

孤立リーフ地形内に係留された大型浮体の弾性応答 に関する模型実験

白石 悟*・原崎恵太郎**・米山 治男***・飯島 一博****

1. はじめに

従来、ポンツーン型大型浮体の設置に際しては、浮体への波浪外力を低減するために防波堤の背後に建設する方法が検討されている（例えば、Inoue, 1999）。しかしながら、防波堤により海水交換が妨げられ環境負荷が発生することが懸念されている。そこで、防波堤を建設せずに波浪外力を低減する方法として、自然のリーフ地形に大型浮体を設置し、リーフエッジでの砕波による波高減衰効果を利用する方法が考えられる。しかし、リーフ地形のような複雑な地形で、かつ極浅海域に係留された大型浮体の応答特性はあまり明らかになっていないのが現状である。

本研究では、孤立リーフ地形を対象とし、リーフ内に係留されたポンツーン型大型浮体について水理模型実験を実施した。リーフ内の波は、砕波し波高は減衰するが非線形化する。この影響によりリーフ内の浮体の応答特性も非線形化する。このようなリーフ内に係留された浮体の弾性応答特性について明らかにする。

2. 実験条件

水理模型実験は、港湾空港技術研究所のデュアル・フェース・サーベント型造波装置（加藤ら, 1999）を有する水槽において、図-1 に示す水槽内に模型縮尺 1/125 で製作した地形模型、大型浮体模型を設置して行った。孤立リーフ地形は南海の孤島を想定した地形モデルとした（以下、簡単に「リーフ」と記述する）。大型浮体模型の寸法は、12.0 m×1.2 m×0.04 m×0.008 m ($L \times B \times D \times d$) であり、実機換算すると 1500 m×150 m×5 m×1 m となる。ここで、 L 、 B 、 D 、 d は、長さ、幅、高さ、吃水である。実験の計測項目は、波高 33 点、流速 9 点、浮体の係留力 10 点、ひずみ 42 点、鉛直・水平変位 28 点

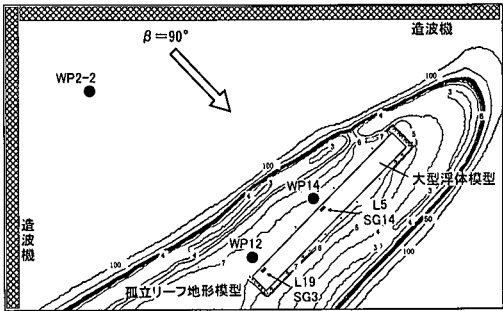


図-1 模型及び計測機器の配置図

表-1 実験ケース

	No	波の種類	S_{max}	$H_{1/3}^*(m)$	$T_{1/3}^*(s)$	
1	SIR 1	999	90	0.064 (8.0)	1.25 (14.0)	
2					1.43 (16.0)	
3					1.61 (18.0)	
4	SIR 2			1.25 (14.0)		
5				1.43 (16.0)		
6				1.61 (18.0)		
7	MIR 1	10		0.143 (17.88)	1.72 (19.2)	
8	MIR 2			0.016 (2.0)		

注：（ ）は現地換算の波高，周期を表す

とした。図-1 中の WP 2-2, WP 12, WP 14 は波高計測点、L 5, L 19 は浮体の鉛直変位計測点、SG 3, SG 14 は浮体のひずみ計測点を示している。表-1 に本実験で用いた波浪諸元を示すが、有義波高は $H_{1/3}^*=0.143, 0.064, 0.016$ m（現地換算：17.88, 8.0, 2.0 m）、有義波周期は $T_{1/3}^*=1.25, 1.43, 1.61, 1.72$ s（現地換算：14.0, 16.0, 18.0, 19.2 s）、主波向は $\beta=90^\circ$ 、方向集中度 $S_{max}=10$ 、999 とした。ただし、 $S_{max}=999$ は一方向波を表す。スペクトル形はブレットシュナイダー・光易型とした。なお、以下の記述においては、実験結果はすべて模型量で記述し、必要に応じて現地換算量を併記する。

3. リーフにおける波浪特性

（1）波浪の時系列

浮体に作用する波の特性を示すため、沖波 (WP 2-2) とリーフ内の浮体近傍の波 (WP 12) の特性の比較を行

* 正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室長
** 正会員 工修 株式会社エコー 環境水利部 (研究当時 運輸施設整備事業団)
*** 正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官
**** 正会員 工博 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 海洋構造研究室 研究官

