

メガフロートの水平面内挙動予測と係留ドルフィンの疲労被害予測

海洋開発研究領域 海洋空間利用研究グループ * 難波康広、加藤俊司

1. まえがき

平成 13 年度から平成 14 年度にかけて、国土交通省及び総務省並びに経済産業省の連携のもと、「メガフロート情報基地機能実証実験」が行われた。「メガフロート情報基地」とは、急速に進展する情報化社会を支える重要なインフラである情報バックアップセンターを、地震等の災害に強いメガフロート上に整備しようという構想である。

同実証実験ではメガフロート上の情報バックアップセンターを寸断なく稼働させることを保証するために、弾性応答のようなメガフロート固有の環境条件等が情報バックアップセンターに与える影響を最小化するために必要な研究開発を行った。

国土交通省海事局は、このうち波エネルギー吸収装置による動揺低減技術の開発、長期健全性予測診断システムの開発を海上技術安全研究所に委託し、水槽実験及び実証実験を通じ、研究開発を行った。

本論文では、この「長期健全性予測診断システム」の一部として開発した、メガフロートの水平面内運動の挙動予測プログラム及び係留ドルフィンの疲労被害予測プログラムについて報告する。

表 - 1 に実証浮体の主要寸法、図 - 1 に実海域実証実験で使用された実証浮体の概要を示す。なお、実海域実験の実験海域は、住友重機械工業(株)横須賀製作所の北岸壁沖であった。

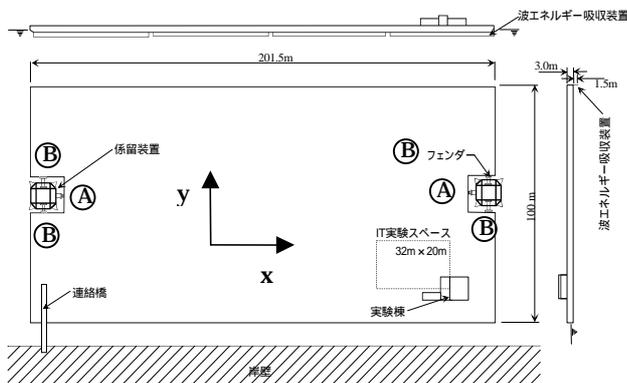


図 - 1 実証浮体概要

表 - 1 実証浮体主要寸法

		単位	備考	
浮体寸法	長さ(公称) L	200	m 沖側201.5m 岸壁側203.0m	
	幅 B	100	m	
	高さ D	3	m	
	喫水(浮柱基部) d	1	m	バラスト無: 0.5m
	喫水(カーテンウォール部) d'	2.5	m	
	横曲剛性 EI_B	2.037×10^{10}	Nm	
	縦曲剛性 EI_L	1.656×10^{10}	Nm	
上層IT実験棟寸法	長さ	20	m	
	幅	10	m	
	高さ	3.5	m	
	単位面積あたりの重量	500	kg/m ²	

2. 水平面内挙動予測プログラム

水平面内挙動予測プログラムは、計測された浮体周囲の水位データ及びあらかじめ用意した流体力係数並びに係留装置の反力特性を用い、運動方程式を介して、メガフロートの水平面内挙動を予測し、その運動状態を把握することを目的とする。

2.1. 流体力係数、係留装置反力特性、波浪外力

以下対象となるメガフロート(ここでは図 - 1 の実証浮体)の、流体力係数、係留装置反力特性、及び波浪外力の算定法について説明する。

まず流体力係数の内、付加質量 $m_{ji}(\omega)$ 及び造波減衰力係数 $N_{ji}(\omega)$ については、それぞれ、剛体モデルに基づく数値計算から求め、動揺周波数 ω ごとにデータベース化しておいたものを使用した。

