

浮遊式海洋構造物の実海域実験

荒天時における海象、動揺、構造応答の連続観測資料

吉元博文*、大松重雄*

At-Sea Experiment of a Floating Offshore Structure

Continuous Data of Environmental Conditions, Motions and Structural Responses of Test Structure in Stormy Sea States

by

Hirofumi YOSHIMOTO, Shigeo OHMATSU

Abstract

On the POSEIDON Project, two kinds of recording methods are adopted. One is recording commanded automatically by a personal computer at regular time interval of 6 hours. The other is recording made by start/stop command sended from shore to POSEIDON using telemeter. This recording is made temporarily when long continuous data in stormy sea states are obtainable.

This paper presents the analyzed results of the long continuous data obtained in heavy sea conditions.

目次

1. はじめに
2. データの選定並びに解析項目
 - 2.1 データの選定
 - 2.2 解析項目
 - (1) 天気図、気温、気圧
 - (2) 風 (平均風速、平均風向)
 - (3) 波 (波向、波高、周期)
 - (4) 流れ (平均流向、平均流速)
 - (5) 加速度 (Surge、Sway、Heave)
 - (6) 動揺 (Surge、Sway、Heave、Roll、Pitch、Yaw)
 - (7) 長周期運動 Surge、Sway
 - (8) 相対水位 (船首、船尾)
 - (9) 構造歪
 - (10) 係留力
3. データ解析
 - 3.1 解析方法
 - (1) 波
 - (2) 加速度 Surge、Sway、Heave
 - (3) 動揺 Surge、Sway、Heave
 - (4) 長周期運動 Surge、Sway

3.2 解析結果

3.3 考察

4. おわりに

参考文献

1 はじめに

本実海域実験では、データ収録の方式として2種類の方式を用いた。一つは、定時計測と呼ばれる方式であり、6時間毎に指定するデータを、サンプリング間隔0.5秒、1チャンネルにつき4096個のデータをパソコンで自動収録することができる。

もう一つが、定時計測ではなかなかとらえることのできない海象の最盛期でのPOSEIDON号の動揺、構造応答、係留力等をとらえるために設けられた臨時計測と呼ばれる方式であり、これは、パソコンによるデータ収録のスタート・ストップを観測員の判断で任意に行えるシステムである。臨時計測のサンプリング間隔は、定時計測のサンプリング間隔0.5秒に対し、長時間の連続計測を可能にするために1秒となっている。

実際に、4年間にわたる実海域実験で、台風の来襲時や冬期季節風による風波の発達時に、

* 海洋開発工学部

総計43回の臨時計測（以下、連続計測データと称す）が実施された。ここでは、43の連続計測データの中から、今後、海洋構造物の設計で貴重な資料となるとと思われる6つの連続計測データを選定し、その解析結果について述べる。

