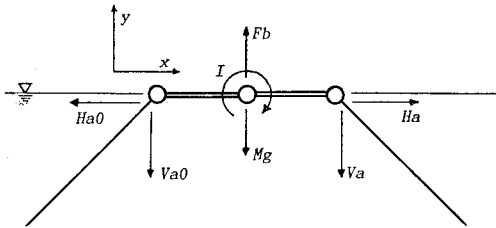


図-2 x, y 座標系と筏部に作用する流体力

筏部に作用する流体力を相対速度ならびに相対加速度を考慮したモリソン式で与えると、筏部の2次元運動は、次のような運動方程式で与えられる(松原ら, 1990)。

$$M\ddot{x} = F_h + H_a - H_{a0} \dots\dots\dots (1)$$

$$M\ddot{y} = F_v + F_b - V_a - V_{a0} - M_g \dots\dots\dots (2)$$

$$I\ddot{\theta} = (H_a - H_{a0})m + (V_a - V_{a0})n + F_h p \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 M は全ての垂下連部分を含めた筏施設の質量、 F_b は、同じく筏の浮力、 F_h 、 F_v は、それぞれ筏に作用する水平ならびに鉛直方向の流体力である。 F_a および F_{a0} は、それぞれ岸側および沖側の係留索張力の水平成分であり、 V_a および V_{a0} は、それぞれ岸側ならびに沖側の係留索の鉛直成分である。また θ は、筏施設の重心回りの回転量、 I は、垂下部分をも考慮した筏部の慣性モーメントである。 m 、 n および p は、それぞれ H_a 、 V_a および F_h の作用点から重心までの距離である。また、 $\cdot$ は、時間に関する微分演算記号である。流体力は、前述のようにモリソン式によって、次のように与えられる。

$$F_h = C_m \rho V (du/dt - \dot{x}) + C_a (\rho/2) A (u - \dot{x}) |u - \dot{x}| - C_v \rho V \dot{x} \dots\dots\dots (4)$$

$$F_v = C_m \rho V (dv/dt - \dot{y}) + C_a (\rho/2) A (v - \dot{y}) |v - \dot{y}| - C_v \rho V \dot{y} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_m ：慣性力係数、 C_v ：付加質量係数、 C_a ：抗力係数、 V ：筏容積、 u 、 v ：水粒子速度の水平ならびに鉛直成分、 ρ ：流体密度である。計算では式(1)から(3)の各微分項を差分法によって置き換え、緊張係留ならびに弛緩係留の異なる係留方式に対して、応答特性を計算した。索張力の計算では、カタナリー理論から算定される係留索張力を初期張力として与え、初期変位および初期速度を0とした。

3.2 垂下連部の動揺算定法

以上の計算から、波の一周期間の施設動揺量が算定されると、各垂下連の動揺量が明かとなるので、それを、垂下連の上端境界条件として使用し、垂下連の動揺量を算定した。図-3は、垂下連の模式図ならびに座標系を示したものである。

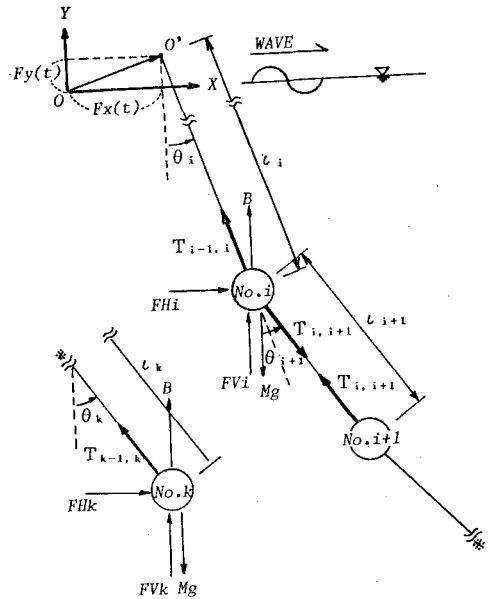


図-3 座標系並びに垂下連模式図

静水時の垂下連の最上部に x 軸をとり波の進行方向を正とし、 y 軸は垂下連の位置に鉛直上向きを正にとり座標原点を置いた。図に示すように、垂下連上端から i 番目の養殖塊(沈子)を要素 i ($i=1 \dots k$) とする。図のように垂下連の支点が o から o' へと水平方向に F_x 、鉛直方向に F_y だけ移動した場合を考える。

