

超大型浮体式海洋構造物の 2 次長周期波力による 弾性応答に関する研究

増田 光一*・有田 守**・佐野 堅一**
前田 久明***・居駒 知樹****・鈴木 圭太*****

1. 緒 言

超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）の基本設計を行う際、通常浮体では、問題とされない長周期波中の波浪中弾性応答と、係留問題に関して浮体と係留系の固有周期が長くなるため漂流力特性の把握が重要となってくる。

線形の弾性応答の研究において上記のことが指摘され現象として把握されている。さらに、不規則波中での弾性応答を考えた場合、1 次弾性応答だけではその特性を把握できない可能性がある。なぜなら、不規則波によって誘起される 2 次長周期波による弾性応答が、無視できないオーダーで発生する可能性があるからである。2 成分波中での 2 次弾性応答を取り扱った研究(居駒, 1997)で、2 成分波の組み合わせによっては、2 次差周波数弾性応答が、1 次弾性応答と同等の大きさで存在すること、さらに変動波漂流力が定常波漂流力に匹敵する存在であることも理論により証明されている。また、2 次差周波数成分の応答は、長周期荷重が構造物の疲労に影響すること、メガフロートを空港と想定した場合、航空機の誘導装置の精度に影響を与えることが考えられる。しかしながら、実験により 2 次弾性応答について明確にされた研究は著者の知るかぎりほとんどない。

そこで、本研究では第一段階として水槽実験により 2 成分波中での弾性浮体模型に生じる 1 次、2 次応答を計測した。2 次応答に関しては、2 次差周波数応答に着目し既存の流弾性応答推定法(居駒, 1997)と比較検討した。また、浮体をばね係留しその張力を漂流力とし変動波漂流力を計測した。

2. 水槽実験

2.1 実験概要

実験は、東京大学生産技術研究所千葉実験所内の船舶航海性能試験水槽にて行った。実験模型は、長さ 3.00 m、

幅 0.7 m、高さ 0.03 m、吃水 0.002 m 材料に発泡スチロールを用いて実機メガフロートの 1/1000 を想定した弾性浮体模型を使用した。模型詳細は、表一に示す。入射波は、2 成分波を用いて $\omega=3.0\sim10.0$ rad/s の中で組み合わせ 94 ケース行った。また、入射波高は最大 0.04 m とした。水深は 2.15 m とし、模型の係留は、ばねを用いて波上、波下側で係留した。模型とばねの固有周期は、 $\omega=3.88$ rad/s である。

表一 実験・計算モデル諸元

長さ (m)	3.00
幅 (m)	0.7
高さ (m)	0.03
吃水 (m)	0.002
重量 (N)	3.26
曲げ剛性 (N・m ²)	0.08393×10^7

2.2 計測項目及び計測装置

実験により計測した項目を以下に示す。

- a) 入射波
容量式波高計により模型波上側前方にて計測。
- b) 鉛直変位
ポジションセンサーにより模型波上側端部 (T1) と模型中央部 (T2) で計測。
- c) 曲げモーメント
模型長手方向上の浮体下面に歪みゲージ (波上側から G1, G2) を設置し曲げモーメントを計測。
- d) 浮体下面の圧力
模型長手方向上の浮体下面に圧力センサー (波上側から P1, P2) を設置し浮体下面の圧力を計測。
- e) 波漂流力
ばね係留を介してリングゲージにより計測。実際にはばねの張力であるが、本文では、波漂流力として解析を行った。

2.3 実験結果

実験解析は、各計測装置により得られた時系列データの定常部を FFT によりスペクトル解析した。さらに本文で示すスペクトル解析結果の 2 つのグラフは、左

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科
** 日本大学大学院 理工学研究科
*** 工博 東京大学
**** 工博 東京大学生産技術研究所
***** 株式会社サンユウテクノス