2 データの選定並びに解析項目

2.1 データの選定

表-1は、本実海域実験で収録された連続計測データの一覧を示したものである。解析の対

表-1 連続計測データ一覧表

年月日	ファイル名	開始時刻	計測時間	データ数	CH. 数	選定
86/11/11	L61111	09:19	22:40:08	81608	30	
11/16	L61116	08:59	02:00:04	7204	31	
11/26	L61126	14:58	01:20:37	4837	30	
12/19	L61219	13:00	02:06:30	15180	1	
12/19	L61219	18:39	18:59:10	68350	31	
12/26	L61226	12:09	20:25:42	73542	31	
87/01/04	L70104	10:18	22:40:33	81633	31	
01/13	L70113	09:58	24:00:53	86453	31	
01/17	L70117	20:28	14:50:52	53452	31	
02/14	L70217	15:38	24:00:43	86443	31	
02/04	L70204	09:18	24:01:05	172930	1	
02/25	L70225	09:38	27:43:58	99838	31	
02/26	L70226	14:39	20:19:44	73184	31	
03/25	L70325	13:58	21:20:31	76831	31	
08/11	L70811	16:58	39:20:42	141642	31	
08/31	L70831	18:18	21:40:09	78009	39	○
10/17	L71017	17:32	18:39:49	67189	39	
10/20	L71020	09:32	27:19:12	98352	39	
11/24	L71124	08:12	23:45:47	85547	45	
12/17	L71217	10:13	22:25:54	80754	45	○
88/01/09	L80109	18:18	37:41:05	135665	45	
02/02	L80202	16:13	24:45:12	89112	45	○
03/03	L80303	18:33	13:45:21	49521	45	
07/26	L80726	08:54	24:24:01	87841	48	
08/08	L80808	06:14	50:24:19	181459	48	
09/12	L80912	08:34	24:04:11	86651	48	
11/10	L81110	11:15	44:44:11	161051	48	
12/13	L81213	18:53	13:04:42	47082	48	
12/14	L81214	10:33	30:04:41	108281	48	○
89/01/01	L90101	09:13	23:44:10	85450	48	
02/04	L90204	10:54	24:04:30	86670	48	
03/24	L90324	14:30	41:47:50	150470	48	
03/31	L90321	16:14	15:44:32	56672	48	
04/27	L90427	18:33	37:24:44	134684	48	
08/27	L90827	14:54	26:04:36	93876	48	
09/08	L90908	09:35	02:34:08	9248	48	
11/19	L91119	09:12	47:04:08	169448	48	○
12/09	L91209	13:15	26:24:09	95049	48	
12/19	L91219	15:54	18:44:51	67491	48	
90/01/03	L00103	13:54	20:24:22	73462	48	
01/25	L00125	16:34	23:44:18	85458	48	○
01/30	L00130	09:54	23:04:09	83049	48	
04/04	L00404	17:13	23:44:48	85488	48	

表-2 各連続計測データの選定理由

ファイル名	選定理由
・ L70831	台風12号が実験海域に來襲した際の連続計測データである特筆すべき点として、当時、POSEIDONは緊張係留システムをとっていたが、この台風により緊張係留索がPOSEIDONより脱落した。
・ L71217	実験期間で最大の有義波高7.3mが観測された。また、波向きが観測できるようになった。
・ L80202	実験期間で最大の波高（個別波）14.9mが観測された
・ L81214	凧の状態から風波の最盛期までを収録することができた。
・ L91119	わずかな区間ではあるが、POSEIDONの長周期運動が計測できた。高波時の係留力、船首・船尾の相対水位が収録できた。
・ L00125	高波時のPOSEIDONの係留力、船首・船尾の相対水位が収録できた。

象として、表-1に○で示す6つの連続計測データを採用した。なお、表中のファイル名は、例えば、L61111は、1986年11月11日に収録された連続計測データを意味している。表-2に各連続計測データの選定理由を示す。1987年に來襲した台風によるL70831以外は、全て冬期に観測されたものである。

2.2 解析項目

以上、6つの連続計測データに対し、下記のような解析項目を設定した。計測器並びにその計測箇所等については、既に詳細な報告¹⁾がなされているので、ここでは概要を示すにとどめる。

(1) 天気図、気温、気圧

天気図は、連続計測データを行った際、最盛期の海象が発生した時刻に最も近いもの²⁾⁻⁷⁾を用いる。気温、気圧は、駐在観測員が、由良港の近くに設置された観測基地（参考文献1)のp. 23、図-3参照）で一日4回（9時、12時、15時、18時）行った観測結果を用いる。

(2) 風（平均風向、平均風速）

風の解析には、POSEIDONの測風塔（海面上19.5m、参考文献1)のp. 66、図-1参照）に取り付けられた風速計のデータを用いる。ただし、計測器が途中でかわっており、

- ・ L70831、L71217、L80202
 Vortex型風速計
- ・ L81214、L91119、L00125
 超音波式3軸風速計

となっている（参考文献1)のp. 68、図-4参照）。

(3) 波（波向き、波高、周期）

波の解析には、POSEIDONの船首側180mの海底に設置された3台の超音波式波高計（参考文献1)のp. 67、図-3参照）のデータを用いており、3台の波高計の同時計測データから波向の推定を行っている。L70831については、当時の収録システムの都合によりNO.1波高計のデータしか取得されていなかったために、波向きの解析はできない。L00125についても、3台の波高計のうち1台（NO.3波高計）が故障したために、波向きの解析はできない。

(4) 流れ（流向、流速）

流れの解析には、POSEIDONから吊り下げたプロベラ式の流向流速計（参考文献1)のp. 69、図-5参照）のデータを用いる。ただし、設置の期間が短いために、解析はL91119、L00125に限られる。