上から i 番目の垂下ロープの長さを l_i 、その傾斜角を θ_i とすると、要素 i の座標 (x_i, y_i) は

$$x_i = \sum_{j=1}^i (l_j \sin \theta_j) + F_x(t) \dots\dots\dots (6)$$

$$y_i = - \sum_{j=1}^i l_j \cos \theta_j + F_y(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

と与えられる。したがって、要素 i の x, y 方向への加速度は、

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^i \{ (\ddot{l}_j - l_j \dot{\theta}_j^2) \sin \theta_j + (2\dot{l}_j \dot{\theta}_j + l_j \ddot{\theta}_j) \cos \theta_j \} + \ddot{x}(t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^i \{ (-(\ddot{l}_j - l_j \dot{\theta}_j^2) \cos \theta_j + (2\dot{l}_j \dot{\theta}_j + l_j \ddot{\theta}_j) \sin \theta_j \} + \ddot{y}(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。よって、要素 i の垂下ロープの接線方向ならびに法線方向に関する運動方程式は、それぞれつぎのようになる (吉原ら, 1981)。

$$\begin{aligned} & M \left\{ \sum_{j=1}^i (\ddot{x}_j) + \ddot{x}(t) + (x_j/l_j) \ddot{y}(t) \right\} \\ &= - \frac{x_i}{l_i} (Mg - B) + F_{Hi} + \frac{x_i}{l_i} F_{Vi} \\ &+ T_{i,i+1} \left(\frac{x_{i+1}}{l_{i+1}} - \frac{x_i}{l_i} \right) \quad \dots\dots\dots (10) \\ & M \left\{ \sum_{j=1}^i \left(-\frac{1}{l_j} (\dot{x}_j)^2 \right) + \frac{x_i}{l_i} \ddot{x}(t) + \ddot{y}(t) \right\} \\ &= -T_{i-1,i} + (Mg - B) + \frac{x_i}{l_i} F_{Hi} - F_{Vi} + T_{i,i+1} \\ &\quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここに、 M は各要素 (養殖塊) の質量、 $T_{i,i+1}$ は要素は (i) と要素 $(i+1)$ を結ぶ垂下ロープの張力、 g は重力加速度、 B は要素に働く浮力、 F_{Hi} および F_{Vi} は、要素 i に働く波力の水平成分ならびに鉛直方向成分であり、前出の式 (4) および式 (5) で与えられる。さらに要素間のロープは、伸縮せず、たわむことがないという仮定を設定することで、次の拘束条件を得る (松原ら, 1985)。

$$\begin{aligned} & 2(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i)^2 + 2(x_{i+1} - x_i)(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) \\ &+ 2(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i)^2 + 2(y_{i+1} - y_i)(\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) = 0 \\ &\quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

以上の運動方程式と拘束条件式の各項を差分式に変換し、これらを連立させて、波による 2 次元平面内での応答量を数値計算で求めた。

4. 実験方法

4.1 実験装置

長さ 24m、深さ 1.1m、幅 0.6m の鋼製 2 次元波動水槽に 図-4 に示すような長さ 48cm、幅 20cm の筏模型を係留した。筏模型は、アルミパイプを組み合わせて構成されており、6 箇所、直径 3cm のプラスチック球を配置し、浮力を与えている。各垂下連は、ビニール製の釣り糸に直径 1.5cm の沈子 (プラスチック球) を等間隔に設置したもので、それぞれ筏上の 6 個の浮子から垂下されている。垂下連の沈子の水中重量は、

