

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.41 NO.4 December 2002

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)
第 41 卷 第 4 号 (Vol. 41, No. 4), 2002年12月 (December 2002)

目 次 (CONTENTS)

1. RC 棧橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発
..... 小牟禮 建一・濱田 秀則・横田 弘・山路 徹 3
(Development of A Model on Deterioration Progress for RC Deck of Open Type Wharf
..... Kenichi KOMURE, Hidenori HAMADA, Hiroshi YOKOTA, Toru YAMAJI)

2. ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性
ーメガフロート情報基地機能実証実験報告ー
..... 飯島 一博・白石 悟・佐藤 平和 39
(Motion Characteristics of Floating Structure Moored by Hybrid Type Fender -A Report on Information Backup Center
by Megafloat-
..... Kazuhiro IJIMA, Satoru SHIRAIISHI, Hirakazu SATOH)

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性 — メガフロート情報基地機能実証実験報告 —

飯島 一博*・白石 悟**・佐藤 平和*

要 旨

船体と岸壁の間で緩衝の役割を果たすフェンダーはこれまで様々な特性のものが提案されている。フェンダーは大きく、定反力型と反力漸増型に分類される。定反力型フェンダーは変形量が小さい範囲ではフェンダー反力が比較的大きく、変位が大きくなった場合には反力がほぼ一定になるという特徴を有する。反力がそれ以上増加しない定反力部を持つので、ドルフィンや岸壁の設計荷重を大きく設定する必要がない点で有利である。一方で、反力漸増型フェンダーでは変形量が小さい範囲では反力が比較的小さく、変形が増加するに従って反力の増加率が漸増する特性を持っている。変形量が小さい範囲で反力が小さいために、常時の動揺を低減できる特長を有している。本研究では変形量が小さい範囲では反力漸増型の特性を持ち、変形量が大きくなると定反力型の特性を有するハイブリッド型フェンダーを提案し、実証を行う。平成13年度にハイブリッド型フェンダーを含む係留システムを用いて、メガフロート情報基地と呼ばれる大型浮体を係留する実証実験を行った。本報告ではメガフロート情報基地の係留実証実験の状況を報告すると共に、動揺シミュレーションによる実験結果の再現、通常船舶係留へのハイブリッド型フェンダーの適用の検討、ハイブリッド型フェンダーの縮尺模型による圧縮実験などを通して、ハイブリッド型フェンダーの工学的可能性を示す。

キーワード：ハイブリッド型フェンダー、防衝工、長周期動揺、メガフロート、係留、サブハーモニックモーション

* 海洋構造研究室

** 海洋構造研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：0468-44-5060 Fax：0468-44-0255 e-mail:shiraishi@pari.go.jp

Motion Characteristics of Floating Structure Moored by Hybrid Type Fender - A Report on Information Backup Center by Megafloat -

Kazuhiro IJIMA*
Satoru SHIRAISHI**
Hirakazu SATOH*

Synopsis

Wide variety of fender products has been proposed. They can be roughly classified into two categories. One is buckling type fender, the other is pneumatic type fender. The buckling type is advantageous in view that they have high energy absorption performance since they buckle when deflection of the fender is large. The pneumatic type is advantageous in view that reaction force of the fender is small when deflection of the fender is small, which results in small amplitude of moored ships or floating bodies in horizontal direction. In this study, a hybrid type fender is proposed. The hybrid type fender is a combination of the buckling type fender and the pneumatic type fender which are put together in serial. A mechanical stopper is equipped with at the pneumatic type fender. As long as deflection of the fender is small, the fender has almost the same characteristic as the pneumatic fender. However, once the deflection is over a defined point, the stopper works and the fender has a characteristic as the buckling type. Therefore, the hybrid type fender has advantages of both of the pneumatic type and the buckling type.

In fiscal year 2001, the hybrid type fender was experimentally applied to the mooring system of megafloat which was utilized as information backup center and installed in Yokosuka port. Deflection and reaction force of fenders were measured through the duration of the on-site experiment. A numerical simulation is conducted for interpretation of the experimental results. The numerical simulation is also applied to the cases when a cargo ship is moored at quay by use of the hybrid type fender. It is shown that the fender is effective from the viewpoint of decrement of the horizontal motion of the ship. In order to understand behavior of the hybrid type fender, a compression test was conducted under several conditions by using a scaled model.

Key Words: hybrid type, fender, long period oscillation, megafloat, mooring, sub-harmonic motion

* Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Head of Offshore Structures Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445060 Fax : +81-468-440255 e-mail:shiraishi@pari.go.jp

目 次

要 旨	39
1. まえがき	43
1.1 メガフロート情報基地について	43
1.2 ハイブリッド型フェンダーについて	45
1.3 本研究の概要	46
2. メガフロート情報基地の係留	46
2.1 設計条件	46
2.2 フェンダーの配置	46
2.3 ドルフィン構造	47
2.4 実証実験状況	48
3. 実証実験観測	50
3.1 計測項目	50
3.2 計測方法および計測結果解析法	54
3.3 計測結果の概要	56
3.4 計測結果の詳細解析	57
4. 考察	77
4.1 概要	77
4.2 計測結果に対するシミュレーション	77
4.3 ハイブリッド型フェンダーのメガフロートへの適用	81
4.4 ハイブリッド型フェンダーの船舶係留への適用	83
5. ハイブリッド型フェンダーの縮尺模型実験	90
5.1 概要	90
5.2 縮尺模型実験結果	92
6. あとがき	93
謝辞	94
参考文献	94

1. まえがき

1.1 メガフロート情報基地について

あらゆる情報が電子化された形で記録され、電子化された情報がやりとりされるIT(Information Technology)社会においては、情報は社会にとっての血液であり、情報が途切れたり失われたりすることが大きな社会的損失につながる。例えば、1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災、2001年9月11日に米国で発生した航空機による同時多発テロ、主要銀行で発生したオンラインシステムの障害、これら現代の大災害や大事故に際して露見した問題の一つに、情報の喪失があったことが指摘される。阪神・淡路大震災や航空機による連続テロにおいては膨大な量のデータが失われたし、銀行のオンラインシステム障害による実害は極めて限定的であったものの、オンラインシステムの信頼の回復にはある程度の時間を要した。いわゆるコンピューターの2000年問題も情報システムの破綻についてのやや過大な懸念が人々の心の中に生じたことに端を発している。

社会にとっての血液である情報を絶えず蓄積し動かすためには、それを支えるコンピューターシステムはいかなる場合でも健全に作動する必要がある。万が一システムに障害が発生した場合においても、すぐにその代理的役割を果たすための二重三重のバックアップシステムが導入され稼働されていなければならない。昨今のIT化の急速な進展に伴い、このような情報のバックアップ需要は向こう2年間に3倍の増加の見込みといわれており、特に情報が集中する大都市圏における情報バックアップ体制はIT社会の実現に不可欠な状況となっている。

メガフロート(メガ=巨大+フロート=浮体、あるいは超大型浮体)は、①耐震性に優れた特性を有する、②発電装置や蓄電池を搭載することで、災害時にも電源が不断である、③大都市からのアクセスが容易である、といった情報バックアップ基地としては最適な基本性能を有している。しかし、メガフロートを情報基地として今後利用していくためには、極めて大容量かつ長時間連続稼働となるサーバーなどのコンピュータ機器を常に安定した環境の中に設置し、いかなる気象・海象条件の中でもその機能が満足されるかどうかを実証する必要がある。

そのため、平成13年度において、国土交通省港湾局、国土交通省海事局、総務省および経済産業省が連携してメガフロート上にITバックアップ基地を設置するための技術課題を実証実験を通じて解決することとした。港湾空港技術研究所においては、国土交通省港湾局からの委託によって、ハイブリッド型係留装置の開発・実証を行

った。なお、連携の内容として海事局(海上技術安全研究所に委託)ではメガフロートの挙動および浮体・係留系の疲労被害などを評価する長期予測診断システムを開発し、水槽模型実験さらには情報バックアップ基地実験用浮体を用いた実海域実験によってその有効性を検証する。総務省(通信・放送機構に委託)はクラスタ型ネットワークによるバックアップサーバーの負荷低減技術の開発・実証を、経済産業省(NTTコミュニケーションズに委託)は浮体上の情報処理システムに関する実証研究を同実験用浮体を用いて実施する。

メガフロート情報基地機能実証実験においては、平成9年度から12年度にメガフロート技術研究組合によって行われたメガフロートの空港利用に関する実証的研究で用いられたメガフロート(写真-1)の一部を切り出し、切り出された浮体を改造し再び接合することで実証実験に供する。

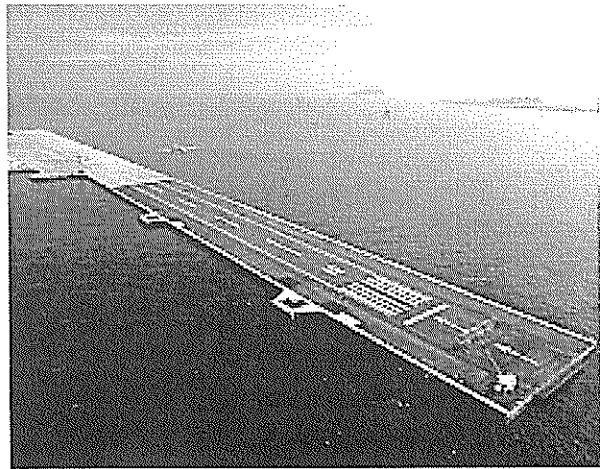


写真-1 空港機能実証用メガフロート

メガフロート情報基地の設置場所は横須賀市夏島町住友重機械工業株式会社横須賀製造所北護岸前海域とした。設置海域については図-1に示す。また、メガフロート情報基地の概略を図-2に示した。メガフロート情報基地は長さ200m、幅100m、高さ3mの構造であり、浮体内部に情報サーバーなどが設置されている。係留は東西2基のドルフィンに、フェンダーを取り付けた、いわゆるドルフィン・フェンダー方式の係留を採用した。ドルフィン・フェンダーによる係留方式は、平成10年度から12年度にメガフロート技術研究組合によって行われたメガフロートの空港利用に関する実証的研究における係留方式としても用いられたものであり、これまでも洋上石油備蓄基地などの大型の浮体あるいは船舶の係留としての実績がある。

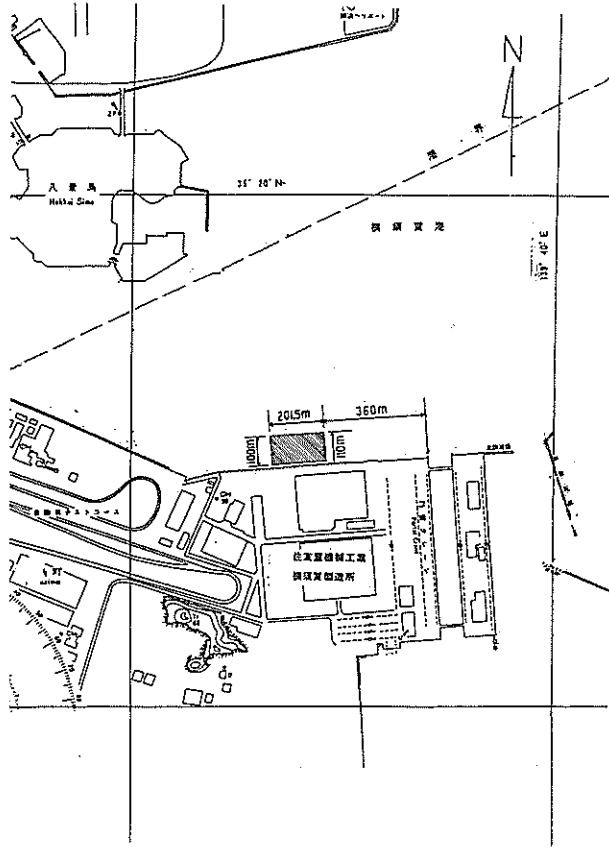


図-1 メガフロート情報基地設置海域

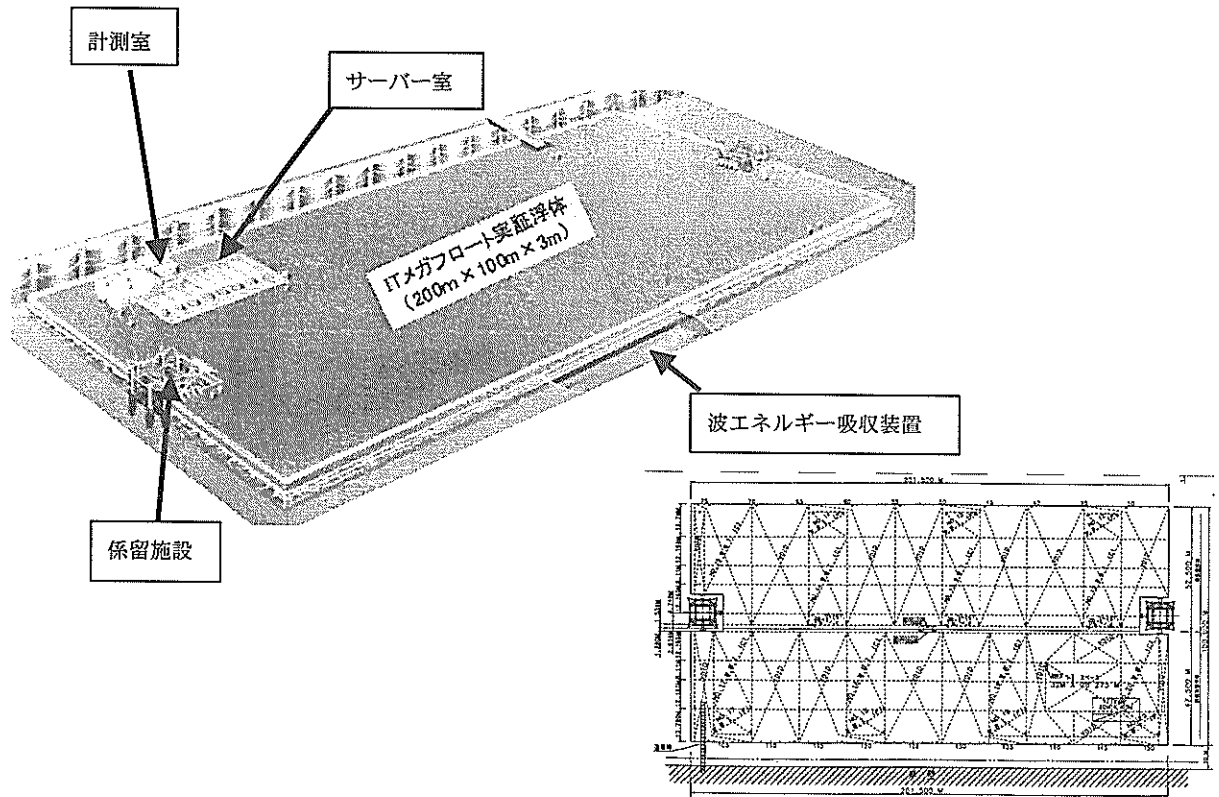


図-2 メガフロート情報基地概略

1.2 ハイブリッド型フェンダーについて

各社から様々な形式のフェンダーが商品化されており、それぞれに長所と短所を有している。変位-荷重特性から、フェンダーは大きく二種類に分類される。ひとつは反力漸増型といわれる種類である。もうひとつは定反力型といわれる種類である(図-3)。

反力漸増型では、初期変形時の反力が低く、変位が増加するに従って反力の増加率が増していく。初期の反力が小さいために、“動揺が小さく抑えられる”、反力壁の設計で反力による“疲労が問題になる場合には有利”、などの長所がある。短所としては大変形領域では反力が急激に大きくなるので、反力壁への作用荷重が大きくなりコスト増につながる、という欠点がある。

一方で定反力型は、変位が大きくなったときにほぼ一定の反力になる部分を有することが特長があり、“エネルギー吸収が大きい”、ヒステリシス特性を有しており“エネルギー散逸による係留船舶の応答低減が期待できる”、といった長所が挙げられる。

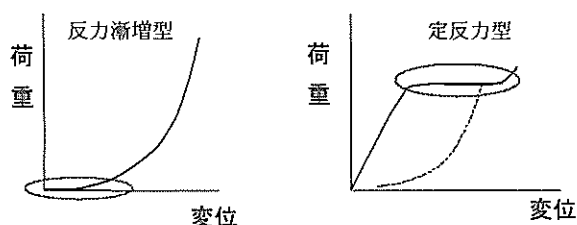


図-3 反力漸増型と定反力型

ハイブリッド型フェンダーとは、変位復元力特性の異なる二種類以上のフェンダーを直列に組み合わせて作るフェンダーで、各フェンダーの特性を用いて、高いエネルギー吸収性能と同時に常時の動揺の低減効果をめざすものである。本報告中では大きな変位を許容する目的で同じ特性のフェンダーを単に重ねるフェンダーを重ねフェンダーと呼んで区別することにする。

ハイブリッド型フェンダーは、前面に設置する‘柔らかい’フェンダーⅠと後方に設置する‘硬い’フェンダーⅡとから構成される。フェンダーⅠに対してはストッパーが設けられ、フェンダーⅠ自体がある規定された以上に変形が進行することを防止している。この状態からは、フェンダーⅡのみが変形し、浮体の動揺を吸収する(図-4および図-5参照)。