(5) 加速度（Surge、Sway、Heave）

加速度の解析には、POSEIDONの甲板中央に設置したサーボ式加速度計（参考文献1)のp. 66、図-1参照）のデータを用いる。

(6) 動揺（Surge、Sway、Heave、Roll、Pitch、Yaw）

動揺Surge、Sway、Heaveの解析には、加速度Surge、Sway、Heaveを2重積分して変位に換算した結果を用いる。Roll、Pitchの解析には、POSEIDONに搭載されたパーティカルジャイロによ

る計測結果、Yawは船舶用方位ジャイロ (参考文献1)のp.66、図-1参照)による計測結果を用いる。

(7)長周期運動Surge、Sway

長周期運動Surge、Swayの解析には、図-1に示すPOSEIDONのフーティングに取り付けられた2台の超音波発信器と海底に設置された3台の受信器とから構成された測距装置 (以下、長周期運動計測装置と称す) から求められる結果を用いる。ただし、計測されたデータに多数のノイズが混入しており、実際の解析に使用できるのは、L91119の一部のデータに過ぎない。

(8)船首相対水位、船尾相対水位

相対水位の解析には、POSEIDONの船首側中央コラム及び船尾側中央コラムに取り付けられた超音波式相対水位計 (参考文献1)のp.66、図-1参照)の計測結果を用いる。計測器の不良により、実際の解析に使用できるのはL70831、L91119、L00125のデータである。

(9)構造歪

構造歪の解析には、歪①、⑨、⑩の箇所 (参考文献1)のp.66、図-1参照)の構造歪を用いる。

(10)係留力

係留力の解析には、係留ラインの水中部に取り付けた係留力計の計測結果を用いる。ただし、計測器が途中で替わっており、

・L70831、L71217、L80202、L81214

…… 当所設計の係留力計

・L91119、L00125

…… シャックル型係留力計となっている (参考文献1)のp.71、写真-1,2参照)。当所設計の係留力計は、No.2の係留ラインに、シャックル型係留力計はNo.2とNo.4の係留ラインに取り付けられた (参考文献1)のp.123、図-13参照)。当所設計の係留力計は防水のトラブルが発生したことにより、計測されたデータに多数のノイズが混入し、そのため、L70831、L71217、L80202、L81214の計測結果は解析に使用することができない。

表-3は、以上の内容を一覧にしてまとめたものである。表の'○'は解析可能、'△'は計測器のトラブルによりデータにノイズ等が混入しているが一部解析可能、'×'は計測器の不良により解析不可能、'-'は計測器が設置されていないために解析できないことを示している。表からわかるように、解析可能な項目が各連続計測データでまちまちであり、全ての項目について解析可能な連続計測データは、L91119に限られる。

3 データ解析

3.1 解析方法

解析に用いる連続計測データは、表-1に示すように計測時間が最大で47時間 (L91119)程度の連続したデータとなっている。解析に際しては、連続したデータを30分毎に分割して解析を行った。実際には、フリーエ変換を行う都合上2048個のデータとして解析をしており、従って、分割されたデータは、隣合うデータと248個