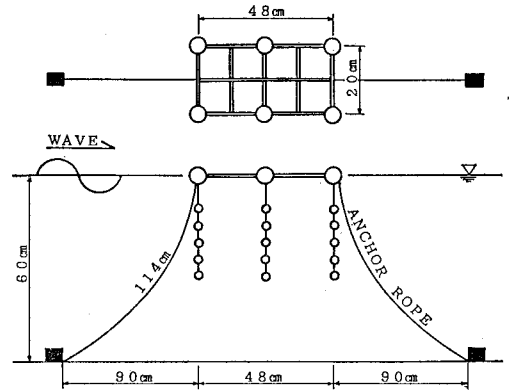


図-4 筏施設模型

表-1 模型諸元

	浮子 (沈子) 数	長さ (cm)	体積 (cm)	重量 (gf)	余剰浮力 (gf)
筏 部	6	244.0	155.2	122.1	33.2
垂下連部	5	26.0	8.85	9.2	-0.4

球の中に鉛をつめることで、調整されている。表-1 は、実験模型諸元を示したものである。模型の係留索は、直径 1mm のステンレスワイヤーであり、緊張係留時で 109cm、弛緩係留時で 114cm とした。

4.2 実験方法

波動水槽に模型施設を係留した後、種々の特性の規則波を作用させ、係留索張力の測定ならびにビデオ画像解析装置を援用して筏施設の動揺解析を行った。

係留索張力の測定は、海底のアンカー一点に設置されたロードセルを用いて行われた。また、模型の動揺量を測定するために、水槽ガラス壁を通して、ビデオカメラで波動下の施設ならびに垂下連の運動を撮影し、解析した。解析に使用した画像解析装置は、移動する対象を、1 フレーム毎に自動的に追跡し、対象物の重心位置の 2 次元座標を計測するものである。この解析システムで、筏部分の移動ならびに回転量を、また垂下連の各沈子の動揺量を測定した。

実験で設定した波浪条件は、水深を 60cm と一定に保ち、波高を 2.9cm~5.2cm の範囲で、また周期を 1.1sec~2.0sec の範囲で、それぞれ変化させた。

5. 実験結果及び考察

5.1 筏施設の動揺量に対する検証

図-5 は、実験から得られた筏部の水平変位量 x ならびに回転変位量 θ と波形勾配の関係を示したものである。同図には、計算から得られる各変位量も示されている。これらの図において、弛緩係留ならびに緊張係留

の二つの係留方法により、施設浮体部の動揺特性が異なっている。これは、弛緩係留では、索による鉛直ならびに水平動揺量の拘束が少ないことによる。一方、緊張係留の場合、回転運動が卓越することがわかる。計算結果と実験値を比較すると、いずれの係留方法に対しても、施設浮体部の動揺に関しては、ほぼ両者は一致することがわかる。