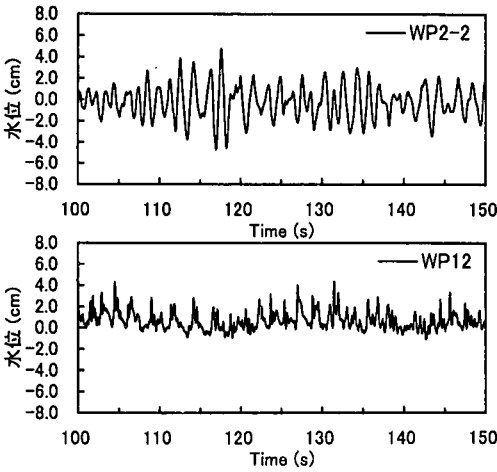


図-2 沖波とリーフ内における波浪の時系列の比較
(No. 3: SIR 1, $H_{1/3}^*=0.016$ m, $T_{1/3}^*=1.61$ s)

う。図-2は、一方向不規則波(SIR 1)について、沖波とリーフ内における波浪の時系列を比較したものであり、実験開始後より100秒後から50秒間の時系列を示している。ただし、これらは、リーフ内に浮体が設置されていない場合の時系列である。

図より、リーフ内では碎波により波高が減少し、かつ波形が非線形化し、さらにサーフビートによる長周期波が発生していることがわかる。

(2) 波浪のスペクトル解析

図-3は、図-2で示した沖波とリーフ内波浪について、パワースペクトルを示している。図より、入射波の有義波周期に相当する卓越周波数帯のエネルギーが、リーフ内では碎波により減衰することが確認される。一方で、低周波数側及び高周波数側では、エネルギーが増大している。低周波数側におけるエネルギー増大はサーフビートによる長周期波の生成によるものと考えられる。また、高周波数側でのエネルギー増大は、各成分波

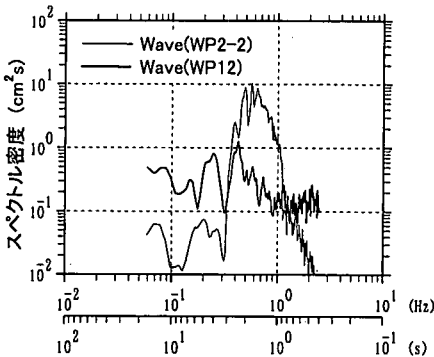


図-3 沖波とリーフ内における波浪スペクトルの比較
(No. 3: SIR 1, $H_{1/3}^*=0.016$ m, $T_{1/3}^*=1.61$ s)

に対してリーフエッジにおける2倍、3倍周波数成分波の生成によるものと考えられる。

4. リーフにおける浮体の鉛直変位応答特性

(1) 鉛直変位のスペクトル解析

図-4に、 $T_{1/3}^*=1.61$ sについて入射波高の異なる一方向不規則波($H_{1/3}^*=0.064, 0.016$ m)のスペクトルの応答関数を示す。図の上段と中段は、WP 2-2に対するWP 12とL 19のスペクトルの応答関数である。また、下段の図は、WP 12に対するL 19のスペクトルの応答関数である。上段と中段の図より、リーフ内波高、浮体端部の鉛直変位に関する応答特性としては、入射波の主成分である周期0.9~2.0 sの応答が1.0倍以下になっており、リーフエッジでの碎波による波高減衰効果が表れている。周期2.0 s以上の長周期波成分は、応答関数が1.0倍以上となり、リーフ地形でのサーフビートの発生が主要因であると考えられる。また、入射波高の $H_{1/3}^*=0.064, 0.016$ mの2種類(図中の太線、細線)を比較すると、沖波波高が高い方が応答関数の倍率が低い結果となり、沖波波高に対して非線形な応答特性を示している。次に下段の図より、リーフ内波高に対する浮体端部の鉛