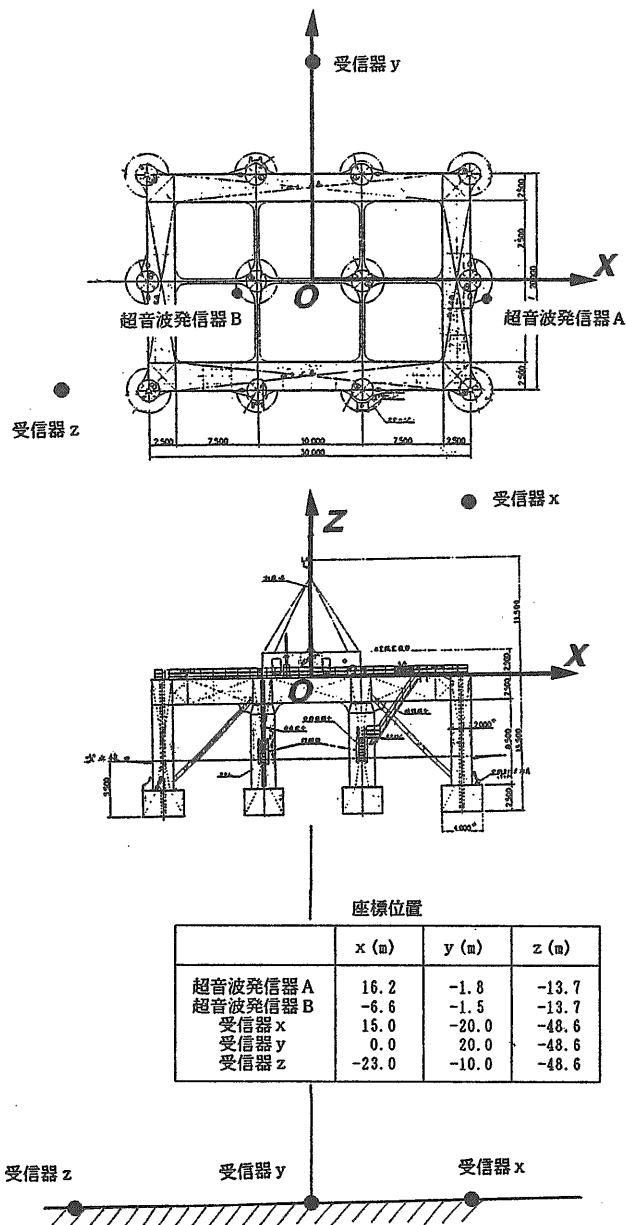


図-1 長周期運動計測装置並びに座標系

のデータがオーバーラップしている。流れについては、流速計に内蔵された収録システムを用い、サンプリング間隔が2分でありデータ数が少ないなどの理由から、1時間毎（データ数30個）に分割して解析を行った。

解析は、基本的には、統計解析により振幅分布の有義値を求めるが、項目によっては特別な前処理や解析を要するものもある。それらについて、以下に簡単に述べる。

(1) 波

波の解析は、ゼロアップクロス法によって定義される波高、振幅について統計解析を行い、有義波高と有義波周期を求める。複数の波高計

のデータがある場合には、それらの平均値を用いる。

波向き解析には、3台の波高計の同時計測データを用いる。方向波スペクトルの推定法として、橋本ら⁹⁾によって提案された拡張エントロピー原理法（EMEP）を用いた。ただし、方向波スペクトルの推定を行うデータは、精度上の観点から有義波周期9秒以上のデータに限る⁹⁾ことにする。解析は、3台の周波数スペクトルの平均値の最大のエネルギーを有する周波数成分についてEMEPにより方向波スペクトルを求め、最大のエネルギーを有する方位を波向きとしている。

表-3 解析項目

項目	L70831	L71217	L80202	L81214	L91119	L00125
天気図	○	○	○	○	○	○
気温	○	○	○	○	○	○
気圧	○	○	○	○	○	○
風	○	○	○	○	○	○
風速	○	○	○	○	○	○
波	—	○	○	○	○	×
波向き	—	○	○	○	○	○
波高	○	○	○	○	○	○
周期	○	○	○	○	○	○
流れ	—	—	—	—	○	○
流速	—	—	—	—	○	○
加速度						
Surge	○	○	○	○	○	○
Sway	○	○	○	○	○	○
Heave	○	○	○	○	○	○
動揺						
Surge	○	○	○	○	○	○
Sway	○	○	○	○	○	○
Heave	○	○	○	○	○	○
Roll	○	○	○	○	○	○
Pitch	○	○	○	○	○	○
Yaw	×	○	○	○	○	○
長周期運動						
Surge	—	—	—	×	△	×
Sway	—	—	—	×	△	×
相対水位						
船首	○	×	×	×	○	○
船尾	—	—	—	—	○	○
構造歪						
①	○	○	○	○	○	○
⑨	○	○	○	○	○	○
⑩	○	○	○	○	○	○
係留力						
⑤	×	×	×	×	○	○
⑥	—	—	—	—	○	○

○ : 解析可能

× : データ不良により解析不能

△ : 一部解析可能

— : 計測器が設置されていない

(2) 加速度 Surge、Sway、Heave

加速度は傾斜による影響を受けているので、前処理として、SurgeとSwayについて次の補正を行っている。なお、Heaveに関しては、傾斜の影響は小さいとして補正は行っていない。