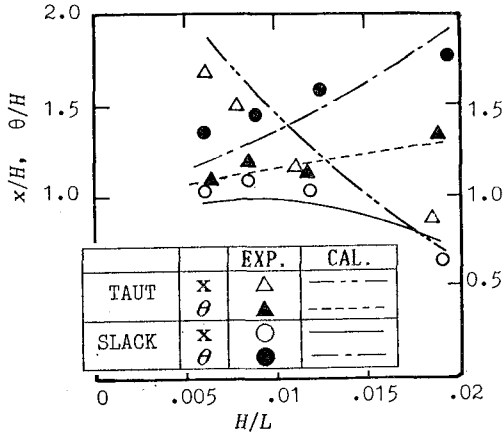


図-5 筏部の変位量の比較

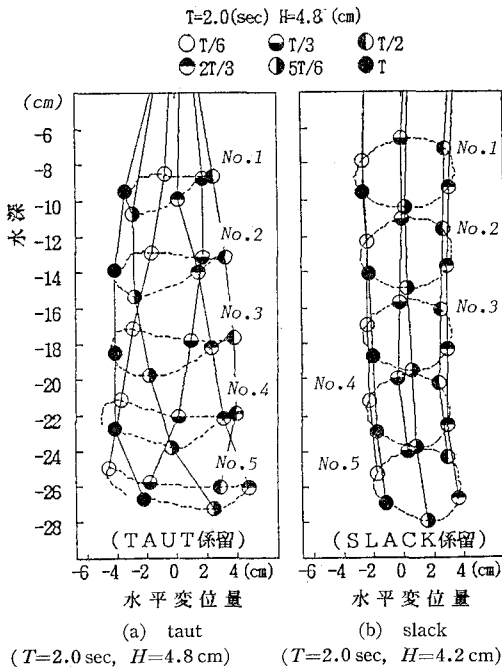


図-6 垂下連の動揺パターンの比較

5.2 垂下連の動揺に関する検討

図-6 は、波浪条件を変えずに、係留方法を緊張係留から弛緩係留へと変化させた場合の垂下連の動揺パターンを比較したものであり、同図の (a) が緊張係留時、

(b) が弛緩係留時の実験結果を示している。これより、緊張係留の場合、垂下連の養殖塊は扁平な運動を呈するのに対し、弛緩係留のそれは、ほぼ円運動に近くなっている。垂下連の運動特性は、施設の係留法に影響を大きく受けることがわかる。

図-7(a) および (b) は、2種類の波浪条件に対して得られた、垂下連の2次元動揺の実測結果と計算結果を比較したものである。図中の○印が養殖塊を表し、実線は垂下ロープを示している。また混乱を避けるため計算結果には、垂下ロープは示されていない。これらの図で、若干の差異は見られるが両者の結果はほぼ一致して

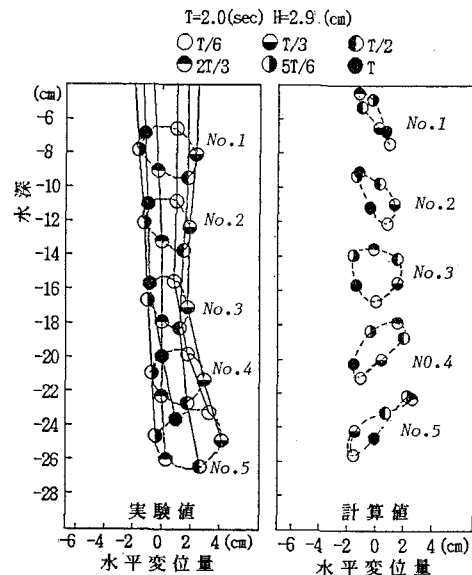
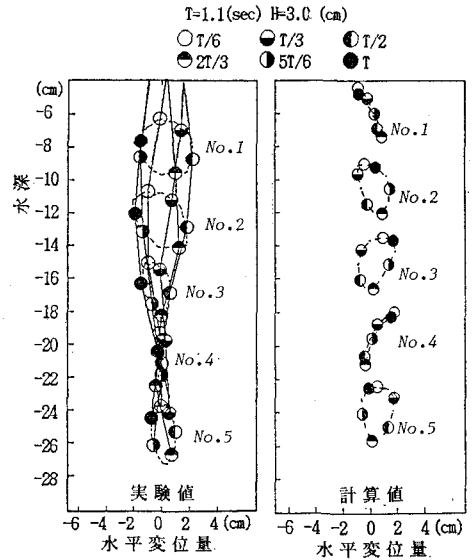
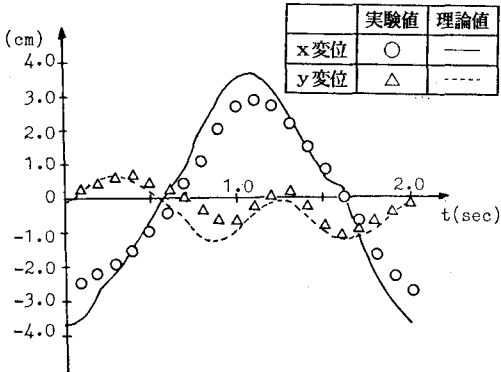