また粘性減衰力は、一般に速度の自乗に比例するが、メガフロートのような広大な没水底面を持つ浮体の場合には、速度 \dot{x}_j に比例する¹⁾(ここで $j=1,2,6$ は、それぞれ前後揺、左右揺、回頭揺の各モードを表す)。浮体の水平面内動揺の特性周波数(等価固有周波数)を ω_{0j} とすると、無次元粘性減衰力係数 α_j は次式で表され、自由動揺試験(浮体を水平運動方向に強制変位させ、その後リリースすることで減衰振動波形を実験的に求める試験)から求められる。

$$N_{vj} = 2\alpha_j \omega_{0j} (M + m_{jj}(\omega_{0j})) \quad j=1,2,6 \quad (2)$$

但し M , $m_{jj}(\omega_{0j})$ はそれぞれ、浮体の質量及び水平面内動揺の付加質量である。

波浪外力は、波長に比べて喫水が非常に小さいメガフロート浮体の場合、浮体周囲における水位の瞬時瞬時の時系列を用いて評価できる²⁾(線型及び長周期変動波力)。

また今回「メガフロート情報基地機能実証実験」で使用した係留フェンダーは、 x 方向が定反力型と反力暫増型のハイブリッドフェンダー(記号Aで表す)、 y 方向が定反力型の2段フェンダー(記号Bで表す)からなる。それぞれの合成フェンダーの位置を図-1に、フェンダー反力特性を図-2に示す。図-2の横軸は、フェンダー高さに対する変位量の比(歪量)として表している。

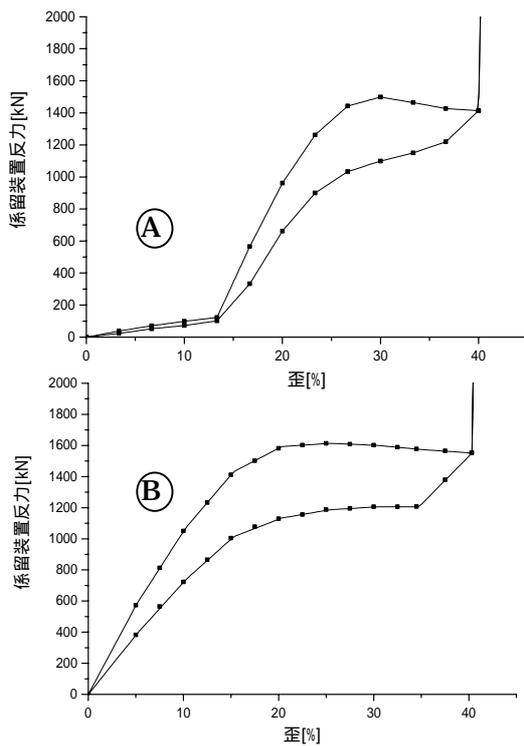


図-2 フェンダー反力特性

図-2の上図及び下図の特性をそれぞれ f_A, f_B で表せば、係留反力特性は次式から求められる

$$F_{M1} = f_A(x_1), \quad F_{M2} = 2f_B(x_2), \quad F_{M6} = 2l_0 f_B(l_0 x_6) \quad (3)$$

但し l_0 は浮体の回転中心から B フェンダーと浮体の接点までの距離を表す。

2.2. メガフロートの水平面内動揺の時間領域運動方程式

面内剛性は十分大きいものとし、メガフロート浮体の水平面内の動揺は3自由度剛体運動であると仮定する。この場合、水平面内の運動方程式は、上述の流体力係数、係留装置反力特性、波浪外力を用い、次式で表される。

$$\begin{aligned} & [M + m_{ii}(\infty)] \ddot{x}_i(t) + F_{Vi}(\dot{x}_i) + \int_{-\infty}^t \alpha_i(\tau) L_{ii}(t-\tau) d\tau + F_{Mi}(x_i) \\ & = F_{Hi}^{(1)}(t) + F_{Hi}^{(2)}(t) \quad (i=1,2,6) \quad (4) \end{aligned}$$

但し $m_{ii}(\infty)$ は周波数無限大での付加質量及び付加慣性モーメント、 F_{Vi} は粘性減衰力及びモーメント、 L_{ii} はメモリー影響関数、 F_{Mi} は係留反力、 $F_{Hi}^{(1)}$ は線型波力及びモーメント、 $F_{Hi}^{(2)}$ は長周期変動波力及びモーメントである。