外力の小さい常時の場合にはフェンダーⅠが作用し、大きな定常力の作用する異常時には、フェンダーⅡが作用する。また、地震時にはフェンダーⅠによる軟らかい

特性が系の固有周期を長くする効果があるため、浮体の地震動による揺れを軽減させる。

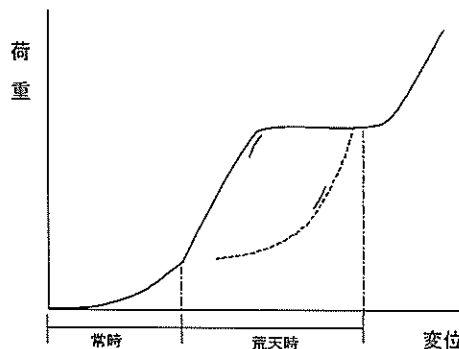


図-4 ハイブリッド型フェンダーの変位-荷重特性

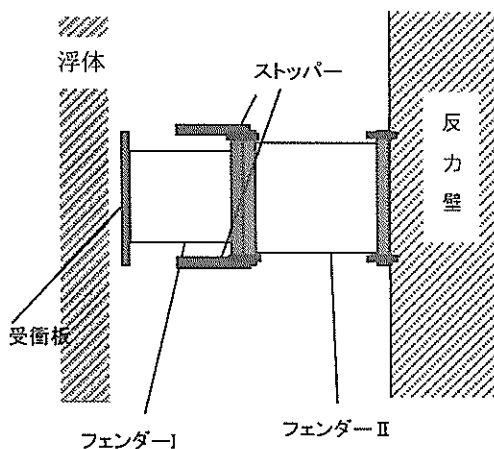


図-5 ハイブリッド型フェンダーの機構

ハイブリッド型フェンダーの用途の代表的なものとして二通りが考えられる。ひとつは、メガフロートのような大きな浮体を厳しい気象・海象条件下に設置する場合である。

浮体構造が大きい場合には、作用する荷重も大きくなる。大きな荷重に対して十分な容量を確保できるようにフェンダー選択を行うと、ばね定数が大きなものとなって、固有周期が低下して波浪の主要エネルギー域に入り込んでしまう。すると同調応答のために応答が大きくなってしまふことがある。これを避けるためには、通常の気象条件においてはやわらかな係留特性(ばね定数小)を有するハイブリッド型フェンダーが有効である。

もうひとつは通常の船舶を岸壁に係留する際の、長周期動揺の低減である。船舶を岸壁に係留する場合には、沖側に動揺する際には係留索によって反力が生じ、岸壁

側に動揺する際にはフェンダーによって反力が生じる。係留索とフェンダーのばね定数の比は100倍～1000倍といわれており、このような係留系の非対称が存在する場合には、サブハーモニックモーションといわれる長周期動揺が生じることが知られている（第4章）。そこでハイブリッド型フェンダーを用いることで、非対称性が緩和されるので浮体動揺を低減できる可能性がある。

1.3 本研究の概要

本研究においては、ハイブリッド型フェンダーをメガフロート情報基地に適用し、実証実験を行う。実証実験においては、主として係留系周りの計測を行い、メガフロート情報基地に関してのハイブリッド型フェンダーの機能について確認を行う。また考察として動揺シミュレーションによって、実験で確認された応答を再現することを試みる。また、ハイブリッド型フェンダーを通常の船舶係留に応用した場合の効果について検討を行う。

実証実験では、必ずしも十分に大きな荷重に対して、応答が検証されるとは限らないから、大きな荷重下でハイブリッド型フェンダーがどのような挙動をするかを別途調べておく必要がある。そこで、ハイブリッド型フェンダーの縮尺模型を用いて、圧縮試験を行った。

本論文においては、第1章に研究の背景の説明を行った。続いて第2章ではメガフロート情報基地に用いた係留系について詳述した。第3章においては、実証実験観測についての方法、結果を示す。第4章においては、実験観測結果に対応するシミュレーションを行い、実験の解析を行う。考察としてハイブリッド型フェンダーをメガフロート情報基地以外の用途に適用した場合の有効性について検討した。一つはメガフロートを激しい海象条件に設置した場合のハイブリッド型フェンダーの有効性の検討と、コンテナ船や一般貨物船などの船舶を岸壁に係留した場合の有効性についてである。第5章においては、縮尺模型による圧縮試験の結果を示す。最後に第6章で本研究の総括を行う。

2. メガフロート情報基地の係留

2.1 設計条件

メガフロート情報基地の設計のための自然環境条件は表-1の通りである。ここでは代表的な項目だけを示した。メガフロート情報基地の実質的な供用期間が1年未満であることを考慮して、自然環境条件設定の際の供用年数は1年と設定し、安全性確認のための気象・海象条件にあたっては10年の再現期間を設定した。

表-1 係留の設計のための自然環境条件

						単位
波浪 (有義値)	波向き 常時	NNE	NE	ENE	E	m
	異常時	1.0	0.8	0.6	0.5	
風速	常時	26				m/s
	暴風時	32				
潮流		東西方向に0.5				kt
潮位	HHWL	C. D. L. +2.450				m
	HWL	C. D. L. +1.886				
	MSL	C. D. L. +1.100				
	LWL	C. D. L. +0.121				
	LLWL	C. D. L. -0.300				
地震		設計震度Kh 0.2				
津波	波高	0.8				m
	水位上昇	0.8+HWL				m
	流速	0.6				m/s
	津波周期	17.5				min
水深		東側ドルフィン 5.3 西側ドルフィン 4.8 (平均5.0)				m

漂流力係数1.0, 抗力係数1.0, 摩擦係数0.005とする

ドルフィン構造の設計にあたって適用した基準などは以下の通りである。

- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説
- ・道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, IV 下部構造編
- ・ジャケット工法技術マニュアル
- ・鋼管構造設計施工指針・同解説
- ・鋼構造架設指針
- ・DNVルール

2.2 フェンダーの配置

フェンダー配置の決定のフローを図-6に示した。まず、定常荷重について概略検討を行う。定常荷重として考慮するのは、波強制力、波漂流力、風抗力、潮流力である。次に固有周期についての検討を行う。固有周期が波の有効なエネルギーをもちうる周期範囲に入っていないことを確認した後で、フェンダーの候補を絞った。選ばれた候補について、動揺シミュレーションを行って容量が十分であることを確認し、最も適当なフェンダー配置を決定した。

最終的なフェンダー選択の結果を図-7に示した。メガフロート情報基地のフェンダーは東西に関して対称になっている。東西方向の動揺に対しては東西一対のハイブリッド型フェンダーが働き、南北方向の動揺に対しては東西二対の重ねフェンダーが働く。ハイブリッド型フェ

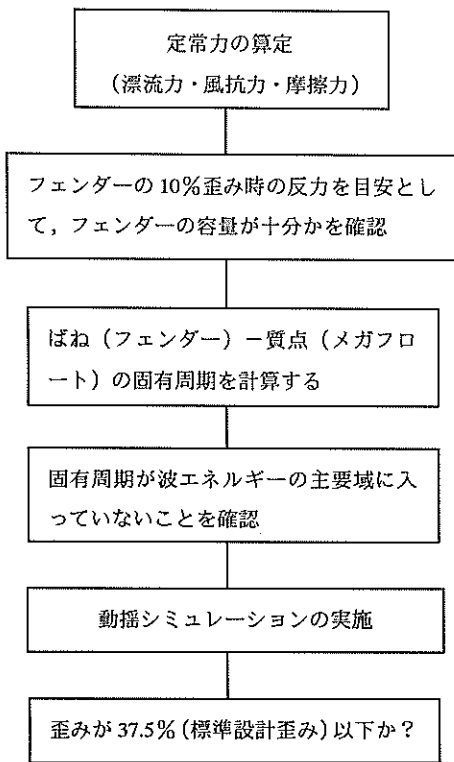


図-6 フェンダー検討の手順

フェンダーはプリテスノン社製SUC1600H-RHと横浜ゴム社製ABF-P800H×800φ(内圧0.8kgf/mm²)を組み合わせている。セル型フェンダーSUC1600-RHは定反力型であり、空気式フェンダーABF-P800Hは反力漸増型の反力特性を有している。なお、ストッパーの位置はABF-P800Hの高さ800mmに対して40%として、ABF-P800Hが320mm変形したところで作用するように調整されている。一方で重ねフェンダーは南側、北側とも共通にSUC1700Hを二段に重ねたものを使用した。各フェンダーと浮体の受衝板の間には中立位置で10cmの間隙が空いている。

図-8には設計されたハイブリッド型フェンダーの変位-荷重曲線を示した。この曲線はプリテスノン(株)の圧縮試験機による実験によって得られたものであり、実験は海上技術安全研究所において実施された。横軸はSUC1600Hの高さ1600mmに対するABF-P800Hの変形量を表す。ABF-P800Hの変形量が20%、すなわち320mmになったときにストッパーが作用するようになっている。この時のフェンダー全体の変形量はおおよそ360mmである。縦軸は圧縮荷重を示している。ストッパーが作用するのはフェンダー荷重が10tf(約100kN)に達したときである。なお、圧縮荷重の計測には実証実験において用いたロードセルと、圧縮試験機に付いている荷重計を用いており、実証実験において用いたロードセルの検証にもなっている。

図-9には同様に重ねフェンダー部の変位-荷重曲線を示した。

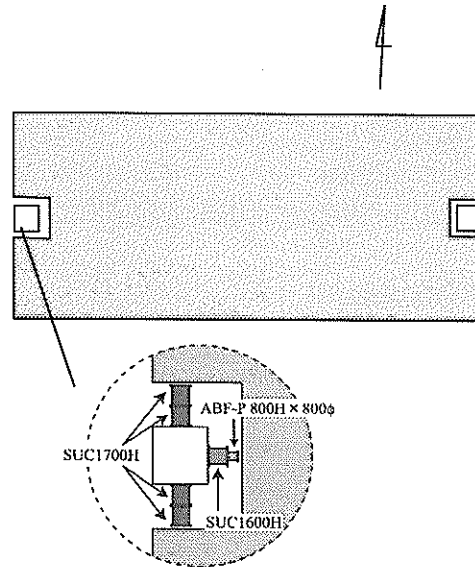


図-7 メガフロート情報基地のフェンダー配置

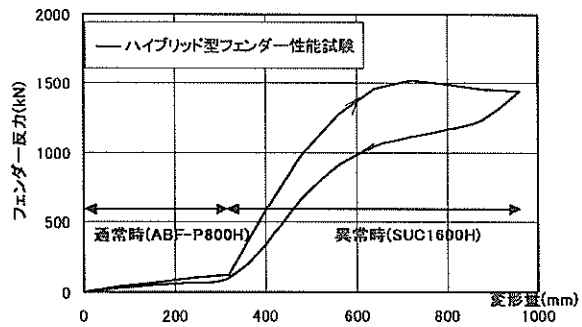


図-8 フェンダーの変位-荷重特性曲線

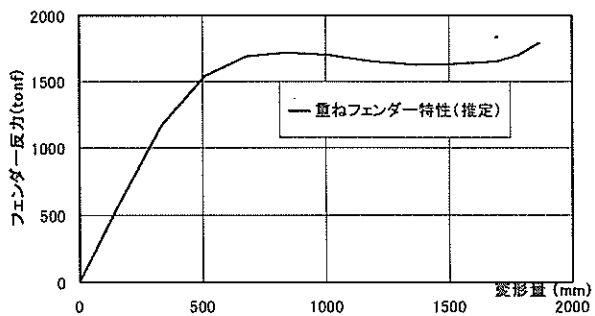


図-9 重ねフェンダー変位-荷重曲線

2.3 ドルフィン構造

フェンダー反力、自重、浮力、風圧力、波力、潮流力、地震力などを考慮して、ドルフィン構造の設計を行っている。設計時には暴風時、地震時、施工吊時、撤去時の

強度について検討を行った。

ドルフィン構造の配置については図-2に示されている。ドルフィン構造は、浮体切り欠き部におさまるように東西に対称に二基配置されている。ドルフィン構造の概略について、図-10に示す。ドルフィン構造は八角形のジャケット構造をしており、縦・横・高さは10mを少し越える程度の大きさである。ドルフィン構造は8本のレグ部分を貫通するように鋼管杭で海底面に固定されている。

2.4 実証実験状況

ここでは、メガフロート情報基地の設置状況などを説明すると共に、写真を示す。

写真-2は係留ドルフィンの設置工事の風景である。メガフロート情報基地浮体設置に先立って、まずドルフィン構造の設置を行い、曳航してきた浮体を東西のドルフィンを含みこむように洋上接合した。ドルフィン構造の設置に際しては、ドルフィンを仮受け杭で仮固定し、ドルフィンのレグ内を通して杭を地盤に打ち込むことによって、ドルフィン構造を地盤に対して固定している。写真中に写っているのは杭打ち船、打設作業中の杭、ドルフィン構造である。

写真-3はメガフロート浮体の設置状況を示す。写真は岸壁からメガフロート情報基地浮体を撮影したもので、遠方に東側ドルフィン、アンパや計測用パソコンなど計測システムがその内部に設置された計測室が写っている。

写真-4はドルフィン構造を示す。写真は浮体の切り欠き部周辺において撮影されたものである。大直径の縦部

材をレグと呼んでおり、前述のようにレグ中に杭を通して地盤に対して固定されている。レグと杭の間はグラウトによって固定されている。写真中に見えるチェーンは重ねフェンダーが重力によって、変形することを防ぐために付けられたものである。また、画面左手に見えるケーブルは浮体とドルフィンの間の取り付け部の計測用のものである。浮体の潮汐、高潮、波浪動揺による上下変動を考慮して、十分な余裕が確保されている。

写真-5、写真-6はフェンダーを示す。これらは共に東側のドルフィンに取り付けられたフェンダーである。写真-5はハイブリッド型フェンダーのものであり、基部には大型のスーパーセル型フェンダーSUC1600Hが、先端部には比較的小型の空気式フェンダーABF-P800Hが取り付けられている。また、これらフェンダーの間にはストッパーなどの機構が設けられているのがわかる。各フェンダーの上部には変位計が取り付けられている。写真-6には重ねフェンダーが写っている。基部側のフェンダーはドルフィンのレグやブレースよりも内部に入り込んでいるために、写真中では影に入り込んでいるので、先端部のフェンダーのみが確認できる。チェーンは前述の重力による変形防止のためのものである。

写真-7には計測室内部に設置された計測システムの一部が写っている。これらはアンパおよび計測用のパソコンがラック内に並べられている。奥から三つが海上技術安全研究所管理のラック、一番手前が通信・放送機構管理のラック、その間が港湾空港技術研究所管理のラックになっている。

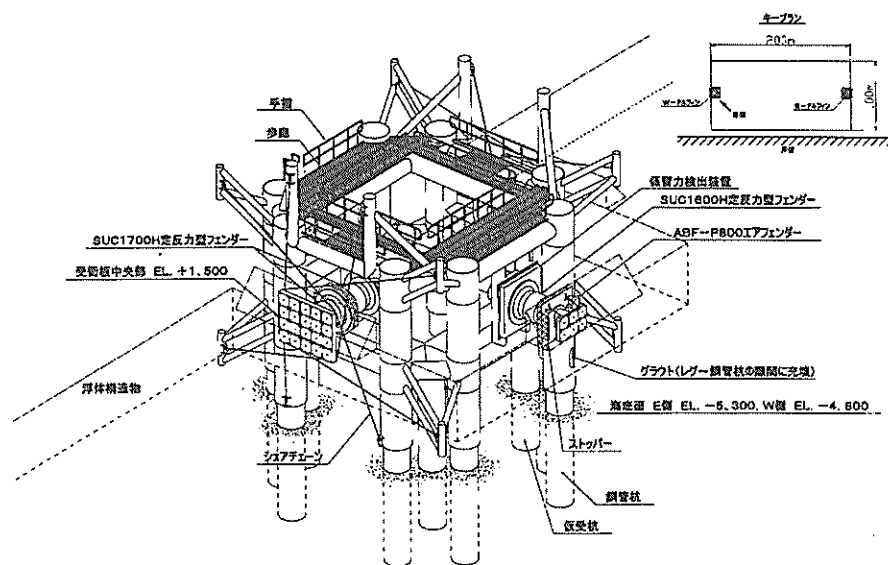


図-10 ドルフィン構造



写真-2 杭打ち工事状況



写真-5 ハイブリッド型フェンダー



写真-3 メガフロート浮体設置状況

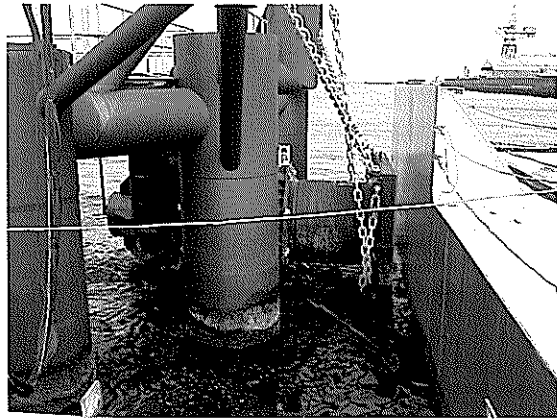


写真-6 重ねフェンダー



写真-4 係留ドルフィン

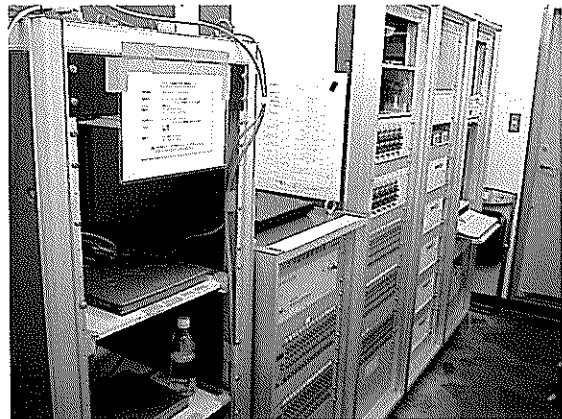


写真-7 計測室内部の様子

3. 実証実験観測

3.1 計測項目

ドルフィンの設置工事、浮体本体の接合・設置、計測機器の設置と調整の後、実証観測をスタートさせた。実証実験期間は平成13年11月半ばから平成14年3月後半までである。ただし、平成13年11月中は機器調整などを行ったので、有意なデータの取得は平成13年12月以降となった。以上の期間、通算4ヶ月ほどの間、実証観測が行われた。