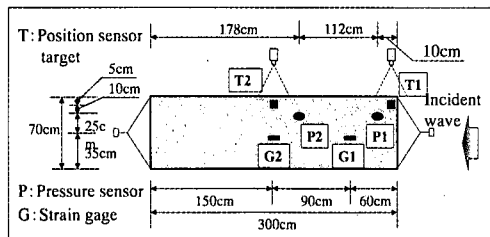


図-1 実験配置図

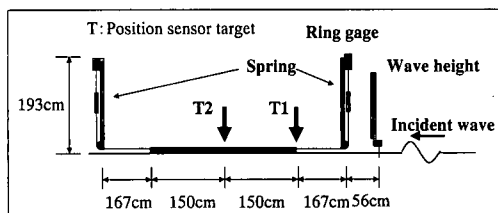


図-2 実験立面図

側は1次応答, 右側は2次応答それぞれ確認しやすいように縦軸をオーダーごとに調整してある。本文では, 94 ケースの実験から2次差周波数成分が顕著に現れていた実験結果, 入射波成分 $\omega_i=5.0 \text{ rad/s}$, $\omega_j=7.0 \text{ rad/s}$ のケースを示す。

a) 入射波

入射波の時系列を図-3, スペクトルを図-4に示す。図-4より1次周波数成分 $\omega_i=5.0 \text{ rad/s}$, $\omega_j=7.0 \text{ rad/s}$ が確認できる。また, 2次差周波数成分 $\omega^-=2.0 \text{ rad/s}$ も確認できる。