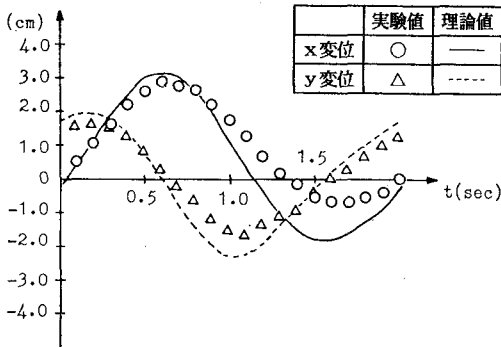
図-7 垂下連の動揺パターンの比較

いる。

図8(a)および(b)は、各沈子の水平ならびに鉛直変位量の時間的変化を示したものである。この図からも、緊張係留の場合は、水平動揺が卓越し、一方、弛緩係留の場合は、水平ならびに鉛直動揺が、同程度生じることがわかる。また、いずれの係留方法でも、実測値と計算値とは一致していることがわかる。



(a) taut ($T=2.0$ sec, $H=3.0$ cm)



(b) slack ($T=2.0$ sec, $H=2.9$ cm)

図—8 養殖塊の運動の時間的変化

5.3 現地施設の垂下連の波浪動揺シミュレーション

以上の検討から、本研究の筏施設の波浪応答算定モデルの適合性を検証したものととして、実海域に係留されている施設を想定して、波浪応答シミュレーションを試みた。現地施設については、中村・上北ら(1977)のデータを元にしたが、シミュレーションを行うに際して、垂下されている養殖物の流体力係数等の諸係数としては球体に対する値を採用した。図—9は、水深20mの海域に係留された10m四方の大きさの筏に、波高2.0mならびに周期8.0secの波が来襲したと想定した場合の応答計算から得られた、現地施設の垂下連の動揺パターンを、波の一周期について示したものである。これより、垂下養殖塊の動揺は、垂下連上部では、これより、垂下養殖塊の動揺は、垂下連上部では、円軌道に近いものの、水深

が大きくなるにつれてその軌道振幅が大きくなるとともに、その運動が複雑になることがわかる。この結果から、垂下連の下方養殖塊は大きな振動を繰り返しているものと考えられ、垂下連の最適長さについて検討する必要がある。

6. 結論

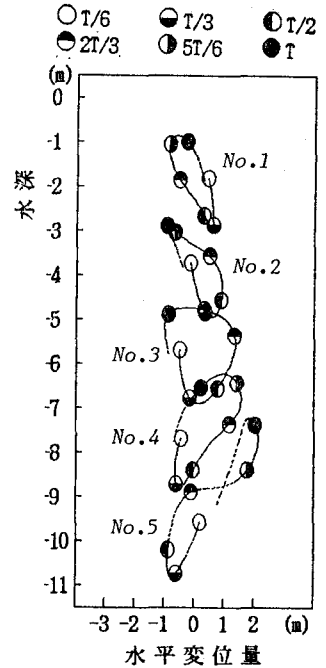
以上の養殖筏施設の波浪応答特性に関する検討から、弛緩係留ならびに緊張係留という係留方法により施設浮体部の動揺

特性が明確に異なり、弛緩係留の場合、鉛直ならびに水平動揺量が卓越し、緊張係留の場合、回転運動が卓越することが明かとなった。また、いずれの係留方法に対しても、施設浮体部の動揺に関しては、計算結果と実験結果とは、ほぼ一致することがわかった。一方、垂下連の運動は、浮体部と連成し波浪条件によって大きく変化することが明かとなった。また、本計算モデルで予測された垂下連の運動は、実測結果とほぼ一致することがわかった。

現地施設の筏施設の波浪応答シミュレーションを行い、垂下連の運動については水平方向の運動が大きくなることが分かった。しかし、現地施設のモデル化に関しては、実際の養殖籠の流体力係数の設定、垂下ロープ、係留索のモデル化等、今後なお検討する余地が残された。

参考文献

- 農林統計協会 (1989): 図説漁業白書平成元年度, pp. 58-59.
- 産業技術会議編 (1991): 宇宙・海洋の有効利用と地球の保全, pp. 203-205.
- 中村 充・上北征男 (1977): 養殖筏の設計外力に関する研究, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 625-628.
- 松原雄平・野田英明・西平福宏 (1990): 外海養殖いけす施設の波による動的応答, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 714-718.
- 吉原 進・河野健二ほか, (1981): 海中係留球の波浪応答, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 411-415.
- 松原雄平・平尾 彰・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.



図—9 現地施設の計算動揺量