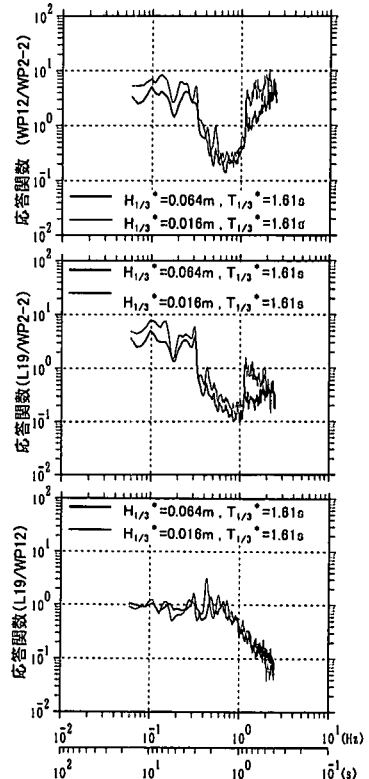


図-4 WP 2-2, WP 12, L 19 における応答関数の比較
(No. 3: SIR 1, $H_{1/3}^*=0.064$ m, No. 6: $T_{1/3}^*=0.016$ m)

直変位の応答特性は、一部の周期を除いて入射波高に依らずほぼ同じで、リーフ内波高に対しては線形的な応答特性を示している。

(2) 浮体の鉛直変位応答特性

図-5は、図-4に示した実験ケースについて、浮体長手方向の鉛直変位分布を表している。上段の図は、各計測点の鉛直変位有義値 $Z_{1/3}$ を沖波の有義波高 $H_{1/3}^*$ で除して無次元化している。また、リーフ内に浮体が設置されていない場合における沖波波高に対する浮体前面のリーフ内波高の比 ($H_{1/3\text{reef}}/H_{1/3}^*$) も同時に示している。下段の図は、各計測点の鉛直変位有義値 $Z_{1/3}$ をリーフ内の有義波高 $H_{1/3\text{reef}}$ で無次元化している。

上段の図より、沖波波高に対する鉛直変位の比は、 $H_{1/3}^*=0.064\text{ m}$ の場合は $0.2\sim0.4$ 、 $H_{1/3}^*=0.016\text{ m}$ の場合は $0.25\sim0.55$ となり、波高の小さい方が沖波に対する鉛直変位の比は大きい。また、沖波に対するリーフ内波高比は、リーフ地形が複雑なことから場所的に異なり、 $H_{1/3}^*=0.064\text{ m}$ の場合は $0.4\sim0.6$ 、 $H_{1/3}^*=0.016\text{ m}$ の場合は $0.5\sim0.75$ と幅を持っている。沖波に対するリーフ内波高比と鉛直変位の比は共に、入射波高の小さいときが大きい。この要因としては、入射波高が小さいために砕波が生じにくくリーフエッジでの波高減衰効果が小さいためである。また、 $X/L=0.4\sim0.5$ 付近ではリーフ内波高比が大きくなっているが、これは実験したリーフ地形の一部に水深の深い箇所があり、ここからの波の進入の影響である。以上より、リーフエッジにおける水深は、砕波による波高減衰効果と密接な関係があると言える。

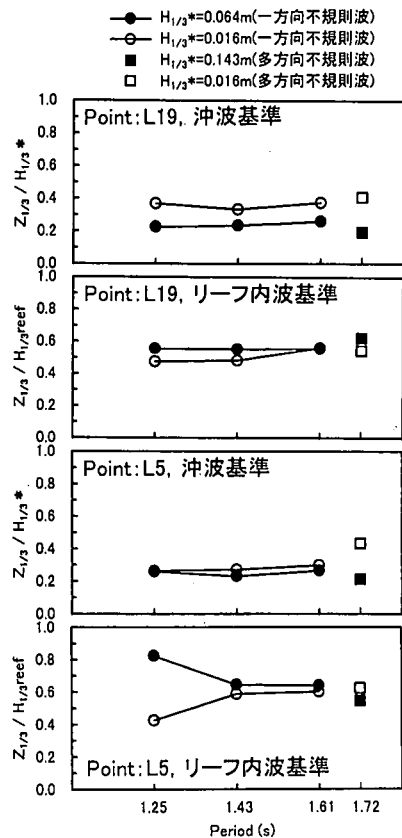


図-6 L19, L5における浮体鉛直変位の比の周期分布 (SIR 1, SIR 2, MIR 1, MIR 2)

下段の図より、リーフ内波高に対する鉛直変位の比は、入射波高に依らず $0.40\sim0.75$ となっている。また、入射波高の大きいケースの場合は、波上側と波下側の鉛直変位の相違は比較的小さいが、実験波高の小さなケースでは、場所ごとの変動がやや大きい。