主要な計測項目を表-2に示す。本研究は海上技術安全研究所などと共同で行っており、計測システムについても海上技術安全研究所のものに統合されて実証実験の計測が実施された。港湾空港技術研究所においては、主としてメガフロート情報基地の係留系に関する計測を行った。海上技術研究所においては、主として浮体構造と自然環境条件の計測を行った。海上技術研究所の実施項目を含めて、100を超える項目についての計測を同時に行った。海上技術研究所の計測項目の中には、相対水位、風速などの、応答の評価に欠かせない計測項目があるので、海上技術安全研究所と港湾空港技術研究所の間でデータを共有するものとした。

図-11と表-3には港湾空港技術研究所が実施した係留系に関する計測点について示した。係留系についての計測項目は、フェンダー変形（圧縮量）、フェンダー荷重、杭中歪み、ドルフィン上加速度である。表-3には港湾空港技術研究所で計測を実施した項目および海上技術研究所で計測を実施した計測項目のうち、以降の説明で必要になる項目について示した。

フェンダー荷重については、湾口の向きから考えて最も生じる荷重を計測できるように、東西の重ねフェンダーについては北側に面したフェンダーに作用する荷重のみを測るものとした。ハイブリッド型フェンダーについては、東西2箇所両方について荷重の計測を行っている。また、荷重計測時には容量の大きなひとつの荷重計を用いる代わりに、容量の小さな三つの荷重計で計測を行うものとした。これは荷重計に作用する荷重の偏心をさけるためであり、3点から構成される面でフェンダー荷重を計測するものとした。従って、 $4 \times 3 = 12$ chの計測項目がある。また、事前に行った圧縮試験において試験機に備えられた荷重計の出力と比較することで適切に荷重が検出されることを確認している。本報告では東側ハイブリッド型フェンダー部の荷重をE-x、西側ハイブリッド型フェンダー部の荷重をW-x、東側ドルフィンの北側重ねフェンダー部の荷重をE-y、西側ドルフィンの北側重ねフ

エンダー部の荷重をW-yと称することとする。

フェンダー変形に関しては、東西それぞれについて3軸、合計6軸全ての各フェンダーに対してそれぞれ計測を行った。例えば、ハイブリッド型フェンダーはSUC1600HとABF-P800Hの二つのフェンダー構成されているから、1軸あたり2箇所の変形量を計測している。従って $6 \times 2 = 12$ chの計測項目がある。フェンダー変形についても、E-1、E-2、E-3、W-1、W-2、W3のように名前をつける。

杭中のひずみについては、東側のドルフィンの北面2本の杭のうちの東側の1本に関して計測を行った。東西南北4方向について、それぞれ4つの深度についてひずみゲージを取り付けているが、アンプの数などの制約上、杭打ち工事の際に計測不能となった歪みゲージを除いた13個の歪みゲージの中から、南北方向のみについて8chの計測を行っている。ひずみゲージの設置深度は海底面から、2.1m、3.6m、5.1m、6.6mの位置になっている。

地震計については、東側ドルフィンの上部にゴム製マウントの上にとりつけるものとした。地震計の計測データには、ノイズが多く含まれていたため、アナログフィルターを用いて高周波数成分をカットした。カット周波数は様々な調整の後で、13Hzとした。

波高、風速についての計測も行っている。ただし、波高に関してはメガフロート情報基地浮体の周辺部に取り付けた相対水位計を用いている。従って、浮体が上下動する影響や、浮体からの反射波の影響が含まれていることに留意する必要がある。図-13には相対水位計の取り付け場所について示している。

表-2 主要な計測項目概略

計測項目	点数	備考(実施機関)
ドルフィン上加速度	3 方向	港湾空港技術研究所
フェンダー荷重	12 箇所	港湾空港技術研究所
フェンダー変位	12 箇所	港湾空港技術研究所
ドルフィン杭中歪	8 箇所	港湾空港技術研究所
浮体上下方向加速度	12 箇所	海上技術安全研究所
水圧	13 箇所	海上技術安全研究所
相対水位	5 箇所	海上技術安全研究所
GPS(絶対位置)	2 箇所	海上技術安全研究所
浮体ひずみ	20 箇所	海上技術安全研究所
風	8 項目	海上技術安全研究所
温度・湿度	5 項目	海上技術安全研究所

表-3 (a) 係留に関連する計測項目詳細

計測項目	計測部位	計測チャンネル	略号
荷重計 (BL-100TE)	東側ドルフィン E1-1	CH33	E-y
	東側ドルフィン E1-2	CH34	
	東側ドルフィン E1-3	CH35	
	東側ドルフィン E2-1	CH36	E-x
	東側ドルフィン E2-2	CH37	
	東側ドルフィン E2-3	CH38	
	西側ドルフィン W1-1	CH39	W-y
	西側ドルフィン W1-2	CH40	
	西側ドルフィン W1-3	CH41	
	西側ドルフィン W2-1	CH42	W-x
	西側ドルフィン W2-2	CH43	
	西側ドルフィン W2-3	CH44	

表-3 (c) 係留に関連する計測項目詳細

計測項目	計測部位	計測チャンネル	略号
地震計 (SA-355-CTY)	東西方向 X	CH1	A-x
	南北方向 Y	CH2	A-y
	上下方向 Z	CH3	A-z

表-3 (b) 係留に関連する計測項目詳細

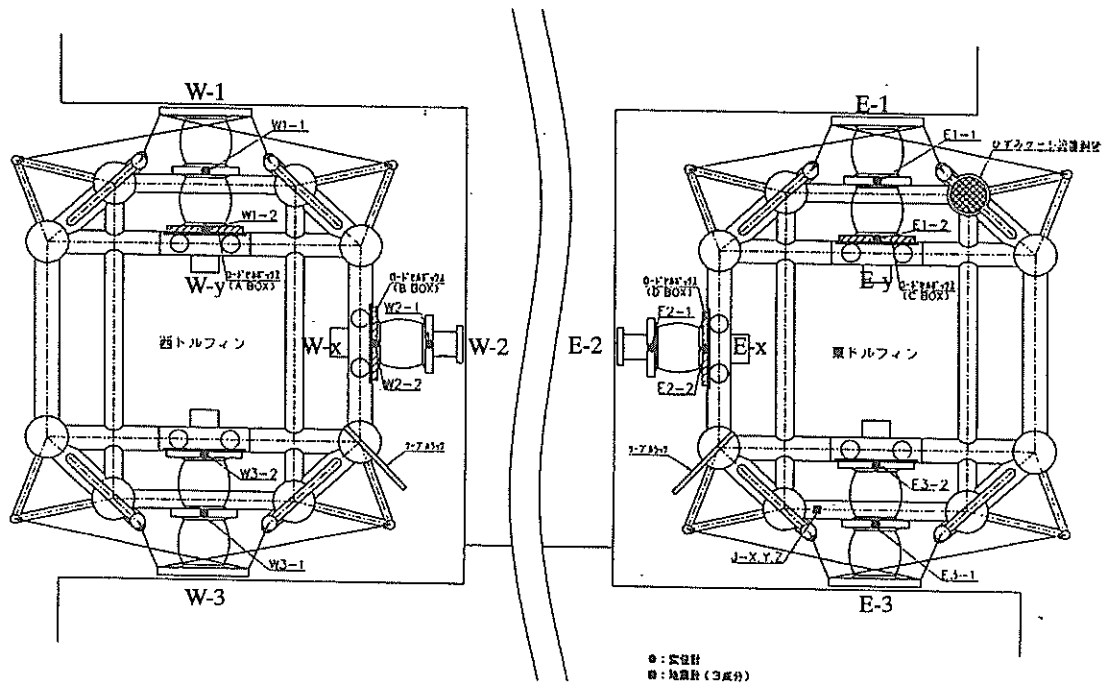
計測項目	計測部位	計測チャンネル	略号	
変位計 (BDT-A-1KS15007)	東側ドルフィン		E1	
	北側フェンダー 1 段 E1-1 (SUC1700H)	CH45		
	北側フェンダー 2 段 E1-2 (SUC1700H)	CH46	E2	
	西側フェンダー 1 段 E2-1 (SUC1600H)	CH47		
	西側フェンダー 2 段 E2-2 (ABF800H)	CH48	E3	
	南側フェンダー 1 段 E3-1 (SUC1700H)	CH49		
	南側フェンダー 2 段 E3-2 (SUC1700H)	CH50	W1	
	西側ドルフィン			
	北側フェンダー 1 段 W1-1 (SUC1700H)	CH51		
	北側フェンダー 2 段 W1-2 (SUC1700H)	CH52		
	西側フェンダー 1 段 W2-1 (SUC1600H)	CH53		W2
	西側フェンダー 2 段 W2-2 (ABF800H)	CH54		
	南側フェンダー 1 段 W3-1 (SUC1700H)	CH55	W3	
	南側フェンダー 2 段 W3-2 (SUC1700H)	CH56		

表-3 (d) 係留に関連する計測項目詳細

計測項目	計測部位	計測チャンネル	略号
杭ひずみ	杭南側 1 段 SG01	CH57	SG01
	杭南側 2 段 SG02	CH58	SG02
	杭南側 3 段 SG03	CH59	SG03
	杭南側 4 段 SG04	CH60	SG04
	杭北側 1 段 SG05	CH61	SG05
	杭北側 2 段 SG06	CH62	SG06
	杭北側 3 段 SG07	CH63	SG07
	杭北側 4 段 SG08	CH64	SG08

表-3 (e) 係留に関連する計測項目詳細

計測項目	計測部位	計測チャンネル	略号
水位計 (海技研)	浮体北側	RW01	RW01
		RW02	RW02
		RW03	RW03
風速計 (海技研)	平均風速 (10 分平均)	CH06	WS
	X, Y 方向瞬間風速	CH04	WX
		CH05	WY



ドルフィン上計器配置図

図-11 ドルフィン周りの計測点

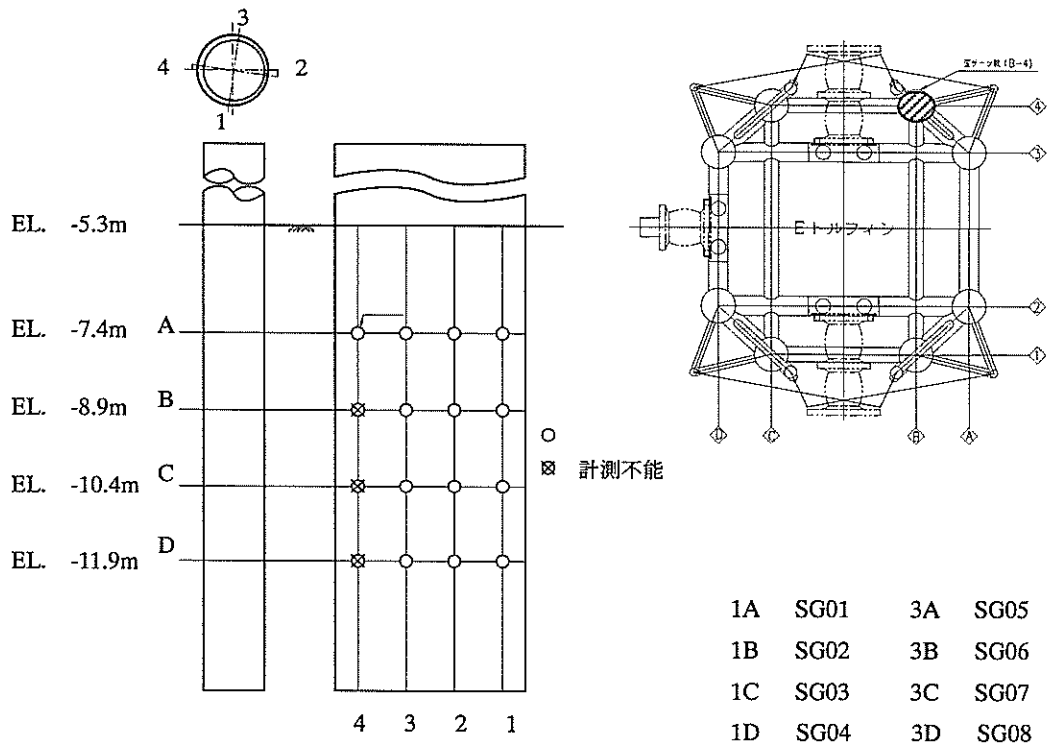


図-12 杭の歪みゲージ取り付け部

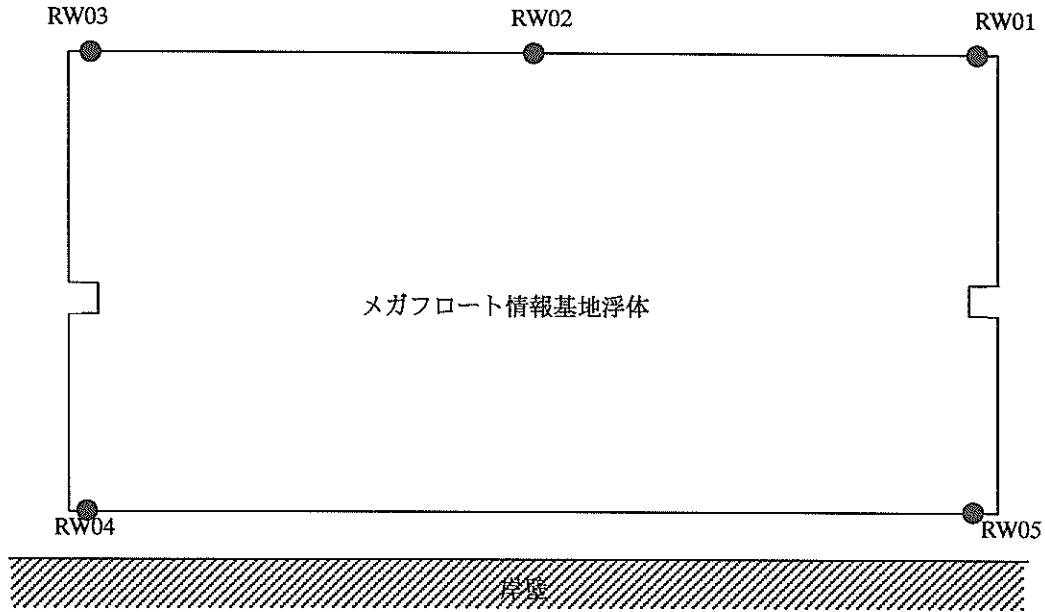


図-13 相対水位計計測位置

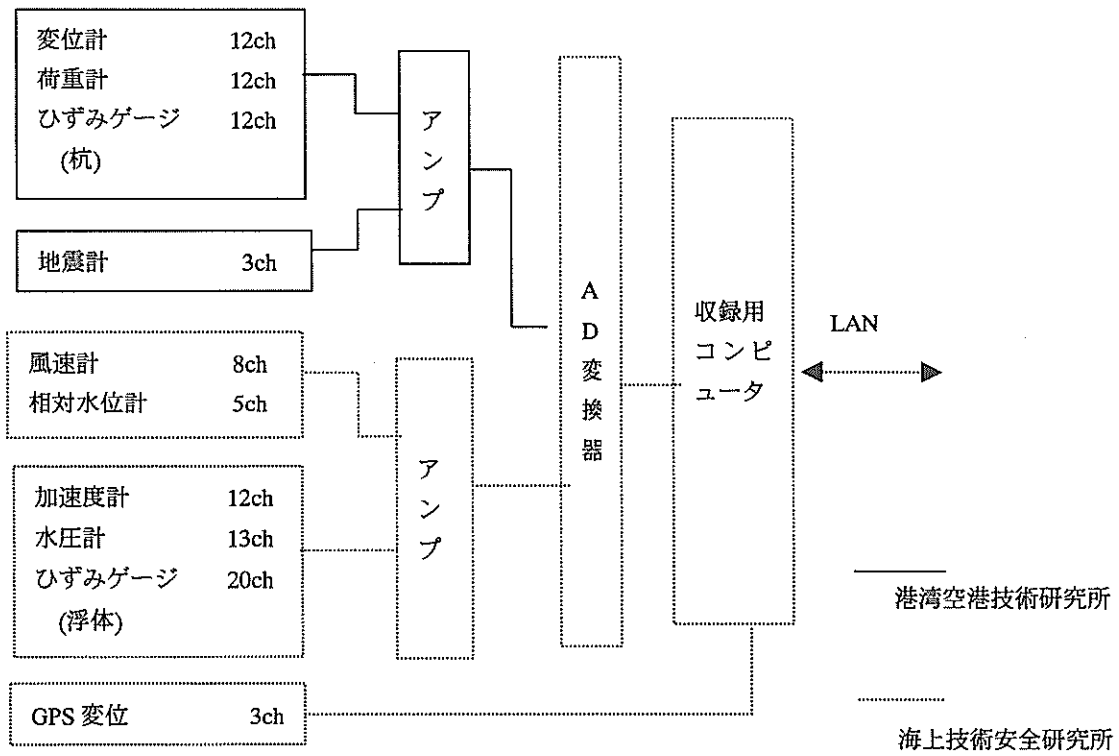


図-14 計測システム概略

3.2 計測方法および計測結果解析法

計測データはAD変換機を通してすべて計測用のパソコンに取り込まれ、一旦ハードディスクに保存される。ハードディスクに保存されたデータはLAN経由でほぼ定期的にノートパソコンに取り込む。図-14には計測システムの概略を示した。計測は海上技術安全研究所と協力して行っているものであり、計測システムのうちの収録用コンピュータなどを共通化し、互いの管理するデータを共有できるようにしている。港湾空港技術研究所では回収用のパソコンを用意し、LAN経由で計測データをほぼ定期的に取り込んだ。