なお、メモリー影響関数は、造波減衰力係数 $N_{ii}(\omega)$ を用いて次式から求められる。

$$L_{ii}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} N_{ii}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (5)$$

(4)式を時間領域で解くことにより時々刻々の応答値(水平面内動揺及び係留力)が求められる。

3. 係留ドルフィン疲労被害予測プログラム

係留ドルフィンは、非線形の影響(フェンダーの非線形反力特性、水平面内動揺の長周期運動)を大きく受ける。このため、短期不規則波中での応力の極値分布が、線形理論から導かれる Rayleigh 分布であると仮定する従来の疲労被害予測手法と異なり、本プログラムではシミュレーションベースの疲労被害予測手法を用いた。

具体的な手順としては、まず環境外力下におけるメガフロートの非線形係留時系列シミュレーションを実施し、これにより係留ドルフィンにかかる荷重頻度データを用意する。次に、SN線図(外力と繰り返し回数との関係)から短期疲労被害の計算を行い、最後に短期疲労被害度計算の結果と海域の長期波浪

頻度表から長期の疲労被害度を予測する。

3.1. 係留ドルフィンのS-N特性の調査

今回の係留ドルフィンの全体概要図を図-3 に示す。

本ドルフィンには、8本の主要杭からなる鋼製ジャケット構造であり、1面にハイブリッドフェンダー、2面に二重フェンダーが取り付けられている。本ドルフィンのS-N特性を調査するために図-4 に示す有限要素モデルを作成し、本モデルを用いて疲労損傷の厳しい格点部を抽出した。

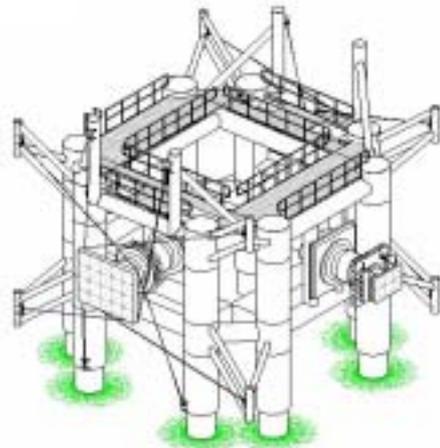


図-3 係留ドルフィン概要図

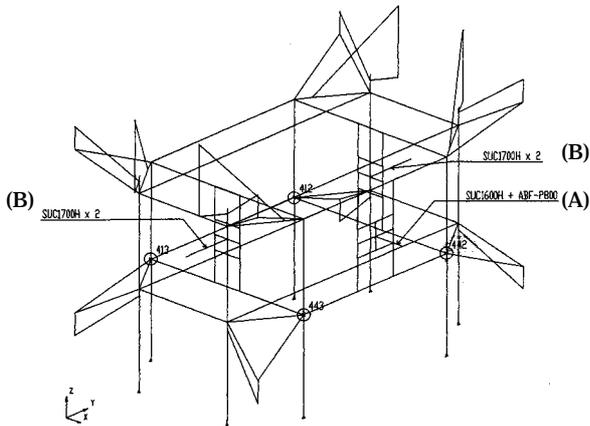


図-4 係留ドルフィンの有限要素モデル

なお、図-4の構造解析モデルでは、地盤条件も考慮している。また、図中の記号(A)、(B)はそれぞれ、図-3におけるハイブリッドフェンダー及び二重フェンダーに対応する。x及びy方向に外力を加えたときの最大応力が発生する点は、図-4中の格子点(412、413、442、443の4点)の箇所であり、その点