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{x}_a \cos \theta + (\ddot{z}_a + g) \sin \theta \\ \ddot{y} &= \ddot{y}_a \cos \phi - (\ddot{z}_a + g) \sin \phi \\ \ddot{z} &= \ddot{z}_a \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 \ddot{x} 、 \ddot{y} 、 \ddot{z} は傾斜の影響を除いた甲板中央の Surge、Sway、Heave 方向の加速度 \ddot{x}_a 、 \ddot{y}_a 、 \ddot{z}_a は計測された Surge、Sway、Heave 方向の加速度、 g は重力加速度、 ϕ は Roll 角、 θ は Pitch 角を表す。

(3) 動揺 Surge、Sway、Heave

動揺 Surge、Sway、Heave は加速度を 2 重積分して求めるが、ここではフーリエ変換を行い、各成分波に対して $(2\pi f)^2$ で割り、位相を π だけ修正して逆フーリエ変換により動揺 Surge、Sway、Heave の時系列を求めている。ただし、 $(2\pi f)^2$ で割るために、わずかな低周波変動やノイズが、低周波数で拡大されるので、次のようなハイパスフィルターをかけている。

$$F(f) = \begin{cases} \sin^4\left(\frac{\pi f}{2f_c}\right) \cdots & (f \leq f_c) \\ 1 \cdots & (f > f_c) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 f_c はカットオフ周波数であり、 $f_c = 0.0795\text{Hz}$ としている。

(4) 長周期運動 Surge、Sway

長周期運動 Surge、Sway は、長周期運動計測装置により収録されたデータ、即ち、フーティングに取り付けた超音波発信器 A、B と海底の受信器 X、Y、Z 点の間の同時計測データから求めることができる。

図-1 のような座標系を考える。POSEIDON に外力が作用せず、静かに浮かんでいる時の A 点、B 点の座標を (x_{a0}, y_{a0}, z_{a0}) 、 (x_{b0}, y_{b0}, z_{b0}) とする。外力により POSEIDON が、Surge : x 、Sway : y 、Heave : z 、Roll : ϕ 、Pitch : θ 、Yaw : ψ の動揺をした時、その時の A 点の位置 (x_a, y_a, z_a) 、B 点の位置 (x_b, y_b, z_b) は

$$\begin{aligned} x_a &= x + x_{a0} + \theta z_{a0} - \psi y_{a0} \\ y_a &= y + y_{a0} + \psi x_{a0} - \phi z_{a0} \\ z_a &= z + z_{a0} + \phi y_{a0} - \theta x_{a0} \\ x_b &= x + x_{b0} + \theta z_{b0} - \psi y_{b0} \\ y_b &= y + y_{b0} + \psi x_{b0} - \phi z_{b0} \\ z_b &= z + z_{b0} + \phi y_{b0} - \theta x_{b0} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。(3) 式を解けば、動揺 6 成分を求めることができる。しかし、ここで解析に使用する L9 1119 の連続計測データは、発信器 B のデータに多数のノイズが混入しており発信器 A のデータだけしか用いることができない。そのため、方程式は x_a 、 y_a 、 z_a に関する 3 つの方程式に限られる。よって、ここでは、Roll : ϕ 、Pitch : θ 、Yaw : ψ としてジャイロの出力を与え、 x_a 、 y_a 、 z_a に関する 3 つの方程式を解くことによって、Surge、Sway、Heave を求めることにした。