計測データの取得方法には3モードが用意されている。図-15に概略を示す。すなわち、①定時観測モード、②異常時観測モード、③地震時観測モードである。定時観測モードについては毎時ゼロ分を起点として、5Hzで全チャンネルについて30分間の記録を行う。計測されたデータは計測システムの内部で一定時間メモリーにストックされている。異常時観測モードは波高、風速などについて閾値を予め設定しておき、計測が閾値を越え、総合的に異常と判断される場合に（トリガー）、異常と判断された時刻からメモリーにストックされているデータを含めて5Hzで3時間に渡って記録を行う。地震時観測モードについては、ドルフィン上の加速度計である閾値を超えた場合に50Hzで計測を数分間行う。これらデータ取得方法は独立なもので、例えば異常時観測時に地震が発生した場合でも、両者はそれぞれ独立に計測が行われる。

本実証実験においては長期間に継続的に計測を行う。記録されるデータ量は非常に膨大になるので、すべてのデータを参照することは解析の方法として効率的ではない。例えば定時観測モードで取得されるデータだけで、1回の計測あたりのデータ量は9MBになる。そこで、①定時観測モードからトレンドデータを作成し、トレンドデータを見ることで異常時をほぼ特定することができるものと考えた。トレンドデータとは定時観測モードで取得されたデータについて最大値、最小値、平均値、有義値を解析して記録したものであり、観測期間に渡る海象や応答の移り変わりを把握するのに適している。

しかしながらトレンドデータを参照しただけでは生じている現象を把握できないので、どのような応答現象が生じていたかを把握するために、計測されたデータを直接的に詳細に解析して調べる。上記トレンドデータから、顕著な現象が生じた時刻をほぼ特定すると考えられる。特定された時刻近傍において異常時観測モードで計測が行われていれば、この異常時観測モードによる計測結果を詳細な解析対象とする。異常時観測モードはある場所

における代表的な波高や圧力などから異常を判断して計測をスタートさせることになっているので、必ずしもすべての“顕著な現象”が把握されるわけではない。そこで、異常時観測モードによる計測が行われていなければ、最も近い定時観測データを用いてこれを代替させる。係留系の応答が顕著と判断される現象のうちの数割程度は異常時観測では記録されていなかった。

詳細な解析においては、時系列データを直接参照し、また、時系列データを解析して得られる、波のスペクトル、風速のスペクトル、応答スペクトルなどを調べることで多角的に異常時に生じた応答の解析を行う。

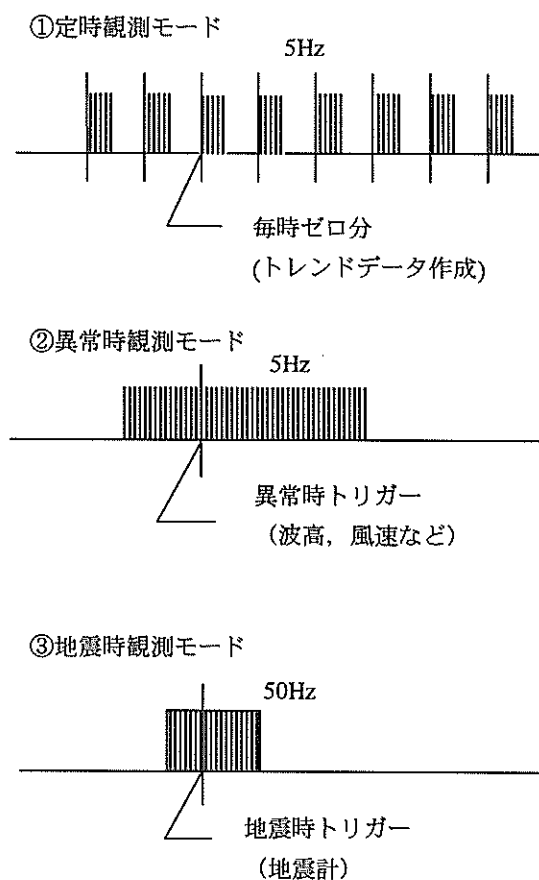
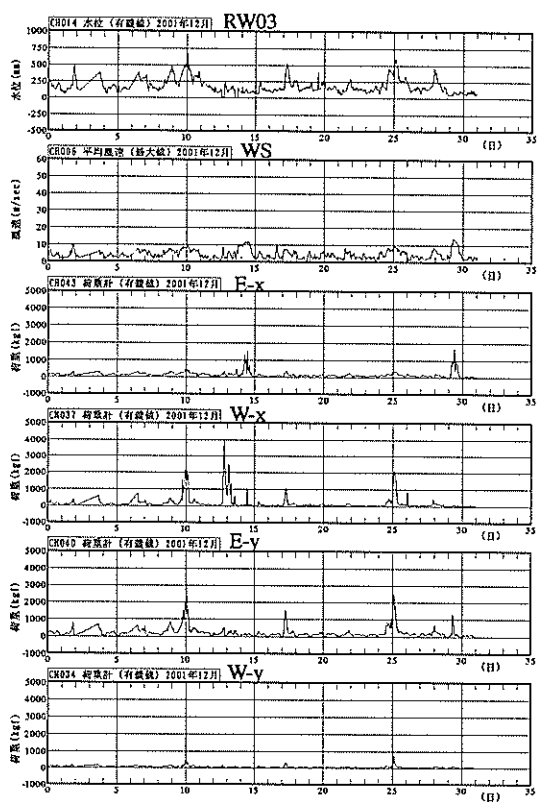
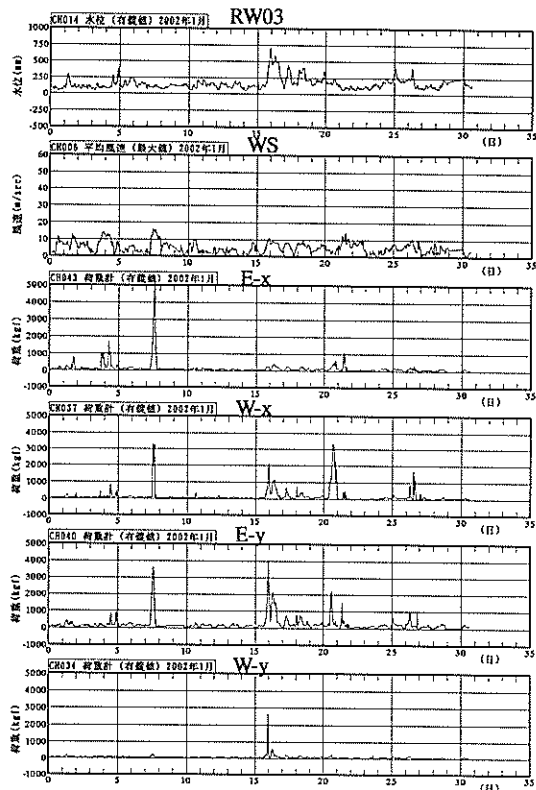


図-15 観測モード

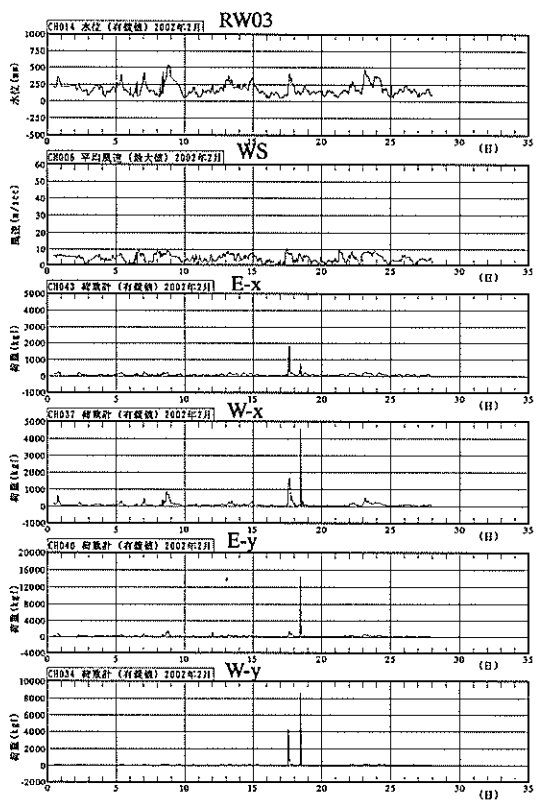
ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性



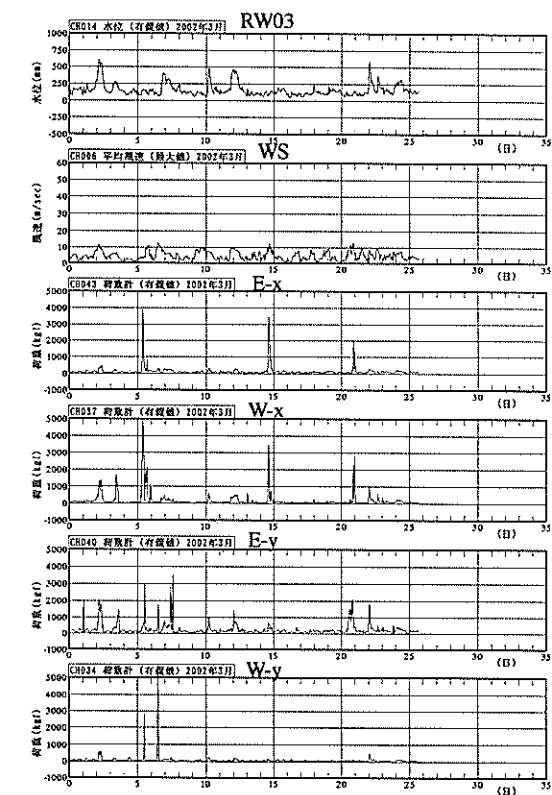
(a) 2001年12月



(b) 2002年1月



(c) 2002年2月



(d) 2002年3月

図-16 トレンドデータ

3.3 計測結果の概要

図-16に12月から3月の風速および波浪（相対水位）、各軸のフェンダー作用荷重についてのトレンドデータのグラフを示す。グラフ横軸は日付を表しており、日にち毎に目盛り線が入れられている。風速については平均風速の最大値を、波浪については有義値を、荷重については有義値を、それぞれ縦軸にとっている。波浪はメガフロート前面に取り付けられた相対水位計で計測された値を水面変動とみなすものであり、この時にメガフロートからの波の反射などの影響が含まれていることや、メガフロート自身が動揺していることから計測された数値は厳密な意味での水面変動ではなく、あくまでも浮体との相対的な変位であることに注意する必要がある。

まず、自然環境条件である風速および波浪の状況を概観する。トレンドデータのグラフを見ると、風速が大きいつきには波浪も大きくなる傾向があることがわかる。観測期間にわたる最大の風は1月8日に発生しており、最大値で17m/s程度である。また、波浪（相対水位）の有義値は1月16日から1月17日にかけての0.7mが最大である。

風速および波高に関して大きなもの順に5番目まで並べたものが、表-4である。この表から、厳しい海象は12月から1月に集中していたことがわかる。メガフロート情報基地の設置された港湾域の形状から考えて、もっとも波浪の発達する風向きは北あるいは北東であると考えられる。そこで、北風の多い12月あるいは1月に厳しい海象が集中して観測されたものと説明される。また、2001年度の冬季はいわゆる暖冬であり、2月あるいは3月には冬の天候が少なくなり、北あるいは北東からの風や波浪が厳しくなる状況が少なくなったものと思われる。気象・海象条件が全般的に穏やかなのは、実証実験期間が4ヶ月間と短く、しかも台風の時期を外れているためであると思われる。

表-5にはトレンドデータ解析から得られた、荷重計が極値を取る時の日付および、極値を示す荷重計の部位を示した。表-5あるいは図-16を見比べると、係留系の応答が大きくなっている日付と気象・海象条件が厳しくなる日付がほぼ一致していることがわかる。

以降の詳細な解析対象として、ハイブリッド型フェンダーの応答値が大きくなるケースを中心に応答の大きな10ケース分を選択した。表-5には解析ケースとして①～⑩までの記号が付されている。

なお、2001年12月の初めの1週間程度は荷重計などをまだ調整していた期間であること、2002年2月19日およびその前日は海上技術安全研究所における加振実験の当日とその準備日であること、3月5日前後は海上技術安全研究

所における自由動揺実験日およびその準備期間であることから、これらの区間については、詳細な解析の選定の対象からは除外した。

表-4 気象及び海象の厳しい日時

	日時	風速あるいは波高
風速 (平均風速の最大値)	2001/12/15 13:30	11.9m/s
	2001/12/30 06:50	14.7m/s
	2002/01/04 22:00	14.1m/s
	2002/01/08 13:20	16.1m/s
	2002/01/22 12:30	14.3m/s
波高 (有義値)	2001/12/10 23:00	0.6m
	2001/12/18 07:00	0.5m
	2001/12/26 03:00	0.6m
	2002 01/16 23:00	0.7m
	2002 03/03 04:00	0.6m

表-5 極値を示す荷重計と設置部位

年/月/日	極値を示す荷重計				解析ケース	備考
	W-x	E-y	W-y	E-y		
01/12/02*						波高大
01/12/10						波高大
01/12/13	E-x	W-x	E-y		①	
01/12/15	E-x		E-y		②	風速大
01/12/17		W-x	E-y	W-y		波高大
01/12/26		W-x	E-y	W-y	③	波高大
01/12/29		W-x	E-y			波高大
01/12/30	E-x		E-y		④	風速大
02/01/08	E-x	W-x	E-y		⑤	風速大
02/01/16		W-x	E-y	W-y	⑥	波高大 風速大
02/01/17		W-x	E-y			風速大
02/01/18		W-x	E-y			波高大
02/01/19			E-y			波高大
02/01/21		W-x	E-y		⑦	
02/01/27		W-x	E-y			波高大
02/02/09		W-x	E-y		⑧	波高大
02/02/18**	E-x	W-x	E-y	W-y		波高大
02/02/19**	E-x	W-x	E-y	W-y		
02/03/03	E-x		E-y	W-y		波高大
02/03/06***	E-x	W-x	E-y	W-y		
02/03/13	E-x	W-x	E-y			波高大
02/03/15	E-x	W-x	E-y		⑨	
02/03/21	E-x	W-x	E-y	W-y	⑩	風速大

*荷重計調整期間

**海上技術安全研究所加振実験

***海上技術安全研究所自由動揺実験

3.4 計測結果の詳細解析

表-5中に示された解析対象ケースについて、詳細に解析を行った。

表-6にはケース①～⑩までの場合について、フェンダー作用荷重の最大値および有義値を示した。今回の実証実験の計測期間中に発生した最大のフェンダー荷重値は310kNであり、東側ドルフィン部のハイブリッド型フェンダー部で生じている。また、東側ドルフィン部の北側重ねフェンダー部には最大で300kN程度のフェンダー荷重が生じている。全般的に東側ドルフィン部の北側重ねフェンダー(E-y)および西側ドルフィン部のハイブリッド型フェンダー部(W-x)に大きな荷重が発生していることがわかる。

表-7にはケース①～⑩までの場合について、フェンダー変形の最大値と有義値を示した。今回の実証観測期間中に発生したハイブリッド型フェンダー部の最大変位は400mm程度であり、東側ドルフィン部のハイブリッド型フェンダー部(E-2)で生じている。重ねフェンダーについては東側ドルフィン部の北側重ねフェンダー部(E-1)において、64mmが生じている。荷重と同様に全般的に東側ドルフィン部の北側重ねフェンダー(E-y)および西側ドルフィン部のハイブリッド型フェンダー部(W-x)に大きな荷重が発生していることがわかる。