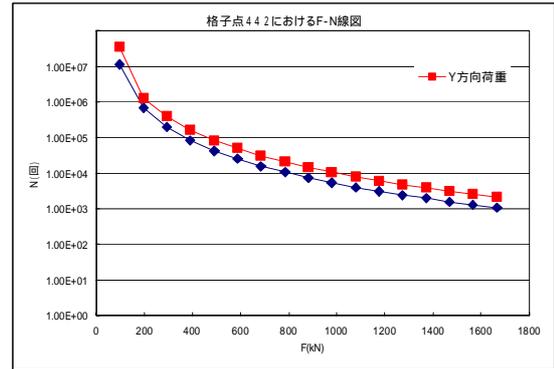


図-5:S-N線図(格子点442)

における、S-N特性を次のようにして求めた。

- i) 各フェンダーに98kN刻みで繰り返し荷重を載荷し、各節点に作用する応力変動幅をFEM解析により求めた。なお、応力集中係数はジャケット工法技術マニュアル³⁾の標準値を用いた。
- ii) 応力変動幅に対する許容繰り返し回数をジャケット工法技術マニュアル³⁾のp.39を用いて求めた。

その結果の一例を図-5に示す。

3.2. 非線形時系列シミュレーション

係留時系列シミュレーションにおいては、環境外力として、波力、風力、潮流力を考慮した。環境条件として、潮流条件は流向0°、流速0.5ノットとし、波条件は、長期波浪頻度表(表-2)に従い0.25m~3.25m、波周期は3.0秒から11.0秒までとする。波向きは最も頻度が高い63.8°(NE)とする。波スペクトルは、港湾域で広く使用されているブレット・シナイダ・光易型スペクトル、方向分布関数として光易型を使用した。方向集中度パラメータは、東京湾で一般的な10を使用した。風条件については、上記の波条件が

表-2 波浪頻度表(出典:4)

	波高(m)	周期(秒)									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	3.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	3.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1.75	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
	1.50	0	0	13	5	0	0	0	0	0	
	1.25	0	17	19	7	2	0	0	0	0	
	1.00	1	163	94	12	1	0	0	0	0	
	0.75	39	1470	176	31	11	6	1	0	0	
	0.50	1234	9540	994	142	32	12	5	3	0	
	0.25	195	1849	233	38	5	4	0	0	0	

ら予測した。風向は、波向と同一とした。シミュレーションは1つの波条件に対し、時間 t_s が3時間分の計算を行った。

3.3. 係留反力時系列データの統計処理

得られた係留反力時系列データの統計処理は、次の要領で行った。

- i) β 方向 ($\beta = x, y$) 各々について、反力レベル F_{β} 毎の極値頻度数 n_{β} を求める。
- ii) 左右揺れ方向については、プラスマイナス両方向の反力を考慮する。
- iii) 反力の絶対値について、極値頻度数のカウントを行った。

3.4. 短期疲労被害度の計算

マイナー則を用いて、次式のように疲労被害度の計算をし、波高、周期ごとにデータベース化した。ここに、 N_{β} は、 F_{β} に対する許容繰返し数である。

$$D_{\beta}(H, T) = \sum_i \frac{n_{\beta i}(H, T)}{N_{\beta i}}, \quad (\beta = x, y) \quad (6)$$

許容繰返し数 N_{β} のデータについては、図-5 他の S-N 線図を用いた。

3.5. 長期疲労被害度の算定

海域の長期波浪頻度表と、上記データベースを用いて、次式により、長期の疲労被害度を算定した。

$$\overline{D_{\beta\alpha}}(H_j, T_k) = \sum_{j,k} D_{\beta}(H_j, T_k) \frac{f_{\alpha}(H_j, T_k)}{t_s} \quad (7)$$

ここで、 $f_{\alpha}(H_j, T_k)$ は、 α 年間に、有義波高、平均波周期がそれぞれ H_j 、 T_k である海象が発生するのべ時間数であり、設定海域の長期波浪頻度表(表-2)から求めた。

4. 水槽試験

開発したプログラムの評価及び改良等のため、水

槽模型試験を行った。試験は、当研究所・海洋構造物試験水槽(長さ40m×幅27m)において行った。

4.1. 供試模型

模型縮尺は1/50とした。浮体模型の主要目を表-3に示す。模型の主構造には厚さ5mmのアルミ平板を用いた。アルミ平板下面に浮力材として発泡ウレタンを接着して喫水を実機に合わせた。また浮体模型側面には、深さ1.5m、スリット幅0.25m(実機相当)の波エネルギー吸収装置を取り付けた。