次に、図-6は、沖波とリーフ内波に対するL19(浮体端部付近)とL5(浮体中央部)における鉛直変位の比の周期分布を表している。図中の上2つの図面がL19(浮体端部付近)の場合であり、上から1番目が沖波、2番目がリーフ内波に対する鉛直変位の比の周期分布である。また、図中の下2つの図面は、L5(浮体中央部)における鉛直変位の比の周期分布を表している。ここで、周期 $1.25\sim1.61\text{ s}$ の範囲は、一方向不規則波の実験結果 ($H_{1/3}^*=0.064\text{ m}$, 0.016 m) を示しており、周期 1.72 s は、多方向不規則波の実験結果 ($H_{1/3}^*=0.143\text{ m}$, 0.016 m) を示している。

図より、L19(浮体端部付近)の場合、沖波を用いて無次元化した鉛直変位の比は、 $H_{1/3}^*=0.064\text{ m}$ の場合は約 0.25 、 $H_{1/3}^*=0.016\text{ m}$ の場合は約 0.35 となり、入射波高の小さい方が鉛直変位の比は 1.4 倍程度大きくなる。こ

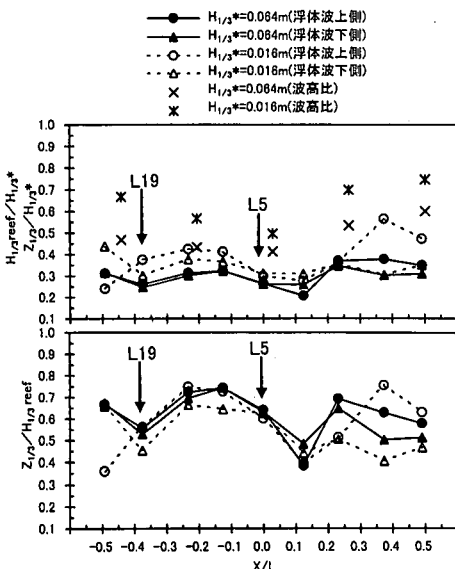


図-5 浮体長手方向の鉛直変位分布 (No. 3: $H_{1/3}^*=0.064\text{ m}$, No. 6: $H_{1/3}^*=0.016\text{ m}$)

れは主としてリーフエッジでの碎波による波高減衰効果の違いによるものである。周期1.25~1.61sの範囲(一方向不規則波)では、周期による変化は小さい。これに対して、リーフ内波を用いて無次元化した鉛直変位の比は、 $H_{1/3}^*=0.064$ mの場合は約0.55、 $H_{1/3}^*=0.016$ mの場合は0.50~0.55となり、両者の鉛直変位の比はほぼ同じである。以上より、浮体端部付近(L19)においては、鉛直変位は、リーフ内波高に対してほぼ線形的であると考えられる。

また、L5(浮体中央部)の場合、沖波を用いて無次元化した鉛直変位の比は、 $H_{1/3}^*=0.064$ m及び $H_{1/3}^*=0.016$ mの場合のいずれについても0.25~0.30であって浮体端部付近のL19ほどには差が表れていない。また、リーフ内波を用いて無次元化した鉛直変位の比は、 $H_{1/3}^*=0.064$ mの場合は0.65~0.85、 $H_{1/3}^*=0.016$ mの場合は0.4~0.6であり、周期1.43, 1.61sの場合は両者の鉛直変位の比はほぼ同じであるが、周期1.25sの場合は、差異が見られる。以上より、浮体中央部(L5)においても、鉛直変位は、一部の周期を除きリーフ内波高に対しておおむね線形的であると考えられる。

5. リーフにおける浮体の曲げモーメント応答特性

(1) 浮体の曲げモーメントのスペクトル解析

図-7に、図-4に示した実験ケースについて、ひずみの計測データから算定した曲げモーメントに関するスペ

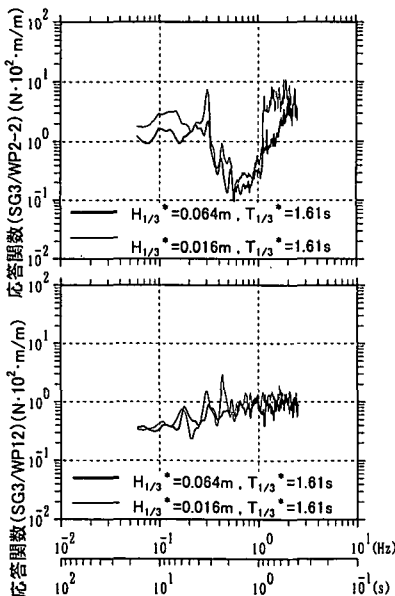


図-7 WP 2-2, WP 12 に対する SG 3 の応答関数の比較
(No. 3: $H_{1/3}^*=0.064$ m, No. 6: $H_{1/3}^*=0.016$ m)