b) 鉛直変位

T1地点における鉛直変位実験結果を図-5, 6 T2を図-7, 8に示す。T1, T2においてスペクトル結果より

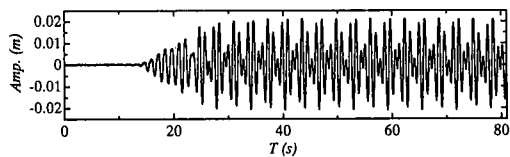


図-3 入射波時系列

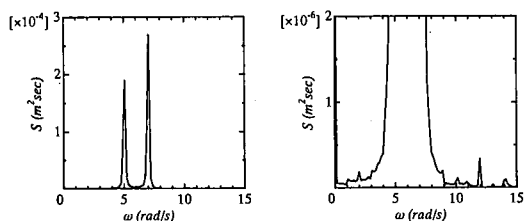


図-4 入射波スペクトル

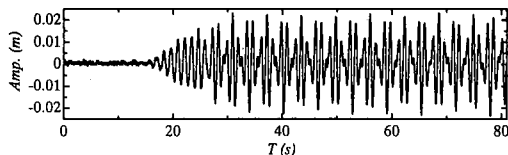


図-5 T1地点の鉛直変位時系列

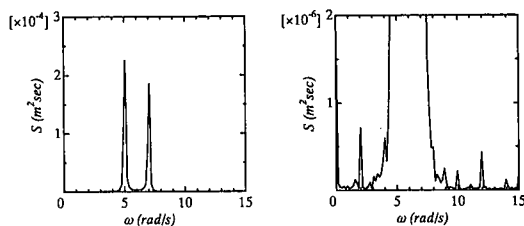


図-6 T1地点の鉛直変位スペクトル

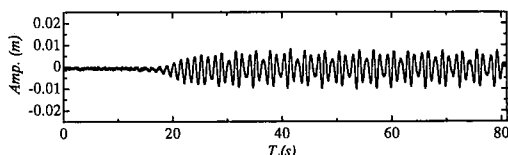


図-7 T2地点の鉛直変位時系列

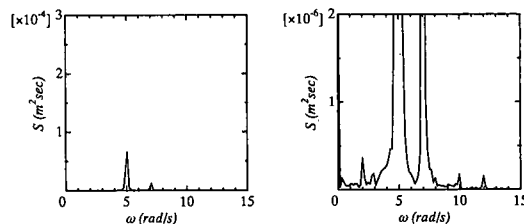


図-8 T2地点の鉛直変位スペクトル

2次差周波数成分がはっきりと確認できた。さらに入射波スペクトルと比較すると1次オーダーに対する2次差周波数成分の割合が大きいことが確認できる。また, T1とT2の応答を比較するとT2の応答はT1に比べ半分のオーダーであり, 浮体波上側端部の応答が大きいことが確認できる。さらに図-6, 8(右図)では, 2次和周波数成分の $\omega^+=12.0 \text{ (rad/s)}$ が2次差周波数成分と同等のオーダーで確認できた。

c) 曲げモーメント

図-10, 図-12は, 模型波上側端部(G1)と模型中央部(G2)のスペクトル解析結果である。この結果からスペクトルで1次周波数成分の1/100程度のオーダーで2次差周波数成分 $\omega^-=2.0 \text{ rad/s}$ の発生を確認できた。また, 2次和周波数成分 $\omega^+=12.0 \text{ rad/s}$ も2次差周波数成分と同オーダーで確認できた。