表-3 実験浮体主要目

		模型(縮尺 1/50)	
長さ(公称)	L	4,000	mm
幅	B	2,000	mm
深さ	D	70	mm
喫水(浮体主要部)	d	20	mm
喫水(波エネルギー吸収装置含)	d'	50	mm
曲げ剛性	EI/B	715	Nm
	EI/L	"	"

また本試験では、アルミ板と鋼材を用いて設置海域の海底地形を再現した。

実証実験用浮体の係留には図-3のようなドルフィン-フェンダー方式が採用されており、フェンダーの反力特性は図-2の通りである。本実験では、これらのフェンダー特性を模擬した係留装置模型を製作した。

4.2. データ計測

表-4に計測項目及び計測装置を示す。図-6に計測位置を示す。

表-4 計測項目

計測項目	計測装置
浮体模型の水平方向変位	ポジションセンサー
浮体模型の鉛直方向変位	ポテンシオメータ
浮体模型の加速度	三軸加速度計
入射波高	サーボ式波高計
係留反力	ロードセル型検力計
浮体模型周辺の相対水位	容量式波高計
浮体模型の歪み	歪みゲージ
フェンダー変位	ポテンシオメータ

試験は、開水域(水深が実機相当で20m)の場合、岸壁が平板の場合、岸壁が実機と同じく円筒ケーソンの場合、の3通りの状態で行った。また波エネルギー吸収装置については、各状態について波エ

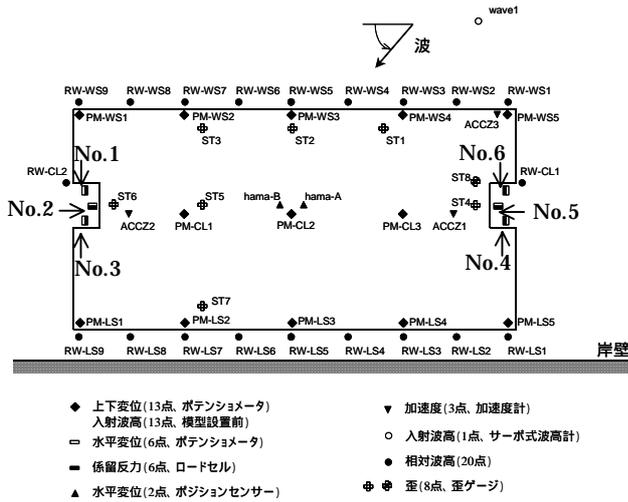


図-6 計測位置

エネルギー吸収装置がある場合とない場合で計測を行った。波エネルギー吸収装置として、スリット（実機相当で0.25m幅）付きカーテンウォールとスリットのないものを準備した。

表-5に計測条件を示す。表中の不規則波は、左から順に設置海域における2、10、50年確率波である。また、波向は設置海域における主方向である63.8°とした（波向き χ の定義については図-6を参照）。

また、自由動揺試験も行った。

表-5 計測条件

岸壁の状態	減揺板	スリット	波の種類	波周期	波高	波向き
なし(開水域)	無し		規則波	3.2~6.4秒	0.5~2m	0, 63.8, 75, 90°
	有り	無し				
	有り	有り				
平板	無し		規則波	3.2~6.4秒	0.5~2m	63.8°
	有り	有り				
	無し		不規則波	4.5, 5.5, 6.2秒	1.8, 2.6, 3.4m	63.8°
	有り	無し				
	有り	有り				
円筒ケーソン	無し		不規則波	4.5, 5.5, 6.2秒	1.8, 2.6, 3.4m	63.8°
	有り	無し				
	有り	有り				