クトルの応答関数を示す。図の上段と下段はそれぞれ、WP 2-2 と WP 12 に対する SG 3 のスペクトルの応答関数を表している。上段の図より、浮体端部付近の曲げモーメントに関する応答特性としては、図-4(中段の図)の沖波に対する鉛直変位のスペクトルの応答関数で示したように入射波の卓越成分である周期0.9~2.0sの応答が小さく、周期2.0s以上の長周期波成分と、0.9s以下の短周期成分の応答が大きくなっている。また、入射波高の $H_{1/3}^*=0.064, 0.016$ mの2種類(図中の太線、細線)を比較すると、入射波高が高い方が応答関数の倍率が低い結果となり、入射波高に対して非線形な応答特性を示している。次に下段の図より、リーフ内波高に対する浮体端部付近の曲げモーメントの応答特性は、一部の周期を除いて入射波高に依らずほぼ同じで、線形的な応答特性を示している。なお、鉛直変位の場合と異なり、短周期成分の応答関数はほとんど小さくならない。

(2) 浮体の曲げモーメント応答特性

図-8は、図-4に示した実験ケースについて、浮体長手方向の曲げモーメント分布を表している。上段の図は、各計測点の曲げモーメント $M_{1/3}$ を沖波の有義波振幅($a_{1/3}^*=H_{1/3}^*/2.0$)を用いて無次元化している。下段の図は、各計測点の曲げモーメント $M_{1/3}$ をリーフ内の有義波振幅($a_{1/3\text{reef}}=H_{1/3\text{reef}}/2.0$)を用いて無次元化している。ここで、 $M_{1/3}$ は、ひずみの計測データを統計処理して求めた有義値(片振幅)から曲げモーメントの有義値(片振幅)を算定したものである。

上段の図より、沖波に対する曲げモーメント比は、 $H_{1/3}^*=0.064$ mの場合は $2.0\sim3.5\times10^{-7}$ 、 $H_{1/3}^*=0.016$ mの場合は $3.0\sim7.0\times10^{-7}$ となり、鉛直変位の応答特性と同様に、波高の小さい方が沖波に対する曲げモーメン

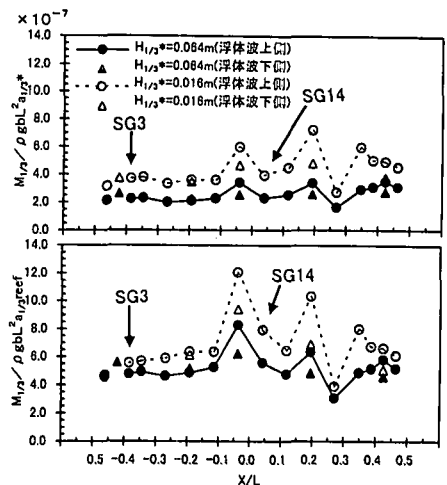


図-8 浮体長手方向の曲げモーメント分布
(No. 3: $H_{1/3}^*=0.064$ m, No. 6: $H_{1/3}^*=0.016$ m)

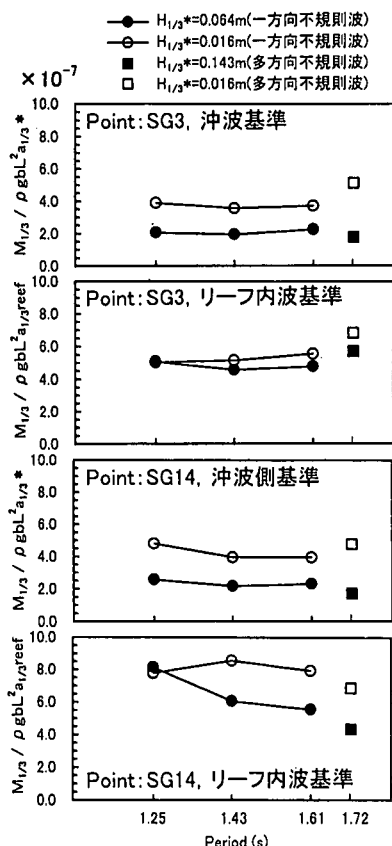


図-9 SG 3, SG 14 における浮体曲げモーメント比の周期分布 (SIR 1, SIR 2, MIR 1, MIR 2)