表-6と表-7にはケース①～ケース⑩の中でもさらに応答の大きな場合について影で示した。これら影がつけられた部位は荷重最大値、有義値、変位最大値、有義値についてほぼ共通している。W-x, E-yあるいはW-2, E-1で大きな応答が生じる傾向があるのは、湾口が北から東に向いて開いており、北から東にかけての方向からの波が湾内に入射したケースが多かったからと考えられる。

東西方向の応答と南北方向の応答の量について比較した時には、東西方向の応答の量の方が大きくなっている。これは、ハイブリッド型フェンダーと重ねフェンダーの初期ばね剛性(変位しはじめの変位-反力特性)を比較したときに、ハイブリッド型フェンダーの方が小さくなっており、同じ大きさの荷重に対してはハイブリッド型フェンダーの方が変形しやすくなっているためと思われる。今回、メガフロート情報基地にハイブリッド型フェンダーを適用する際に、変位を減らすという機能性の面での性能の向上は見られにくいケースと思われる。なぜ今回のメガフロート情報基地に対してハイブリッド型フェンダーが変位を減らすという意味で有効ではなかったかについては第4章において考察を行う。

有義値で見た時に、荷重については全般的に南北方向(E-y)で大きい傾向が見られる。これは浮体の設置方向に

よっているものと考えられる。例えば、南北方向の風抗力はメガフロート情報基地の南北方向への投影面積に比例し、東西方向の風抗力は同じく東西方向の投影面積に比例する量と考えられる。メガフロート情報基地の設置方向から考えて、投影面積は南北方向の方が大きいから、風速が東西方向と南北方向で等しい場合には、南北方向の風荷重の方が大きい。同様のことが波漂流力についてもいえる。これらのことから総合的に南北方向の荷重の方が大きくなる傾向が表れると推定される。

各ケースの最大値と有義値の関係を荷重については図-17に、変位に関しては図-18に示している。荷重の計測値が比較的大きい場合の最大値は、有義値に対して、数倍程度である。計測値が比較的小さい場合は5倍から10倍程度にも達している。一方で変位については、ほぼ全ケースについて最大値は有義値の2倍弱程度から数倍程度になっており、こちらはほぼ安定している。

図-17中の荷重計E-xのケース⑤の場合に際立って、最大値が大きくなっているのは、ハイブリッド型フェンダーのストッパーが作用し、固い方のフェンダーが作用して反力が大きくなったためと思われる。

また、図-19にはケース①～⑩についての東側ハイブリッド型フェンダーの変形量の最大値と荷重の最大値を示した。図中には圧縮試験機によって計測されたハイブリッド型フェンダーの特性曲線が重ねられている。これらの図から、実証実験期間中に所定のフェンダーの反力特性が得られていることがわかる。また、この図から、荷重が310kNとなっているケース⑤の場合にハイブリッド型フェンダーのストッパーが作用し、ハイブリッド型フェンダーとしての機能が現れていることがわかる。

図-20には東側ドルフィン部の北側重ねフェンダーについての変位の最大値と荷重の最大値の関係について示している。ここでも同様に圧縮試験機によって得られている重ねフェンダーの特性曲線を示している。フェンダーの変形量と荷重は特性曲線上に乗っており、実証期間中に所定の性能が得られていることがわかる。

これら二つの図から、ハイブリッド型フェンダーは定反力に対して最大で20パーセント程度の、重ねフェンダーは定反力に対して最大で15パーセント程度の反力が生じていたことがわかる。このように大きな応答が生じていないことは、観測期間中を通じて気象・海象条件は比較的穏やかだったことを裏付けている。

表-6 (a) 各フェンダー荷重の最大値

解析 ケース	E-x (kN)	E-y (kN)	W-x (kN)	W-y (kN)
①	98	188	186	35
②	70	118	24	6.6
③	25	209	141	108
④	110	132	74	8.9
⑤	310	188	181	97
⑥	0	301	166	167
⑦	60	129	76	4.2
⑧	6.8	129	55	54
⑨	144	181	128	90
⑩	36	97	64	75

表-7 (a) 各フェンダー変位の最大値

解析 ケース	E-2 (m)	E-1 (m)	W-2(m)	W-1(m)
①	0.31	0.04	0.35	0.02
②	0.29	0.03	0.16	0.01
③	0.00	0.05	0.26	0.03
④	0.28	0.04	0.14	0.01
⑤	0.40	0.05	0.22	0.03
⑥	0.00	0.06	0.24	0.04
⑦	0.26	0.04	—	0.03
⑧	0.00	0.04	0.12	0.02
⑨	0.31	0.04	0.28	0.03
⑩	0.17	0.04	0.22	0.03

表-6 (b) 各フェンダー荷重の有義値

解析 ケース	E-x (kN)	E-y (kN)	W-x (kN)	W-y (kN)
①	9.5	17	120	3.6
②	7.7	39	1.5	1.8
③	11	79	63	26
④	32	29	3.5	31
⑤	151	107	105	8.7
⑥	0	129	67	84
⑦	11	8.7	58	15
⑧	9.6	28	152	38
⑨	111	45	107	23
⑩	8.3	18	90	22

表-7 (b) 各フェンダー変位の有義値

解析 ケース	E-2 (m)	E-1 (m)	W-2(m)	W-1(m)
①	0.23	0.02	0.30	0.00
②	0.22	0.02	0.15	0.00
③	0.00	0.03	0.22	0.02
④	0.20	0.02	0.12	0.00
⑤	0.33	0.03	0.10	0.01
⑥	0.00	0.03	0.09	0.02
⑦	0.22	0.03	—	0.01
⑧	0.00	0.02	0.03	0.01
⑨	0.24	0.03	0.22	0.01
⑩	0.14	0.03	0.18	0.01

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

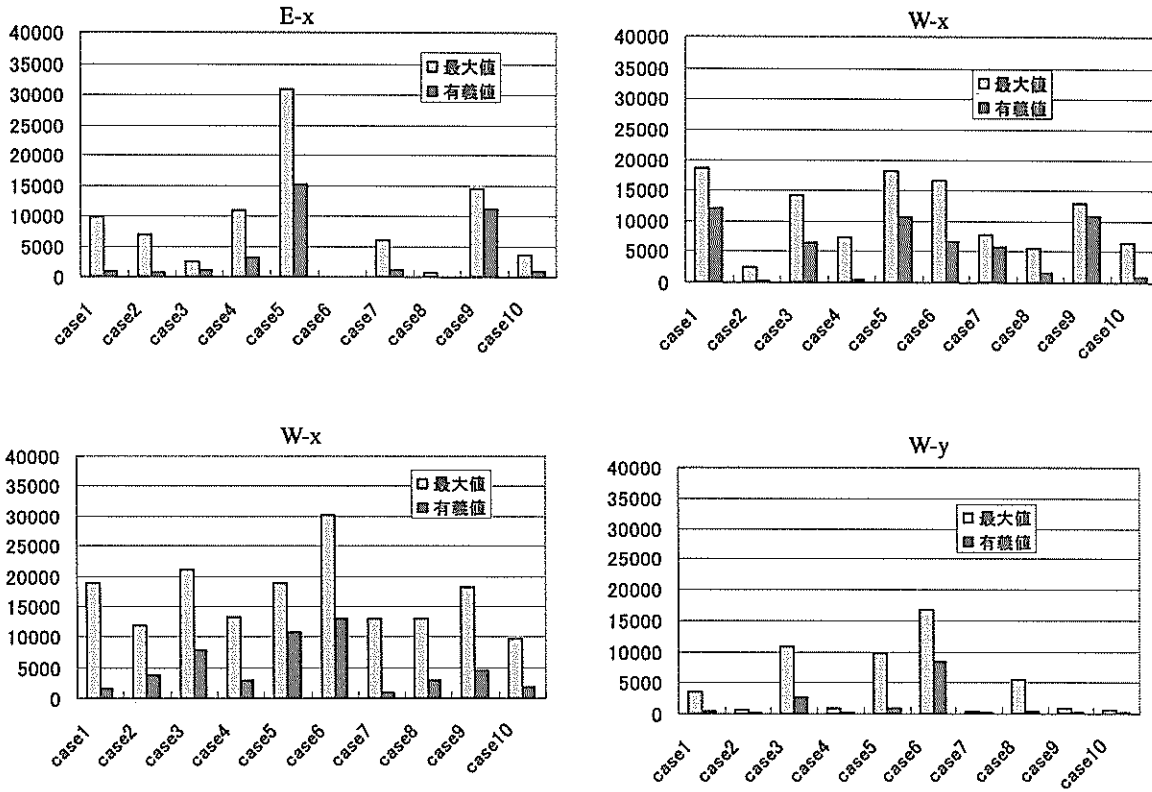


図-17 フェンダー荷重の最大値と有義値

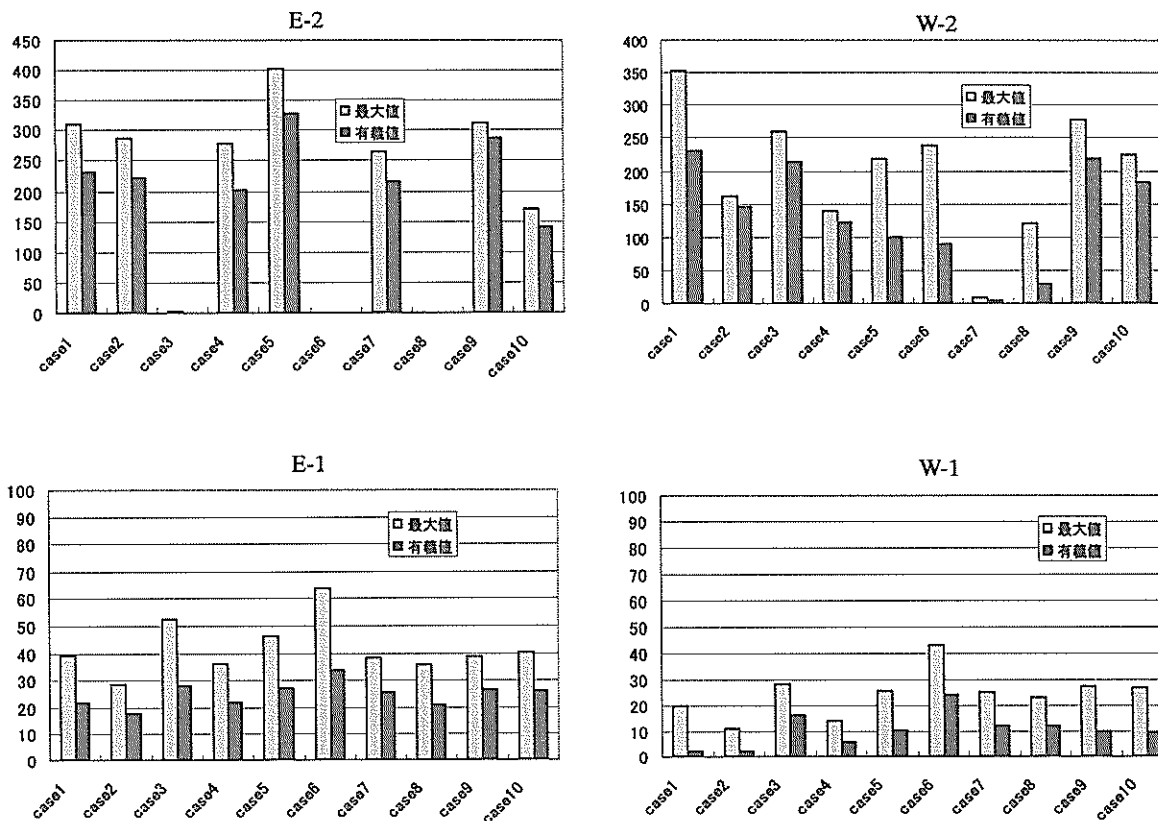


図-18 フェンダー変形量の最大値と有義値

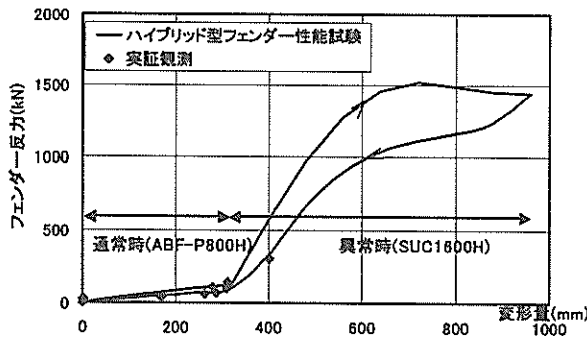


図-19 ハイブリッド型フェンダー部変形量最大値と荷重最大値

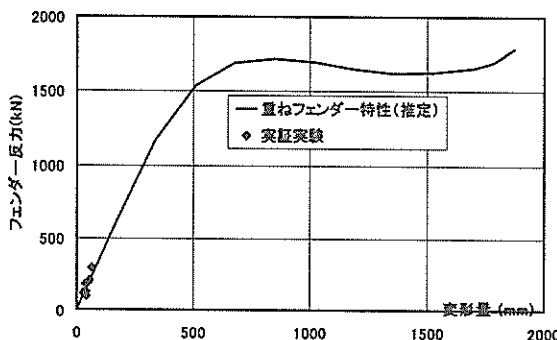


図-20 重ねフェンダー部変形量最大値と荷重最大値

また、ハイブリッド型フェンダーの変形量が大きくなったケース⑤の場合の、フェンダー変形量とフェンダー荷重の履歴を図-21に示す。変形は最大で0.4mを越えていることがわかり、このとき荷重は310kNにも達している。ハイブリッド型フェンダーのうちの先端のABF-P800Hの変形のみで動揺を吸収できず、セル型フェンダーSUC1600Hの変形によって動揺が抑えられていたことがわかる。

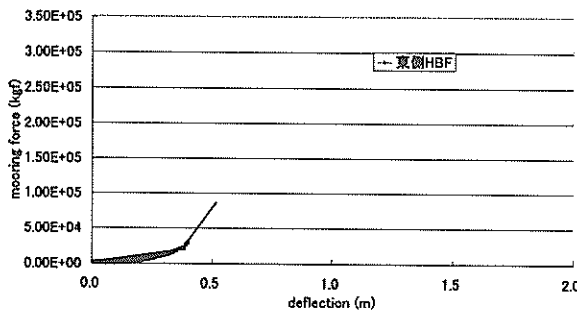


図-21 ハイブリッド型フェンダー変形-荷重履歴 (ケース⑤)

次に、各解析ケース毎に生じていた現象を把握するために、やや仔細に実験解析を行っていく。ここでは比較的応答が大きかった、解析ケース①、解析ケース②、解析ケース④、解析ケース⑤、解析ケース⑥、解析ケース⑨、地震時のケースを選んだ。主として、各解析ケースの時系列データとスペクトルを参照していくものとする。ここで、スペクトルとはフーリエ係数スペクトルを指すものとする。

(1) 解析ケース①

図-22にはケース①の場合の波高（相対水位）、風速、各軸の荷重値、変位計の計測値の時系列を示す。図中にはデータ取得された三時間のうち、最後の30分について示している。

東西の応答ではE-xあるいはE-yの応答が交互に生じており、そのうちでも主として東側フェンダーE-xが応答していることがわかる。変位(E-2, W-2)もこの変動を追従していることがわかる。南側の重ねフェンダー(E-3, W-3)に応答はほとんど生じていなかったためここでは示さない。また、西の北側重ねフェンダー(W-1)にも応答はほとんど生じていない。浮体は全般に岸壁側に押し付けられ、主に東側の重ねフェンダー(E-1, あるいはE-y)が荷重を支え、東西方向に関しては東側に押し付けられつつ、東西2箇所フェンダーの間を動揺していたということがわかる。

東西方向のフェンダー荷重および変位は、時刻10500秒付近で応答が大きくなっている。風速も10000秒を過ぎるころから徐々に大きくなっている。風速のピークは9500秒付近、9800秒付近でピークが見られるが、これらピークが生じる時刻付近で東西あるいは南北のフェンダーの応答が大きくなっていることがわかり、風と応答の相関が伺われる。このように、東西ハイブリッド型フェンダーの変位E-2, W-2の包絡線、荷重E-x, W-xの包絡線のピーク、あるいは東西北側重ねフェンダーの変位E-1, W-1の包絡線、荷重E-y, W-yの包絡線のピークは風速のピーク、波浪の包絡線のピークがほぼ一致している様子が見られ、主として風によって、さらに波浪と共に複合的に応答が大きくなっているものと思われる。

図-23には波高（相対水位）、風速、フェンダー荷重値、杭歪のスペクトル（フーリエ係数スペクトル）を示す。波浪のスペクトルは3秒付近と10秒付近でピークが見られ、それぞれ風浪の成分とうねりの成分である。ハイブリッド型フェンダーの荷重のスペクトルは70秒程度にピークを有しており、ハイブリッド型フェンダーの固有周期にあたっているものと考えられる。重ねフェンダーの

スペクトルでは明確なピークが認められず、広い周波数域に渡って有効なエネルギーを有している。ケース①の場合の鋼管杭歪の応答量は小さいものの、周期70秒付近にピークが見られるなど、フェンダーからの荷重によって歪応答が生じていることが推定される。短周期域(2秒あるいは3秒)付近のピークは波浪荷重によりドルフィンが変形した結果、杭歪として現れたものと考えられる。