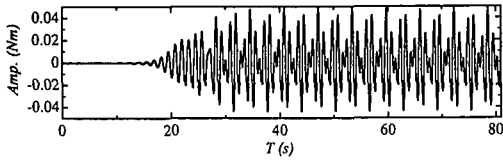


図-9 G1地点のモーメント時系列

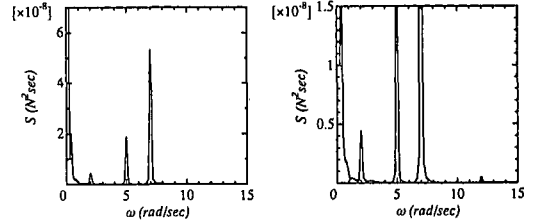


図-14 P1地点での浮体下面圧力スペクトル

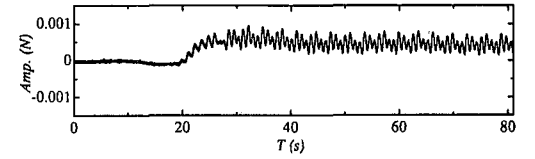


図-15 P2地点での浮体下面圧力時系列

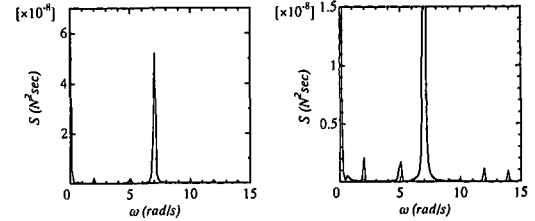


図-16 P2地点での浮体下面圧力スペクトル

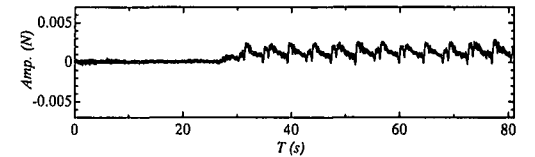


図-17 波漂流力時系列

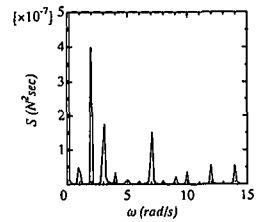


図-18 波漂流力スペクトル

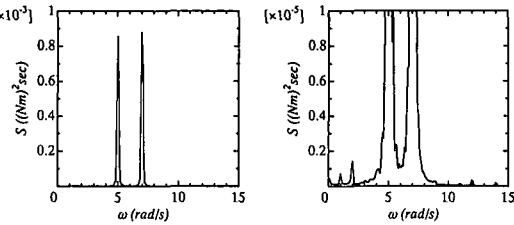


図-10 G1地点のモーメントスペクトル

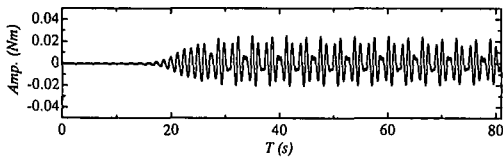


図-11 G2地点のモーメント時系列

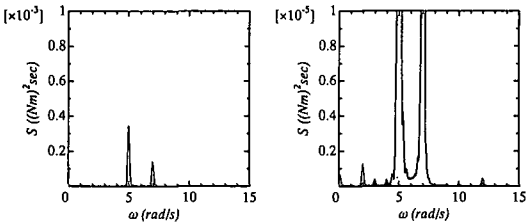


図-12 G2地点のモーメントスペクトル

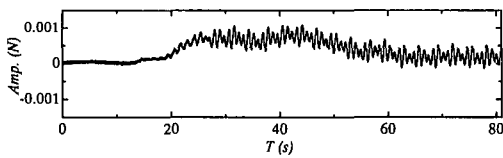


図-13 P1地点での浮体下面圧力時系列

d) 浮体下面の圧力

図-14, 図-16は, 模型波上側端部付近 (P1) と中央部付近 (P2) のスペクトル解析結果である。2次差周波数成分のスペクトルが1次周波数成分の1/10のオーダーであることが確認でき, 鉛直変位や曲げモーメントに比べて1次周波数成分に対する2次差周波数応答の割合が大きいことも確認できる。さらに, 図-13, 15の時系列では, 浮体端部であるP1での時系列にドリフト現

象がP2より顕著に見られる。これは, P1が浮体端部周辺であることで定常な圧力が加わること, 弾性変形が顕著に現れること, 水平方向の浮体の運動により複雑な圧力の変化が現象として生じていると考えられる。

e) 波漂流力

波漂流力の実験結果を図-17, 18に示す。図-18より2次差周波数成分 $\omega = 2.0$ rad/sが卓越していることが確認できる。また, 模型とばねの固有周期 $\omega = 3.88$ rad/

sでも同調現象により $\omega=4.0$ rad/sでその発生が確認できる。このことから1次周波成分、本研究では定常波漂流力よりも、2次差周波数成分である変動波漂流力が大きくなることが確認できる。

3. 計算概要

理論計算は、流弾性応答推定法(居駒, 1997)を用いた。この手法は、浅喫水を仮定した圧力分布法を、弾性応答解析にモード解析を適用し、これらの手法を基に摂動法により2次オーダーまで展開したものである。計算における座標系は図-19に示すとおりである。図中の Ω : 流体領域、 S_F : 自由表面、 S_H : 浮体底面、 S_B : 海底面を意味する。

本研究では、2次弾性応答に着目したため2次の運動方程式を(1)式に示す。さらに本研究では、剛性係数 S_{sr} に永田(永田, 1997)の手法を用いる。これは弾性モデルにおいて境界条件を満足させた手法であり、よって剛性項は(2)、(3)式になる。1次の運動についても同様に剛性項を置き換えて計算した。計算モデルの諸元は、実験と比較するために実験ケースと同様であるため、実験諸元の表-1の値を用いた。

$$\sum_{r=1}^M [(S_{sr} - \omega^{\pm 2}(M_{sr} + a_{msr}) - i\omega^{\pm} D_{nsr} + C_{sr}) q_{rj}^{\pm}] = f_{sj}^{\pm} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{sr} = D_a \iint_{S_H} \left[\left(\frac{\partial^2 \eta_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta_r}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial y^2} \right) + \nu \left(\frac{\partial \eta_r}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta_r}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial x^2} \right) + 2(1-\nu) \frac{\partial^2 \eta_r}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \eta_s}{\partial x \partial y} \right] dS_H \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$D_a = \frac{Fd}{12(1-\nu^2)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