ト比は大きい傾向にある。

下段の図より、リーフ内波に対する曲げモーメント比は、 $H_{1/3}^* = 0.064 \text{ m}$ の場合は $3.0 \sim 8.5 \times 10^{-7}$ 、 $H_{1/3}^* = 0.016 \text{ m}$ の場合は $4.0 \sim 12.0 \times 10^{-7}$ となる。ここで、沖波に対する曲げモーメント比とリーフ内波に対する曲げモーメント比を比較すると、リーフ内波に対する曲げモーメント比の方が入射波高の違いによる比率の差が小さくなる傾向にある。

次に、図-9 は、沖波とリーフ内波に対する SG 3 (浮体端部付近) と SG 14 (浮体中央部) における曲げモーメント比の周期分布を表している。なお、図の構成は、図-6 と同じである。

図より、SG 3 (浮体端部付近) の場合、沖波を用いて無次元化した曲げモーメント比は、 $H_{1/3}^* = 0.064 \text{ m}$ の場合は約 2.0×10^{-7} 、 $H_{1/3}^* = 0.016 \text{ m}$ の場合は約 4.0×10^{-7} となり、入射波高の小さい方が曲げモーメント比が 2.0 倍程度大きくなる。周期 $1.25 \sim 1.61 \text{ s}$ の範囲 (一方向不規則波) では、周期による変化は小さい。これに対して、リーフ内波を用いて無次元化した曲げモーメント比は、

入射波高の相違にかかわらず約 5.0×10^{-7} である。以上より、浮体端部付近 (SG 3) においては、曲げモーメントは、リーフ内波高に対して線形的であると考えられる。

また、SG 14 (浮体中央部) の場合、沖波を用いて無次元化した曲げモーメント比は、 $H_{1/3}^* = 0.064 \text{ m}$ の場合は約 2.5×10^{-7} 、 $H_{1/3}^* = 0.016 \text{ m}$ の場合は $4.0 \sim 5.0 \times 10^{-7}$ となり、SG 3 の場合と同様に入射波高の小さい方が曲げモーメント比が 2.0 倍程度大きくなる。周期 $1.25 \sim 1.61 \text{ s}$ の範囲 (一方向不規則波) では、周期の長い方が若干ではあるが応答が小さい傾向にある。これに対して、リーフ内波を用いて無次元化した曲げモーメント比は、 $H_{1/3}^* = 0.064 \text{ m}$ の場合は $5.5 \sim 8.0 \times 10^{-7}$ 、 $H_{1/3}^* = 0.016 \text{ m}$ の場合は $8.0 \sim 8.5 \times 10^{-7}$ となり、沖波波高による無次元化に比べると差異が小さくなるが、浮体端部ほどには一致しない。その理由としては浮体周辺の波の分布の不均一性の影響が考えられる。

6. おわりに

本研究では、孤立リーフ地形の中に係留された浮体の弾性応答特性を明らかにするために水理模型実験を実施した。以下に主要な結論をまとめる。

- ①リーフ内の波は砕波することにより、沖波に対して約 4 割 ($H_{1/3}^* = 0.064 \text{ m}$ の場合) に波高が減少する。また、入射波高が大きいほど、波高減衰効果も大きくなる。
 - ②リーフ内の波高は砕波することにより、非線形な応答特性となり、沖波の卓越成分のエネルギーは減衰するが、長周期波成分及び短周期波成分のエネルギーは増大する。
 - ③リーフ内波高を用いて無次元化した浮体端部の鉛直変位と曲げモーメントの応答は、沖波の波高が異なる場合においてもほぼ線形的であると考えられる。
- 今後は、本研究で得られた結果をもとにリーフ内に設置された大型浮体の実用的な応答予測手法の検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、運輸施設整備事業団の「運輸分野における基礎的研究推進制度」の支援により実施されたものである。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 加藤雅也・平山克也・丸山晴広・平石哲也 (1999): デュアル・フェース・サーベント型造波装置による二方向波浪の造波特性, 港湾技研資料, No. 927, 24 p.
- Inoue, K. (1999): Mega-Float; Achievements to Date and Ongoing Plan of Research, Proc. of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 1, pp. 1-9.