(2) 解析ケース②

図-24には波浪、風、荷重および変位についてはじめの1800秒分を取り出した時系列を示す。

東西の応答に関しては、主として東側のハイブリッド型フェンダー(E-x)に荷重が生じており、西側のハイブリッド型フェンダーにおける応答はほとんど見られない。変位E-2、あるいは荷重E-xに関してはほぼ周期的に応答が生じている。その周期はおよそ70秒程度であり、固有周期にあたっているものと思われる。南北方向への応答は全般的に小さいが、ケース①と同様に東側の北側重ねフェンダーで応答が目立つ。ケース②の場合には波浪は小さいが、風速は大きく、200秒前後の間隔でほぼ周期的に変動している。

応答が大きくなるのは400秒、700秒、1000秒付近であり、これら応答のピークと風速のピークはほぼ一致していることがわかる。このケースの場合には風荷重が大きくなった場合に、水平面内の応答も大きく生じていることが推定される。

図-25には波高(相対水位)、風速、各フェンダーでの荷重値、杭歪のスペクトル(フーリエ係数スペクトル)を示す。波浪は数秒から十数秒の間に有効な成分を有しており、8秒から9秒程度のところにうねりと思われるなだらかなピークが見られるものの、全般的に波浪の発達の度合いは小さい。ハイブリッド型フェンダーについての荷重および変位については、70秒程度にピークを有しており、係留系の固有周期にあたっているものと思われる。杭歪のスペクトルを見ると、周期10秒以下のところに小さなピークが見られ、また、60秒から70秒程度のところにもピークが見られる。周期10秒以下のところのピークはドルフィンに作用する波浪によって生じた応答であると考えられ、70秒程度のところの成分は浮体の水平動揺によってフェンダーを介して作用した荷重に対する応答であると考えられる。

(3) 解析ケース④

図-26にはケース④の場合の計測開始後3000秒から4800秒の1800秒間(30分間)の時系列を示す。

東西の応答に関しては、主として東側ハイブリッド型フェンダー(E-x)に荷重が生じている。西側のハイブリ

ッド型フェンダーにおける応答が見られるのは4400秒付近の東西方向の動揺が急激に大きくなった時刻付近のみであり、東側ドルフィン方向に偏った応答をしていることがわかる。南北方向への応答は全般的に小さく、ケース①と同様に東側の北側重ねフェンダーで応答が目立つ。

ケース④の場合には波浪は小さい一方で、風速は極めて大きく、風速は14m/sを超えている。風速がピークに達する時刻付近において、必ずしも応答が大きくなっているわけではないが、風によって応答が励起されていることが推定される。

図-27には波高(相対水位)、風速、各フェンダーでの荷重値、同じく歪変位、杭歪のスペクトル(フーリエ係数スペクトル)を示す。波浪は数秒から十数秒の間に有効な成分があり、ピーク周波数は4秒から5秒程度で、うねりの成分はほとんど見られない。荷重については、70秒程度にピークを有している。杭歪のスペクトルを見ると、周期10秒以下のところに小さなピークが見られ、また、60秒から70秒程度のところにもピークが見られる。周期10秒以下のところのピークはドルフィンに作用する波浪によって生じた応答であり、70秒程度のところの成分は浮体の水平動揺によってフェンダーを介して作用した荷重に対する応答であると考えられる。

(4) 解析ケース⑤

図-28にはケース⑤の場合の観測終了時刻に近い8000秒から9800秒までの1800秒間(30分間)の時系列を示す。

東西方向の動揺については、ケース⑤の場合にも主として東側ハイブリッド型フェンダーで応答が生じており(E-x, E-2)、西側ハイブリッド型フェンダーの応答量(W-x, W-2)は東側ハイブリッド型フェンダーの応答の半分以下である。南北方向については主として、東側の北側重ねフェンダー(E-y)に応答が生じておりケース④などと類似したケースである。なお、W-2に関して8600秒から8800秒付近で大きな応答が生じているように見受けられるが、これは計測機器の不調によるものである。

8200秒付近で東側ハイブリッド型フェンダーで大きな変位と荷重が生じている。8200秒における東側ハイブリッド型フェンダーの応答は東側ハイブリッド型フェンダーで観測された最大の応答であった。北側の重ねフェンダーに関しても大きな応答が生じている。

図-29には波高(相対水位)、風速、東側ドルフィンハイブリッド型フェンダーでの荷重値、同じく歪変位、杭歪のスペクトル(フーリエ係数スペクトル)を示す。波浪のスペクトルは数秒から十数秒の間に有効な成分を有しており、2秒付近とやや高い8秒から9秒付近に二つのピークが見られる。8秒から9秒の成分はうねり成分と考え

られ、このうねり成分によって応答が大きくなったものと考えられる。東側ハイブリッド型フェンダーに関する荷重 (E-x) や変位 (E-2) のスペクトルについてみると、他のケースと同様に周期70秒付近でピークが見られる。大きなフェンダー荷重に従って歪も大きくなっており、周期70秒付近にピークが見られる。

(5) 解析ケース⑥

図-30にはケース⑥の場合の計測開始後8000秒から1800秒分を取り出した時系列グラフを示す。

波浪の発達程度は他のケースに比べても大きく観測期間中最大の0.7mであった。風も10m/s程度と大きい。変位に関する図と荷重に関する図から、このケースの場合の特徴は東西の北側重ねフェンダーの変位 (E-1, W-1) あるいは荷重 (E-y, W-y) が大きくなっていることであり、観測期間中最大となっている。また、浮体がほぼ常に西側ドルフィンに押し付けられており西側のドルフィンのハイブリッド型フェンダー部についても観測期間中最大の応答量であった。その一方で、東側ハイブリッド型フェンダーの部分で応答がほとんど生じていない。

図-31には波高 (相対水位)、風速、東側ドルフィン SUC1700Hでの荷重値、同じく変位、杭歪のスペクトル (フーリエ係数スペクトル) を示す。波浪スペクトルに関しては4秒付近に極めて鋭い単一のピークが認められ、このケースについてはうねりの成分に相当する長周期の成分は見あたらない。このケースの場合には主として風浪によって応答が生じているものと考えられる。荷重および変位のスペクトルについても4秒付近にピークが見られ、他の場合とはやや異なった性質を示している。これは北側重ねフェンダーに押し付けられて、その平均的なつりあい周りに浮体が入射波周期で動揺しているためと思われる。歪のスペクトルについても、波スペクトルのピークとほぼ等しい4秒付近に際立ったピークが認められる。

(6) 解析ケース⑦

図-32にはケース⑦の場合の計測開始直後から1800秒分の計測値の時系列を示す。異常時観測モードによる計測になっておらず、定時観測モードによる取得データである。このケースの場合には南側の重ねフェンダーの応答量が比較的大きいのが特徴である。そこでケース⑨に関しては、変位応答E-3, W-3を併せて示している。E-3については最大で0.03m程度の変形量であった。

風は風速10m/s程度であり、波高は0.2m程度となっている。フェンダー変位・荷重に関する図から、東西方向へは応答がほぼ均等に生じていることがわかる。また、南北方向については、東側の北側重ねフェンダー (E-y, E-1) を中心に応答が生じており、西側の北側重ねフェンダ

ー (W-y, W-1) にはほとんど応答が生じてない。南側フェンダーについて見ると、東側E-3については応答が大きく生じているが、西側W-3については応答がほとんど生じていない。東側のドルフィン部については南北とも応答が大きく、西側のドルフィン部については南北とも応答が小さいから、西側ドルフィン部に近い場所を中心とする鉛直軸周りの回転運動が生じていることが推定される。

図-33には波高 (相対水位)、風速、東側ドルフィン SUC1700Hでの荷重値、杭歪のスペクトル (フーリエ係数スペクトル) を示す。波浪スペクトルに関しては2秒付近と10秒付近にピークが認められる。むしろ、10秒のうねりと思われる成分が大きく、その結果長周期の荷重に対して浮体の応答が大きくなっているものと思われる。荷重および変位については、70秒程度のところにピークが認められる。歪のスペクトルについても、70秒付近にピークが認められ、フェンダーからの荷重に対応したピークであると考えられる。

(7) 地震時のケース

図-34に東側ドルフィンの地震計で計測された地震波形の様子を示す。この加速度計は岸壁から沖側にかけての振動成分のものであり、最大値で15gal程度を示していることがわかる。当日の新聞によれば、この地震は8日午前4時7分ごろに発生した神奈川県西部深さ30kmを震源とするマグニチュード4.6のものであり、山梨県上野原町で震度5弱、神奈川県横浜市中央区で震度3と記述されている。

これらの図に示されているように、浮体上の鉛直方向加速度応答には若干の地震時応答の影響が認められるが、その程度は微小である。同じ図に示されているように、フェンダー応答としてはほとんど表れていないということと、仮にフェンダーから水平荷重が作用したとすれば上下方向の加速度の発生はほとんどないと考えられることから、海底地盤の上下方向振動によって発生した水圧が浮体に作用したために生じた加速度であると考えられる。また、杭中の歪にも地震時の加振の影響が認められるが、これは地盤から直接的に入力された結果生じたものと考えられる。

以上から、メガフロート情報基地は地震の影響をほとんど受けないことが確認されたといえるが、今回は地震の記録が他に計測されておらず、観測期間が非常に短いこともあって、地震時の応答についての実証は十分に行われたとは言い難い。今後、より長期に渡って観測が行われることが期待される。