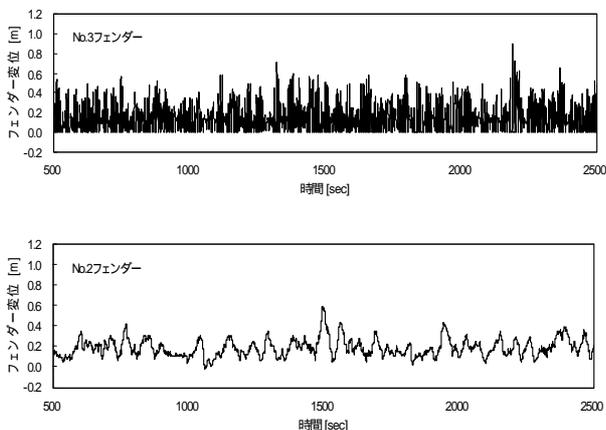


図-7 フェンダー変位時系列(有義波高2.6m,波周期5.5秒)

4.3. 試験結果

図-7に不規則波中(10年確率波)におけるフェンダー変位の時系列の一例を示す。時系列グラフの横軸は時刻を示している。表-6に不規則波中(10年確率波)における各フェンダーの最大変位を示す。

表-6 最大フェンダー変位

(有義波高2.6m,波周期5.5秒)

No.	1	2	3	4	5	6
最大変位 [m]	0.80	0.59	0.90	0.57	0.13	0.52
歪み [%]	23.5	24.6	26.5	16.8	5.42	15.3

4.4. 係留ドルフィン疲労被害予測プログラムの検証

10年確率波の水槽実験に対応した非線形係留時系列シミュレーションを行い、得られた係留反力時系列の統計処理を行って、係留反力の標準偏差、最大値を推定した。推定結果の一例を表-7に示す。なお、係留装置反力の番号は図-6を参照されたい。また、値はすべて実機換算値であり、比較ケースは岸壁が円筒ケーソンでスリット付き波エネルギー吸収装置ありの場合である。本ケースにおいて、推定結果は、No.5の係留反力の計測結果と若干の差があるが、係留反力が最も大きいNo.1係留反力に関しては、推定結果と計測結果は良い一致を示しており、本推定法が有効であることがわかる。なお水平面内動揺の粘性減衰力係数に関しては、自由動揺試験の結果を用いている。

表-7 係留反力の統計値の推定結果と計測結果の比較

	No.1 係留反力 [KN]	No.2 係留反力 [KN]	No.3 係留反力 [KN]	No.4 係留反力 [KN]	No.5 係留反力 [KN]	No.6 係留反力 [KN]
推定結果	標準偏差 750.64	175.85	151.75	127.88	75.38	34.68
結果	最大値 2599.88	799.50	694.90	803.30	520.90	279.20
計測結果	標準偏差 734.89	154.40	187.18	90.91	115.45	32.60
結果	最大値 2545.02	960.45	1284.80	597.62	737.42	171.02

5. 実海域実証実験

本実験では、当該研究で開発したプログラムの有効性を実証するために、図-1の実証実験用浮体上で、波高計、風速計、KGPS、加速度計、水圧計、歪みゲージなどを用い、自然環境、浮体挙動等を計測した。