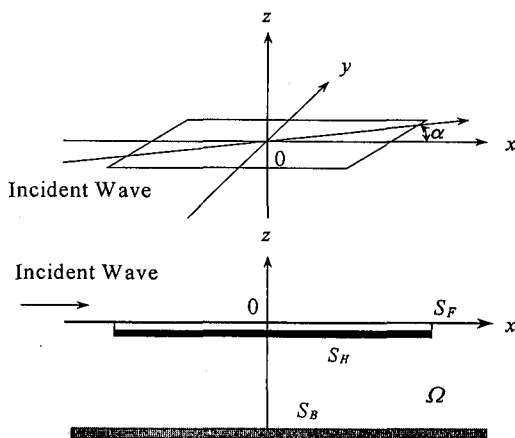


図-19 座標系

S_{sr} : 剛性による復元力係数, $\omega^{\pm}$: 2次和・差周波数成分, M_{sr} : 質量係数, a_{msr} : 付加質量係数, D_{nsr} : 造波減衰係数, C_{sr} : 復元力係数, q_{ri} : 基準座標, $f_{sij}^{\pm}$: 2次波強制力, D_a : 平板の曲げ剛性, η_r, η_s : r 次, s 次モードのモード型, ν : ポアソン比, d : 浮体高さ, E : ヤング係数である。

4. 実験結果と計算結果の比較

実験、計算結果は、入射波成分 $\omega_i=5.5$ rad/s, $\omega_j=6.0 \sim 10.0$ rad/sのケースの結果を示す。実験解析は、時系列データをFFTで処理し2次の差周波数成分を取り出し逆FFTで時系列データに戻しその振幅を2次の差成分の振幅とした。1次入射波振幅、1次鉛直変位振幅も同様にして解析した。まず1次の模型波上側端部(T1)、模型中心部(T2)の鉛直変位をそれぞれ図-20、図-21に示す。横軸は、入射波1次成分 ω_i と ω_j の差をとった2次差周波数成分の絶対値である。グラフ縦軸は、それぞれ1次鉛直変位 $Z_i^{(1)}, Z_j^{(1)}$ を1次入射波振幅 a_i, a_j で割って無次元化したものを足し合わせた。