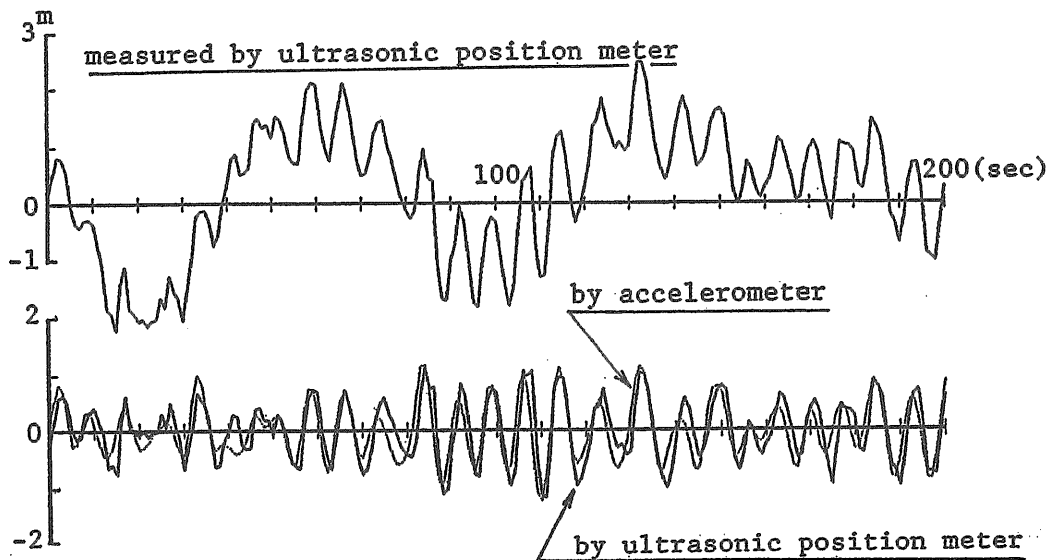


図-2 長周期運動 Surge の計測例 (上段の図) 及び加速度計による計測結果との比較 (下段の図、実線は上段の図から 40 秒以下の成分を取り出した結果、破線は加速度計から求めた結果)

長周期運動計測装置の精度を検証するために、以上の方法で求めたSurgeの短周期成分のみ(0.025Hz以上)を取り出して、加速度から求めた動揺Surgeと比較した。結果を図-2に示す。図より、両者は振幅及び位相ともによく一致しており、長周期運動計測装置から推定された結果は十分な精度を有していることがわかる。

図-3は、長周期運動計測装置から推定されたSurgeをスペクトル解析した結果である。図から、線形な波浪外力による短周期側のピークのほかに、長周期側に有意なエネルギーを有することがわかる。ここでは、この長周期側のエネルギーに着目し、長周期運動Surge、Swayの解析を行う。即ち、長周期成分(0.025Hz以下)を取り出し統計解析を行う。

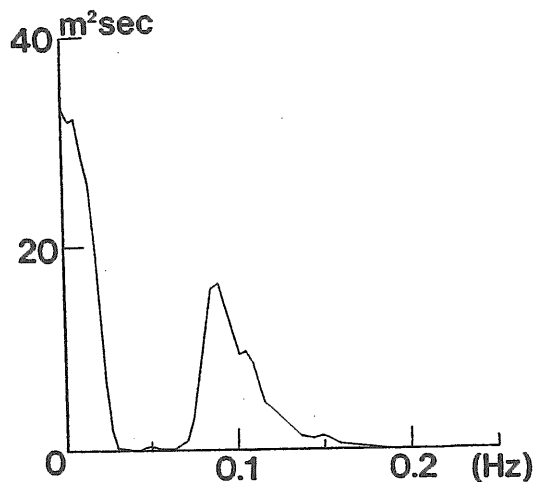


図-3 長周期運動計測装置から求めたSurgeのスペクトル

3.2 解析結果

解析結果を図-4~9に示す。一回の臨時解析結果は、13枚の図面から構成されており、以下のような解析項目の経時変化を表している。なお、計測器の故障、設置時期などの問題により解析できない場合は、全て空欄として表示している。図に示す波向が途中で途切れているが、前述の理由により波向推定の対象を有義波周期9秒以上に限っていることによる。

- ・ 天気図
- ・ 気圧、気温
- ・ 平均風速
- ・ 有義波高、有義波周期
- ・ 平均流速
- ・ 風向、波向、流向(入射してくる方位を向きとして定義)
- ・ 加速度Surge、Sway、Heaveの振幅の有義

値

- ・ 動揺Surge、Sway、Heave(加速度の2重積分)の振幅の有義値
- ・ 長周期運動Surge、Swayの長周期成分(0.025Hz以下)の振幅の有義値
- ・ 動揺Roll、Pitch、Yawの振幅の有義値
- ・ 船首、船尾相対水位の振幅の有義値
- ・ 構造歪①、⑨、⑩の振幅の有義値
- ・ 係留力⑤、⑥の振幅の有義値