図-8 に浮体上に設置した計測機器の設置位置を示す。

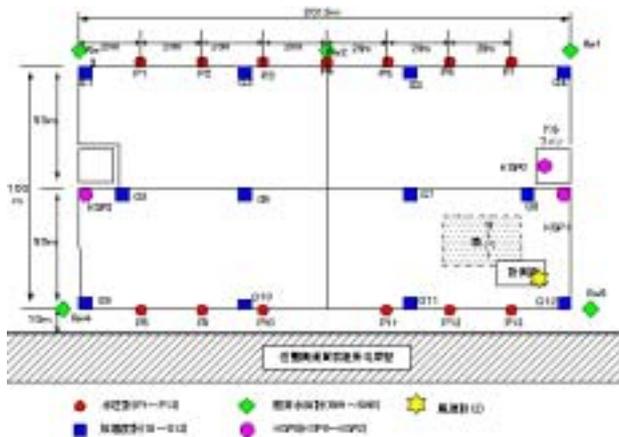


図-8 計測器設置図（浮体上）

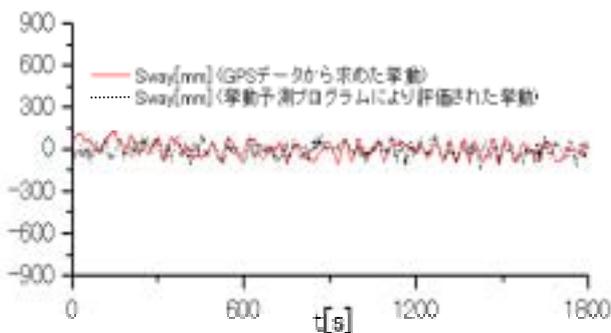


図-9 水平面内挙動予測プログラムによる挙動予測結果とGPSによる測定値から求めた挙動との比較

5.1 データ解析

計測したデータを用いて、挙動予測シミュレーションプログラム及び疲労被害予測プログラムの最終的な検証・評価を行った。

5.2 挙動予測シミュレーションプログラム結果

挙動予測シミュレーションプログラムから得られた浮体の水平面内運動と、実際に計測して得られた浮体の水平面内運動とを比較検討し、挙動予測シミュレーションプログラムの有効性を確認した。

図-9に、水平面内挙動予測プログラムから得られた水平面内挙動予測結果と、実海域実証実験においてGPSによって実際に測定した水平面内挙動との比較を示す。二つの曲線はよく一致しており、当プ

ログラムの有効性が確認できた。

6. おわりに

本論文では、「メガフロート情報基地機能実証実験」で開発した「長期健全性予測診断システム」の一部である、メガフロートの水平面内運動の挙動予測プログラムと、係留ドルフィンの疲労被害予測プログラムについて説明した。

まとめると次の通りである。

1. メガフロートの水平面内挙動を予測し、その運動状態を把握することを目的とし、メガフロートの水平面内挙動予測プログラムを開発した。
2. 同プログラムは、あらかじめ用意した流体力係数及び所与の係留装置反力特性を用い、計測された浮体周囲における水位から簡便にメガフロートの水平面内挙動を予測・モニタリングする。
3. また係留ドルフィンの自然環境外力による疲労被害予測を行うことを目的として、係留ドルフィン疲労被害予測プログラムを開発した。
4. メガフロート構造部材の疲労被害予測と異なり、係留ドルフィンは非線形の影響（フェンダーの非線形反力特性、水平面内動揺の長周期運動）が大きいいため、係留ドルフィン疲労被害予測プログラムでは、シミュレーションベースの疲労被害予測法を適用した。
5. これらのプログラムを、水槽模型試験、実海域実証実験を通じて検証し、その有効性を確認した。

参考文献

- 1) 星野邦弘他：VLFSの水平方向粘性減衰力、第70回船舶技術研究所研究発表会講演集、1997
- 2) 難波康広、加藤俊司、齊藤昌勝、平石哲也：超大型浮体式構造物に働く変動漂流力の推定法 --- その2：短波頂波中模型実験 ---、日本造船学会論文集、第187号、pp.151-160、2000
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：ジャケット工法技術マニュアル、2000
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測25ヵ年統計資料NOWPHAS 1970-1994、1996

平成15年度(第3回) 独立行政法人 海上技術安全研究所
研究発表会講演集 訂正

講演 No.20、97 頁、表-6

誤：

No.	1	2	3	4	5	6
最大変位[m]	0.80	0.59	0.90	0.57	0.13	0.52
歪み [%]	2	3.5	24.6	26.5	16.8	5.42

正：

No.	1	2	3	4	5	6
最大変位[m]	0.80	0.59	0.90	0.57	0.13	0.52
歪み [%]	23.5	24.6	26.5	16.8	5.42	15.3

講演 No.24、112 頁、右段

誤：式(7)

正：式(3)

誤：式(5)

正：式(1)

図3中、

誤：Equation (7)

正：Equation (3)

講演 No.37、182 頁、左段、上から3行目

誤：2.2

正：0.43