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

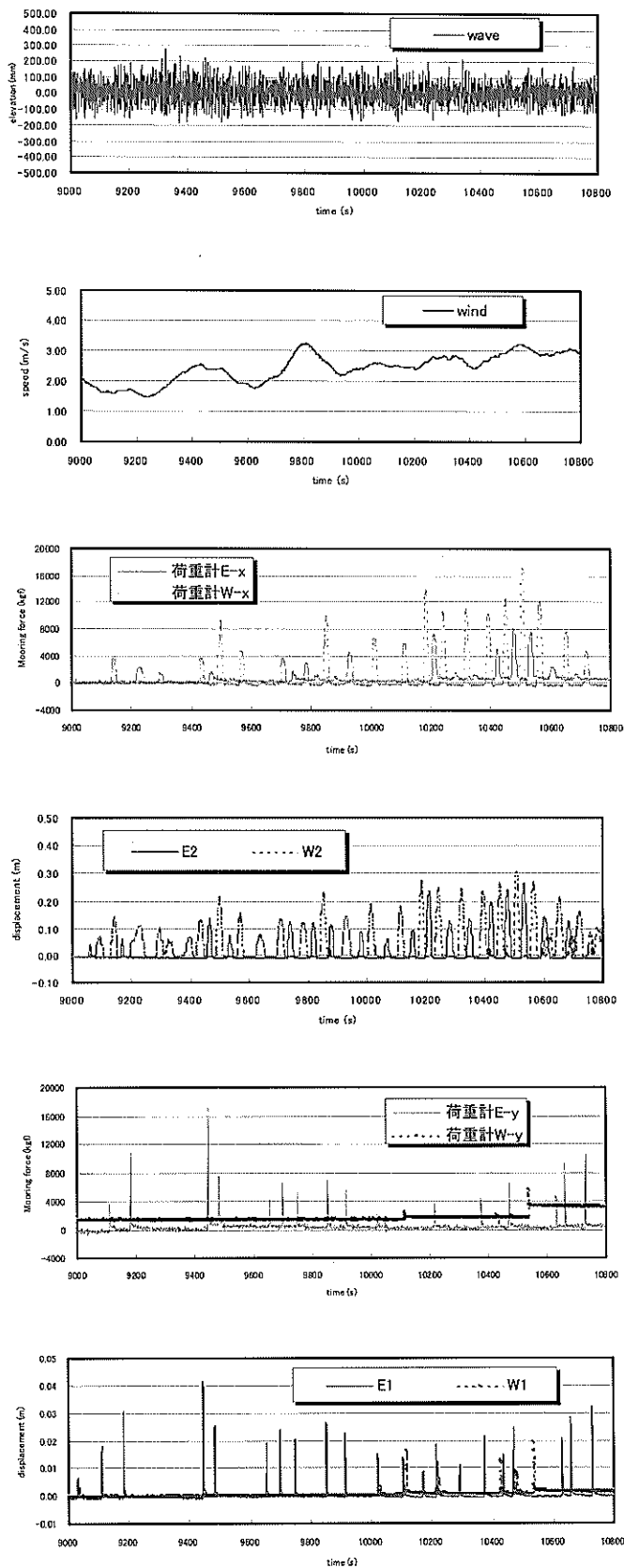


図-22 実験結果時系列 解析ケース①

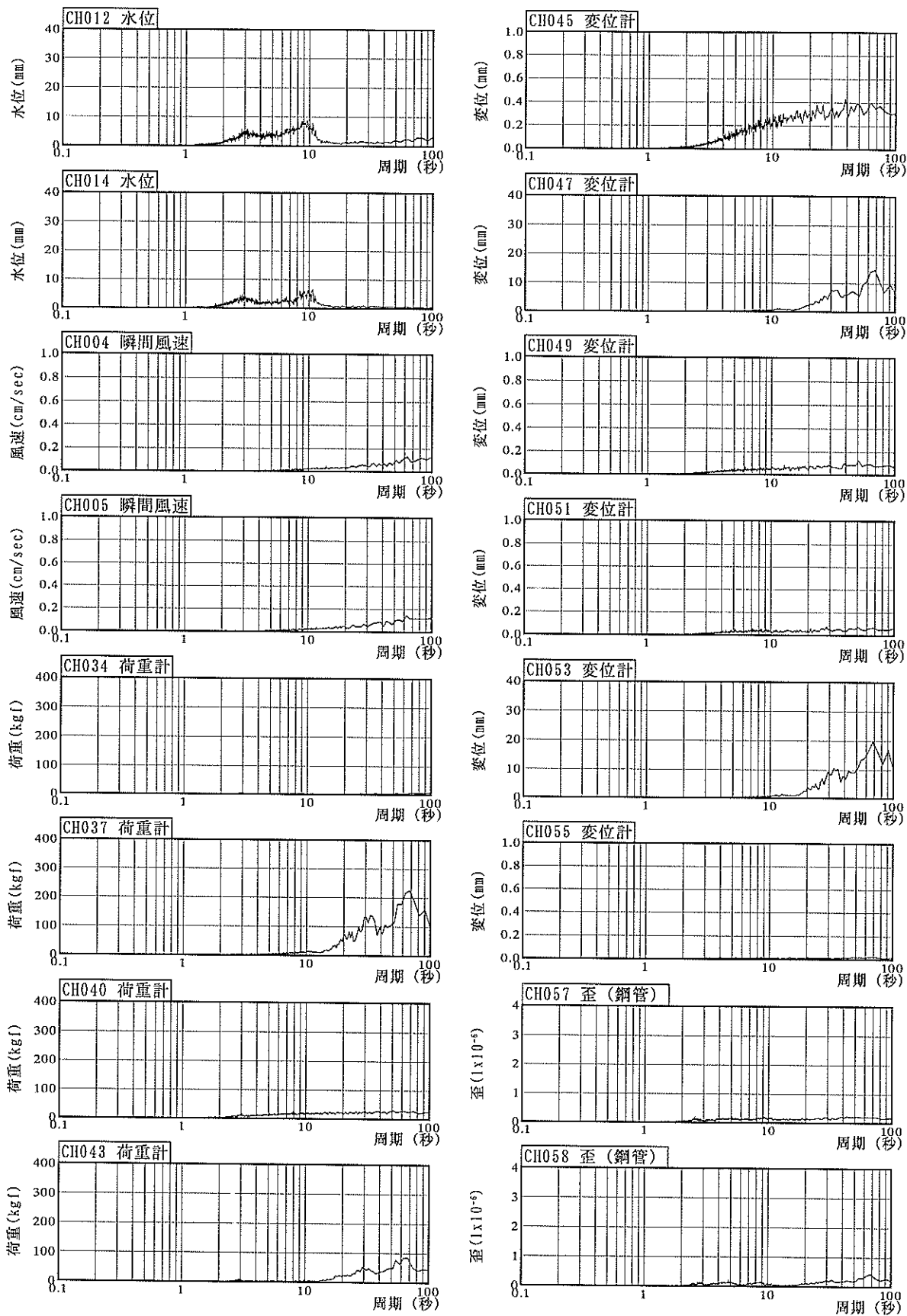


図-23 実験結果スペクトル 解析ケース①

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

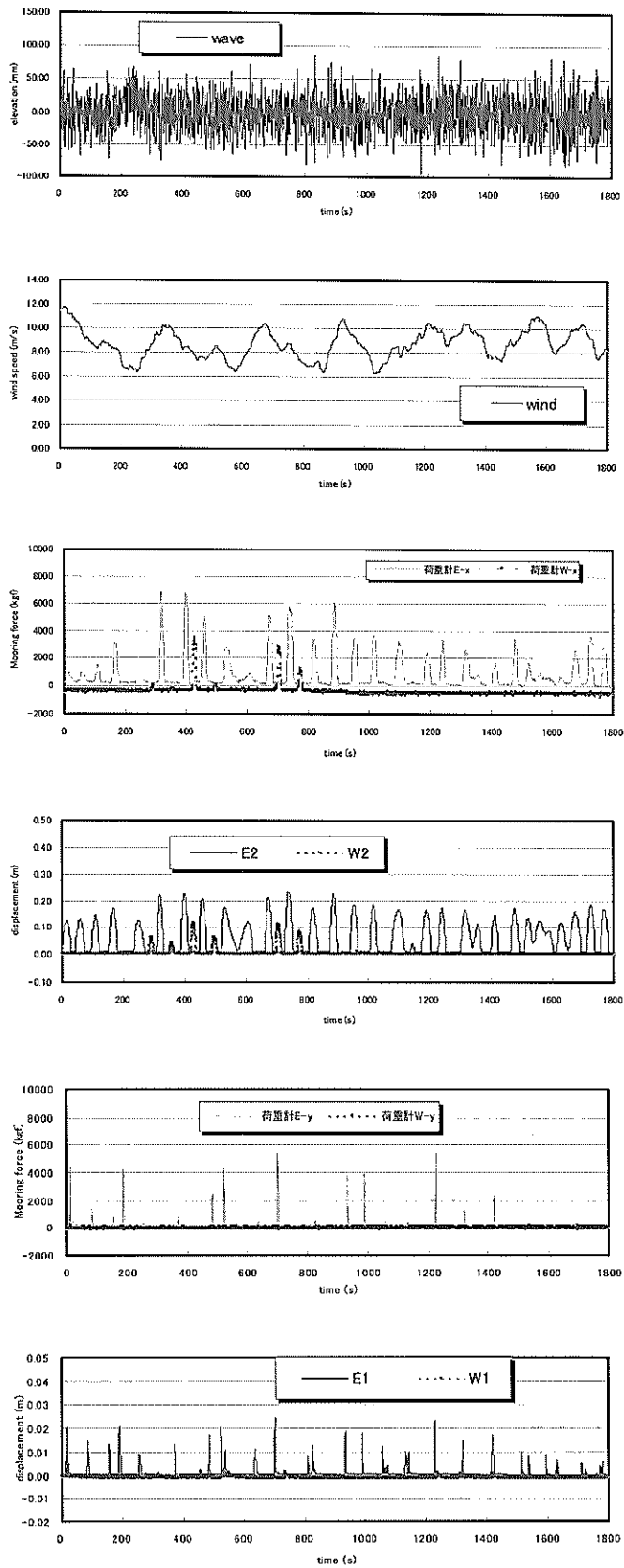


図-24 実験結果時系列 解析ケース②

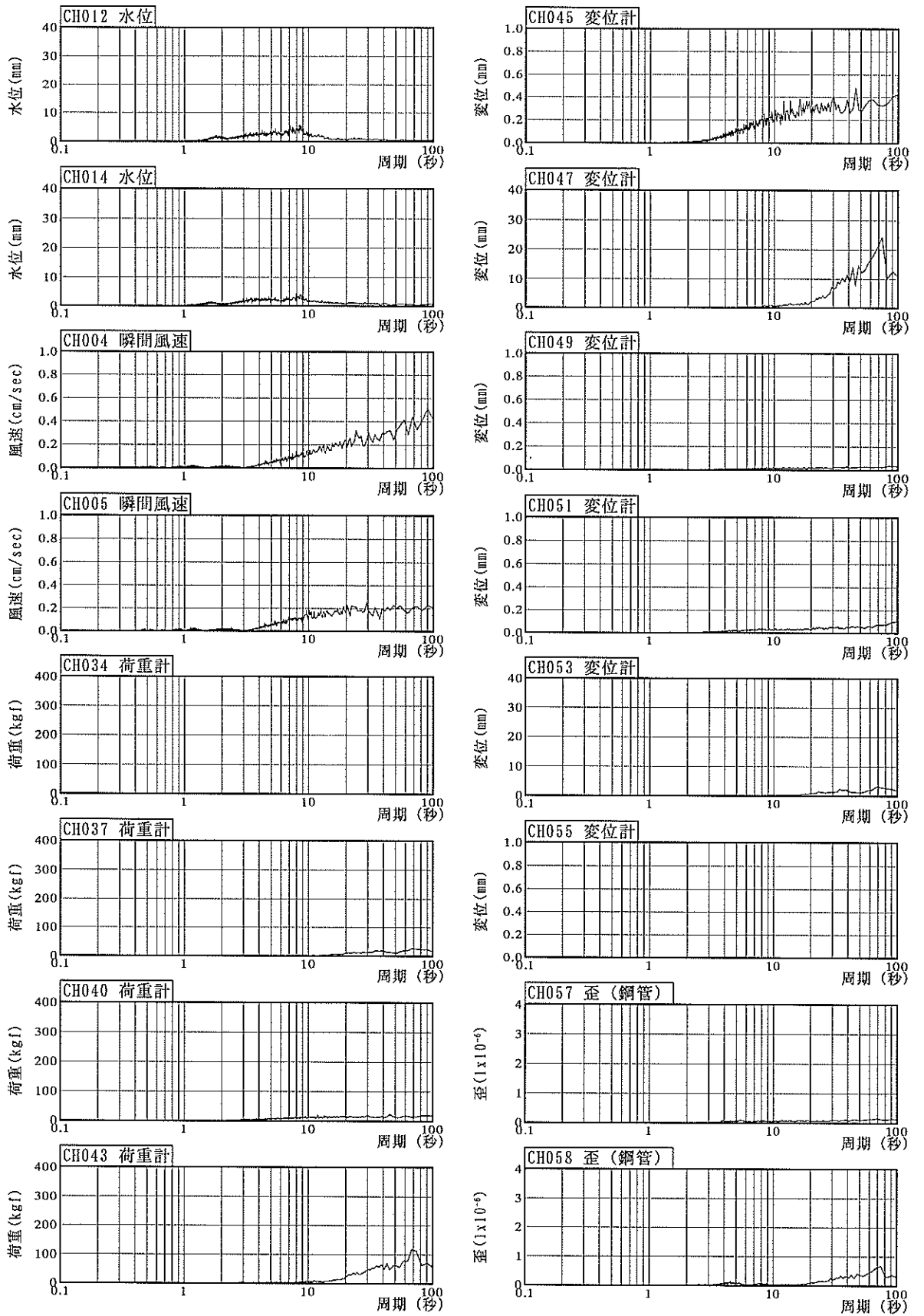


図-25 実験結果スペクトル 解析ケース②

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

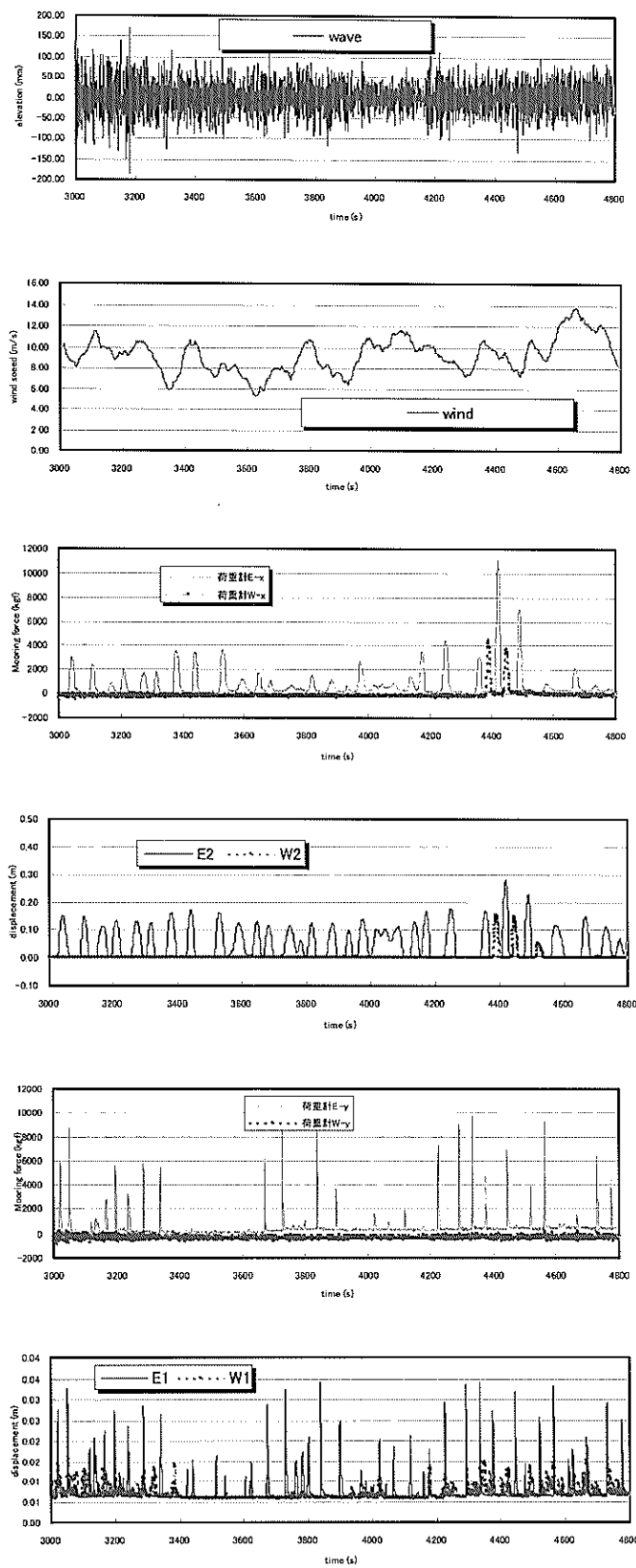


図-26 実験結果時系列 解析ケース④

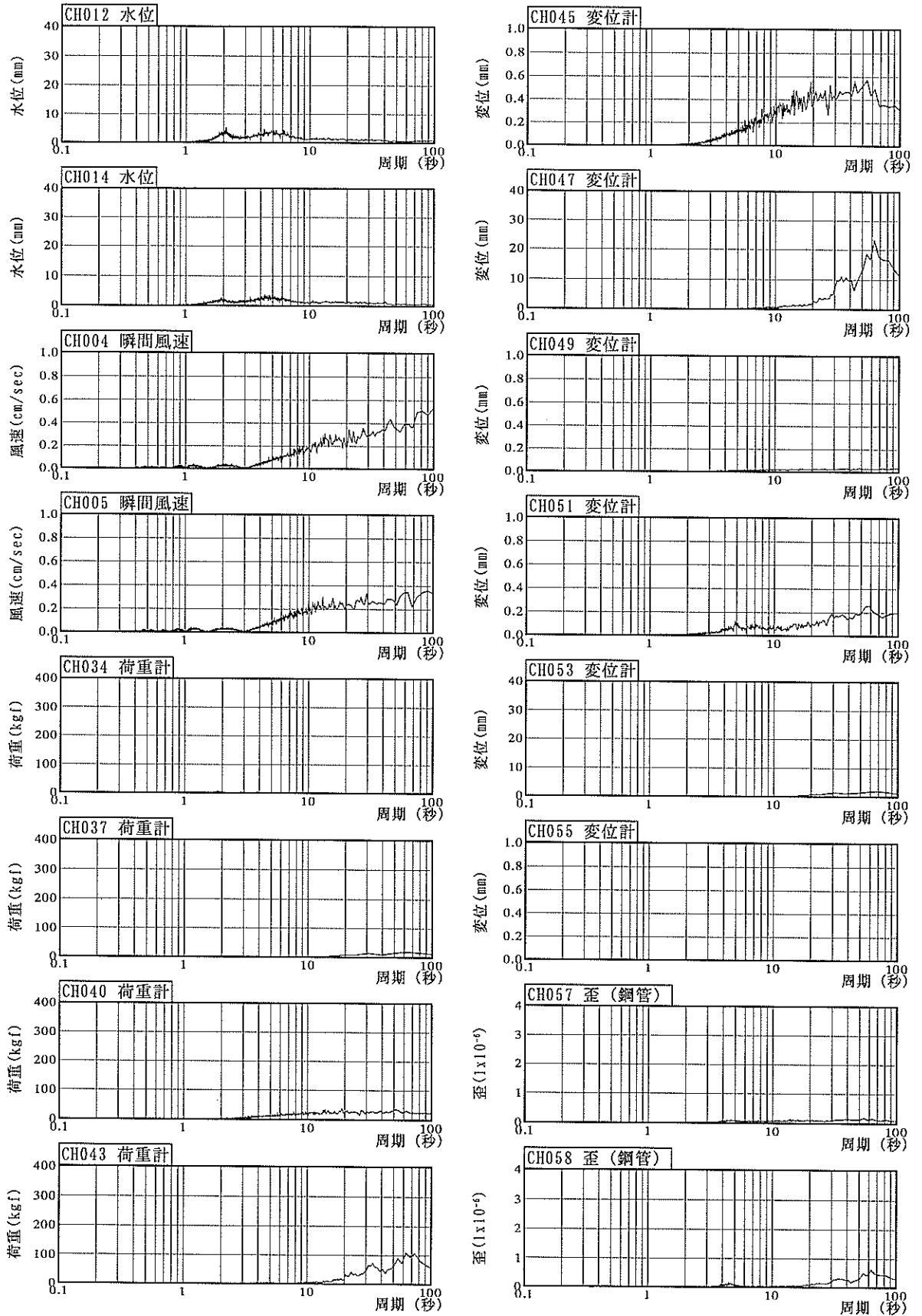


図-27 実験結果スペクトル 解析ケース④