3.3 考察

L70831は台風12号によるものであり、経路としては、8月30日に東シナ海、8月31日に対馬海峡をぬけて日本海に入り、さらに日本海を北上して、9月1日にオホーツク海に抜けたものである。この間、日本本土には上陸していない。風波の最盛期には、有義波高6.7mを記録している。また、Heave加速度及び船首相対水位の解析結果から、9月1日午前0時過ぎより急激に振幅が大きくなっており、緊張係留索が脱落したのはこの時刻付近であると想定される。

冬期に観測された連続計測データ(L71217、L80202、L81214、L91119、L00125)は、いずれも西高東低の典型的な冬型の気圧配置のものである。L80202、L81214、L91119、L00125は、低気圧が日本海を北上し北海道付近で急速に発達してオホーツク海に抜け、さらに発達して西高東低の気圧配置になったものである。これに対し、L71217は、低気圧がオホーツク海において発達しベーリング海に向かうものである。いずれの連続計測データも日本海をおおう西高東低の安定した等圧線の分布が見られ、一方向からの季節風が長時間吹き、風波が発達したものと想定される。風、波のデータも、ほぼこれを裏付けている。

各連続計測データの最大値を一覧にして表-4に示す。

4 おわりに

以上、4年間の実海域実験で行った43の臨時計測のデータの中から、代表的な6つのデータを選定し、解析を行った。全ての解析項目について解析を行えたのは、わずかに一つの連続計測データに過ぎない。しかしながら、取得しているデータが高波時の長時間連続記録ということもあり、これらの連続計測データの持つ情報には計り知れないものがある。事実、解析項目の中には、現在も鋭意解析が進められている項目もあり、その成果については、改めて報告す

る予定である。

今後、ここで紹介した解析結果が海洋構造物の設計の一助になれば、幸いである。

参考文献

- 1)井上令作他：浮遊式海洋構造物の実海域実験、その1 実験の概要、船舶技術研究所報告別冊13号、1992
- 2)気象庁：昭和62年9月1日-昭和62年9月30日 天気図
- 3)気象庁：昭和62年12月1日-昭和62年12月31日 天気図
- 4)気象庁：昭和63年2月1日-昭和63年2月29日 天気図
- 5)気象庁：昭和63年12月1日-昭和63年12月31日 天気図
- 6)気象庁：平成1年11月1日-平成1年11月30日 天気図
- 7)気象庁：平成2年1月1日-平成2年1月31日 天気図
- 8)橋本典明他：海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張、港湾技術研究所報告、第32巻第1号、pp. 3-25、1993
- 9)吉元博文他：浮遊式海洋構造物の実海域実験 その3 実験海域の波方向スペクトルについて、日本造船学会論文集、第168号、pp. 255-262、1990

表-4 各連続計測データの最大値

項目			L70831	L71217	L80202	L81214	L91119	L00125
平均風速	m/s		17.7	18.8	20.6	24.4	24.4	19.3
	有義波高	m	6.7	7.3	7.1	6.0	6.8	5.4
	平均流速	m/s	-	-	-	-	0.6	0.1
加速度	Surge	m/s ²	2.0	1.5	1.5	1.3	1.4	1.6
	Sway	m/s ²	1.2	0.9	0.8	0.9	0.7	0.6
	Heave	m/s ²	2.0	2.0	1.9	1.5	1.9	1.6
動揺	Surge	m	5.6	4.4	4.7	3.6	3.8	2.9
	Sway	m	2.5	2.3	2.1	1.9	1.8	1.2
	Heave	m	5.2	6.1	6.1	4.5	5.6	4.2
	Roll	m	8.4	4.3	4.8	4.6	4.4	3.3
	Pitch	m	10.0	12.0	11.8	10.0	10.8	6.5
	Yaw	m	×	3.6	3.4	2.9	2.6	2.4
	長周期	Surge	m	-	-	-	×	8.4
	Sway	m	-	-	-	×	6.9	×
相対水位	船首	m	3.2	×	×	×	4.7	4.2
	船尾	m	-	-	-	-	2.7	2.2
構造歪	①	μs	155.0	183.5	180.4	172.1	185.0	174.0
	⑨	μs	146.0	153.7	146.7	140.1	159.0	148.0
	⑩	μs	102.0	119.0	114.7	111.4	114.0	115.0
係留力	⑤	ton	×	×	×	×	11.0	5.00
	⑥	ton	-	-	-	-	9.8	2.5

× : データ不良により解析不能
 - : 計測器が設置されていない