図-20は、T1における1次鉛直変位の実験値と計算値のグラフであるが傾向、オーダー共によく一致していることが確認できる。さらに図-21でも実験値、計算値

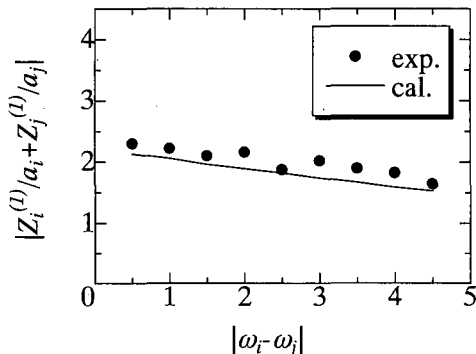


図-20 T1地点での1次鉛直変位実験、計算結果

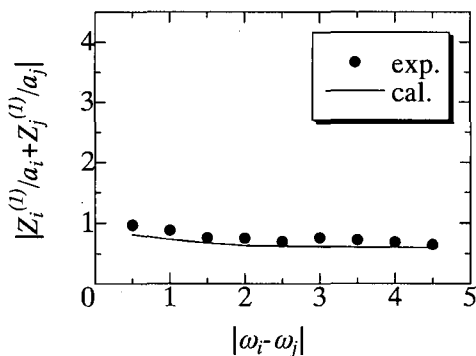


図-21 T2地点での1次鉛直変位実験、計算結果

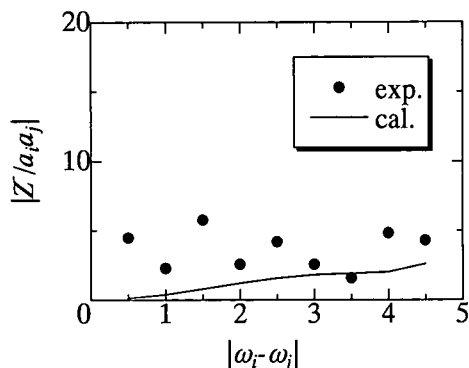


図-22 T1地点での2次差周波数鉛直変位実験, 計算結果

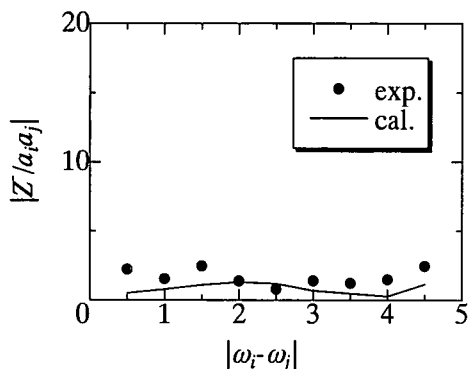


図-23 T2地点での2次周波数鉛直変位実験, 計算結果

共に傾向, オーダーについて計算値と実験値が一致している。1次の弾性応答の鉛直変位は, 既存の研究において実験と計算の比較が行われ共に傾向, オーダーが一致する。本研究では, 剛性項に永田の手法を導入したが, この手法の妥当性を確認することができた。

2次差周波数の鉛直変位に関する結果を図-22, 図-23に示す。横軸は図-20, 図-21と同様にした。縦軸は2次差周波数成分 Z を1次入射波振幅 a_i, a_j を掛け合わせたもので規格化した。

図-22は, T1での2次鉛直変位であるが実験値と計算値に傾向のずれがある。まず, 実験値についてだがFFTの解析精度に問題があることが考えられる。これ

は, 2次差周波数の応答がきわめて微小なため解析誤差が現れたとが原因と思われる。計算結果は, 端部での応答で非線形性が強く現れることが考えられる。この両面から今後の検討が必要であると考えられる。しかし実用的な範囲において一致していると考えられる。

図-23は, T2での2次差周波数応答の実験値と計算値の結果である。浮体端部の図-22と異なり実験値と計算値で非常によくオーダー, 傾向ともに一致している。浮体中央部では, 浮体端部に比べて非線形の影響が出にくかった為に計算の適用範囲内であったと考えられる。

5. 結 言

本研究より得られた結果を要約し以下に示す。

- ・本研究は実験により, 2成分波中における弾性浮体模型の鉛直変位, 曲げモーメントと浮体下面の圧力に2次差周波数成分の発生を確認した。
- ・2成分波の組み合わせにより模型とばねの固有周期に同調した場合, 定常波漂流力よりも大きな2次変動波漂流力が発生することを実験的に確認した。
- ・2次鉛直変位弾性応答に関して実験値と計算値を比較した結果浮体中央部においては, オーダー傾向ともに流弾性応答推定法との良好な相関があると考えられる。
- ・計算値, 実験値との比較により実験値が計算値を上回ることが確認され, 1次成分, 2次差成分が理論で考えられているよりも弾性変形に大きな影響を与える可能性があると考えられる。

参 考 文 献

- 居駒知樹・増田光一・前田久明 (1995): 超大型浅吃水浮体式構造物の弾性応答に関する研究, 海洋工学シンポジウム第13回造船学会, pp. 185-192.
- 居駒知樹 (1997): 超大型浮体式海洋構造物の流弾性応答推定法に関する基礎的研究, 日本大学博士論文.
- Maeda, H., K. Masuda, S. Miyajima, and T. Ikoma (1996): Hydroelastic responses of pontoon type very large floating offshore structure, Proceeding of the 15th International conference on OMAE, Vol. I, pp. 404-414.
- Nagata, S., H. Yoshida, T. Fujita, and H. Isshiki (1997): The Analysis of the Wave-Induced Responses of an Elastic Floating Structures, Proceeding of the 16th International conference on OMAE, Vol. VI, pp. 163-169.