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

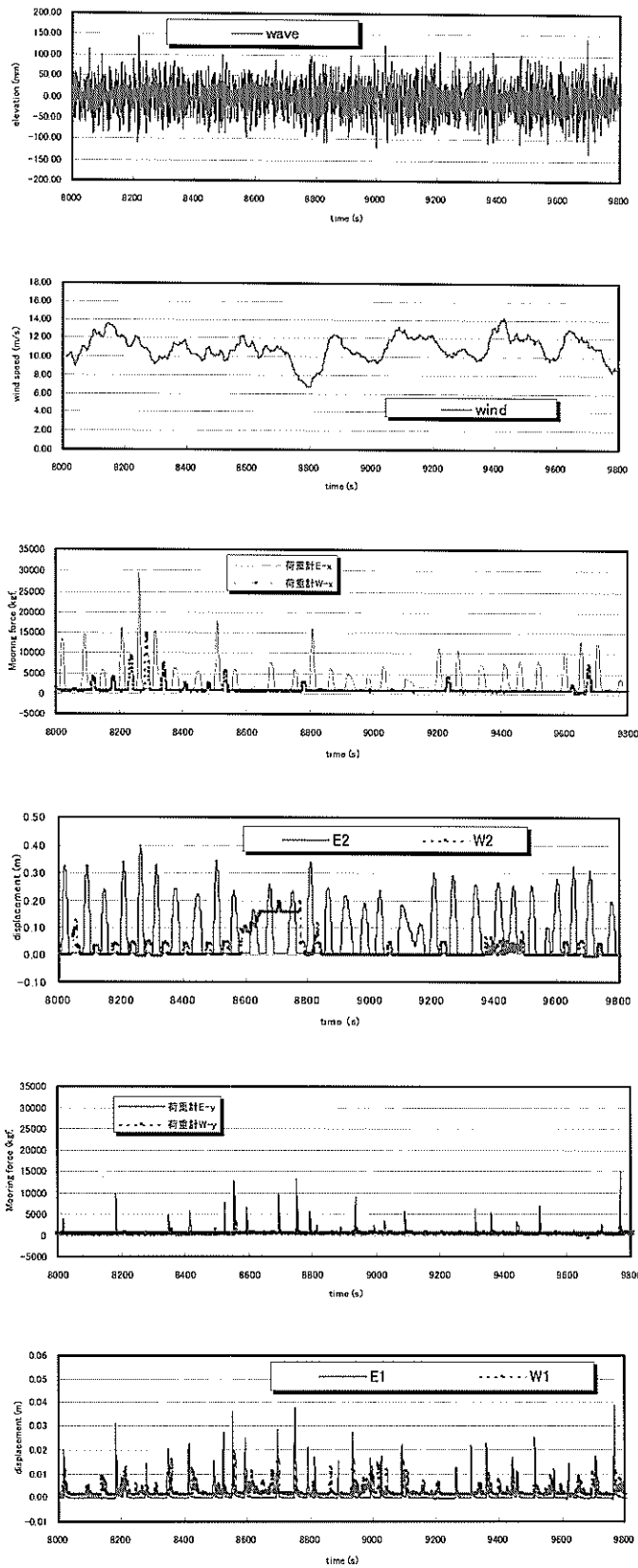


図-28 実験結果時系列 解析ケース⑤

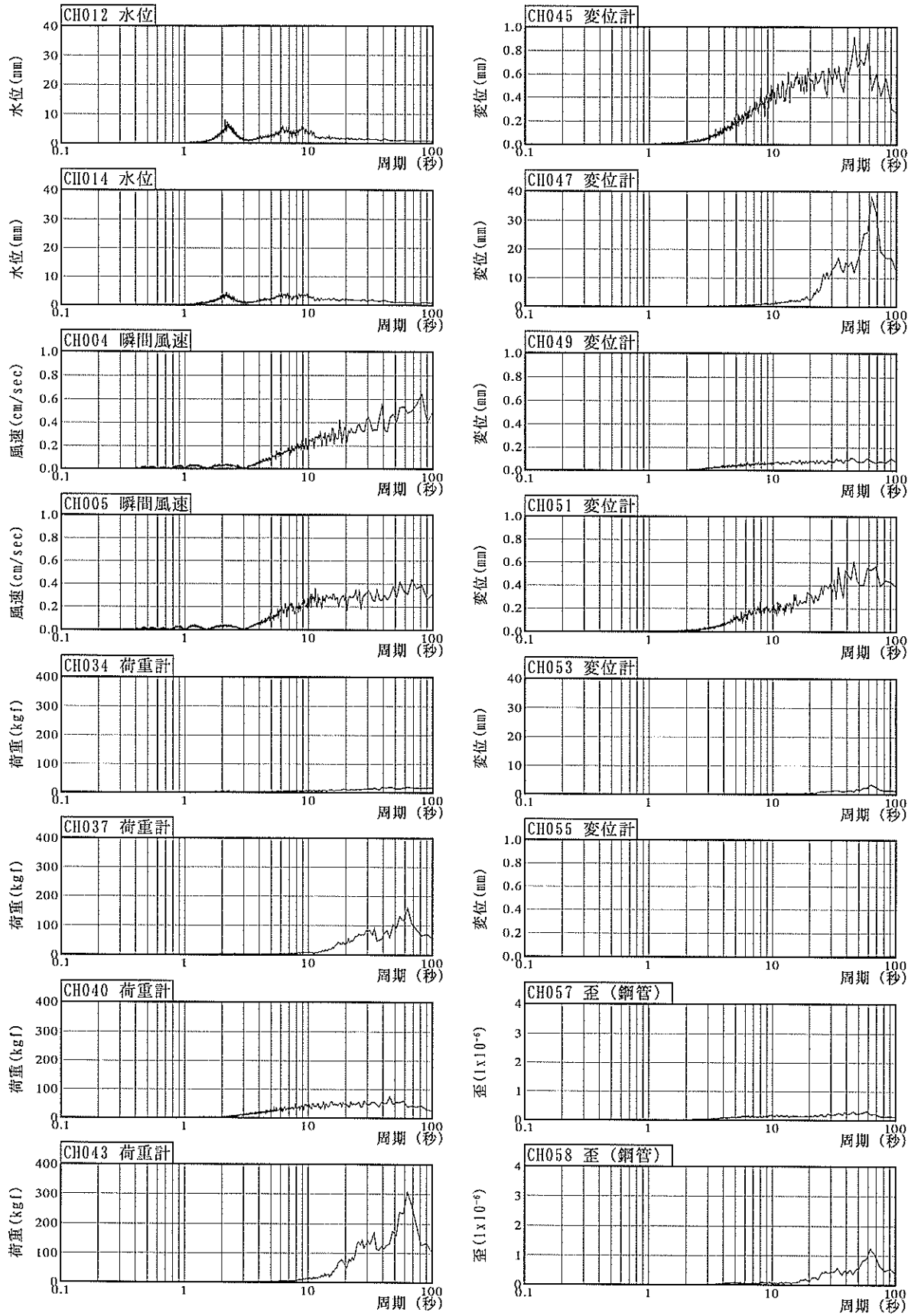


図-29 実験結果スペクトル 解析ケース⑤

ハイブリッド型フェンダーにより保留された浮体の動揺特性

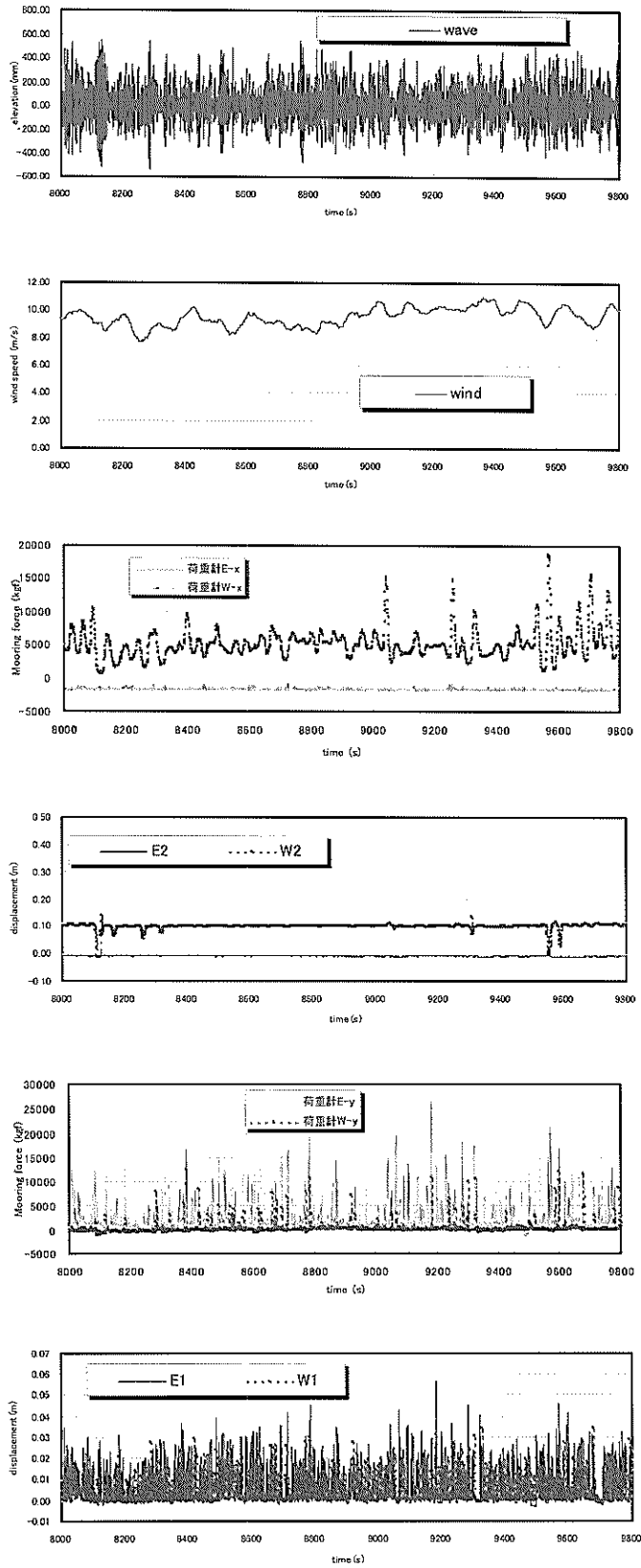


図-30 実験結果時系列 解析ケース⑥

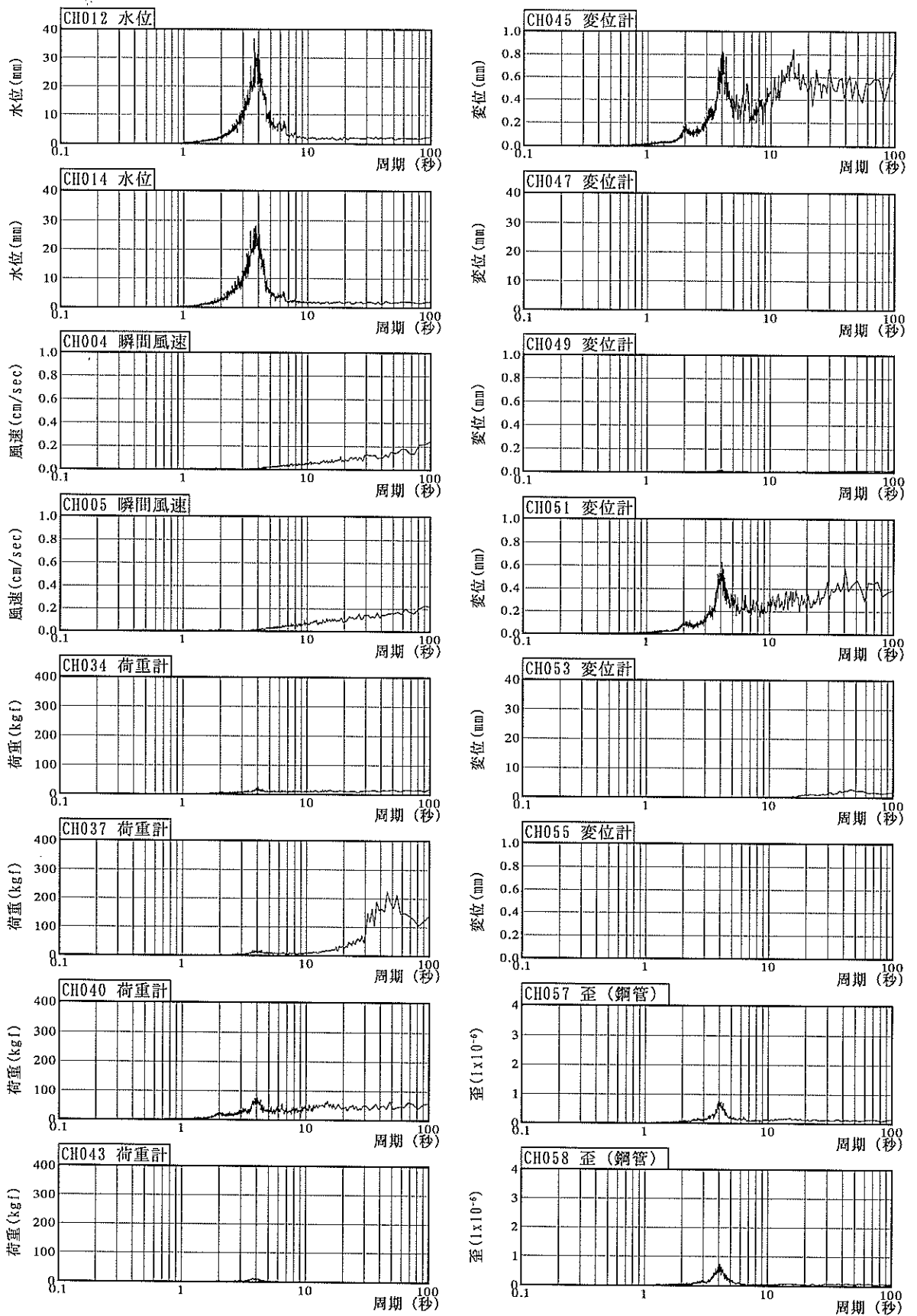


図-31 実験結果スペクトル 解析ケース⑥

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

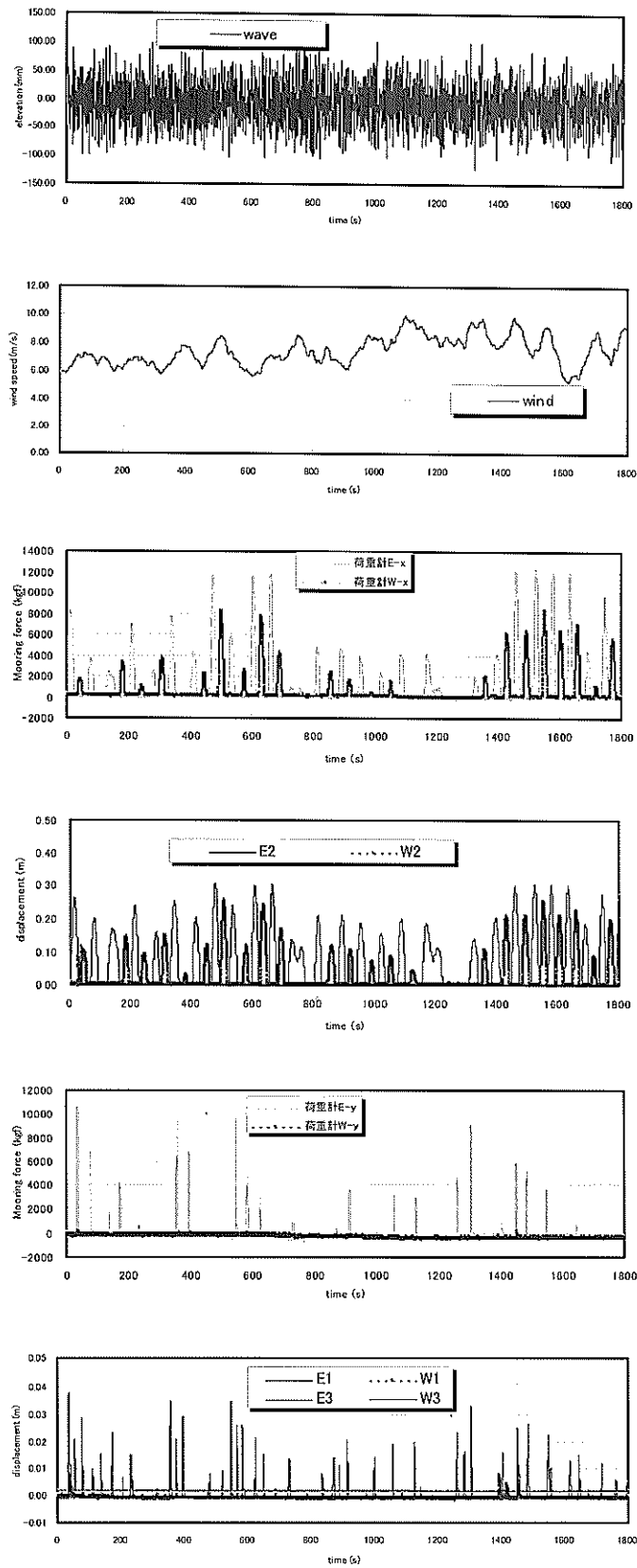


図-32 実験結果時系列 解析ケース⑨

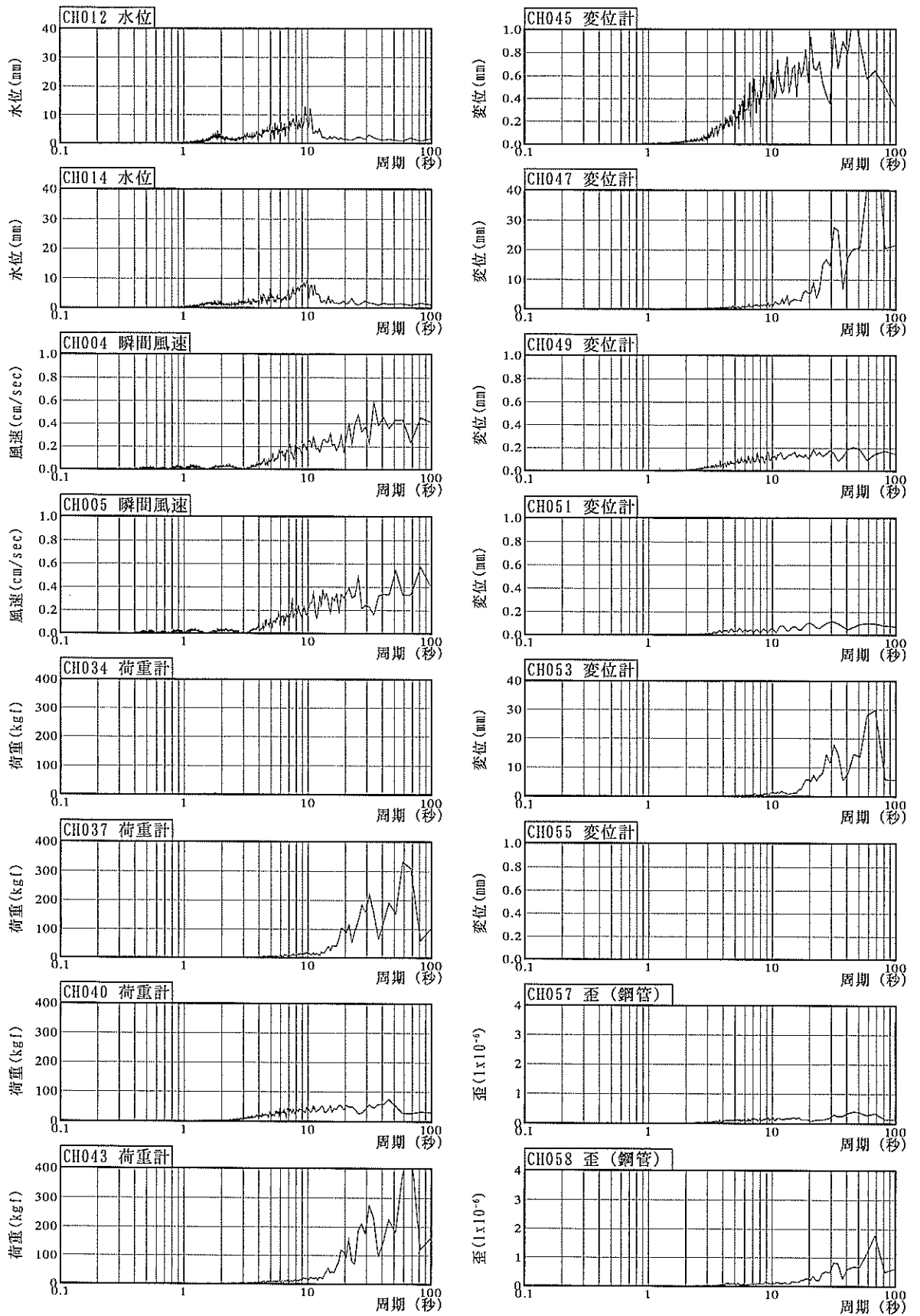


図-33 実験結果スペクトル 解析ケース⑨

ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性

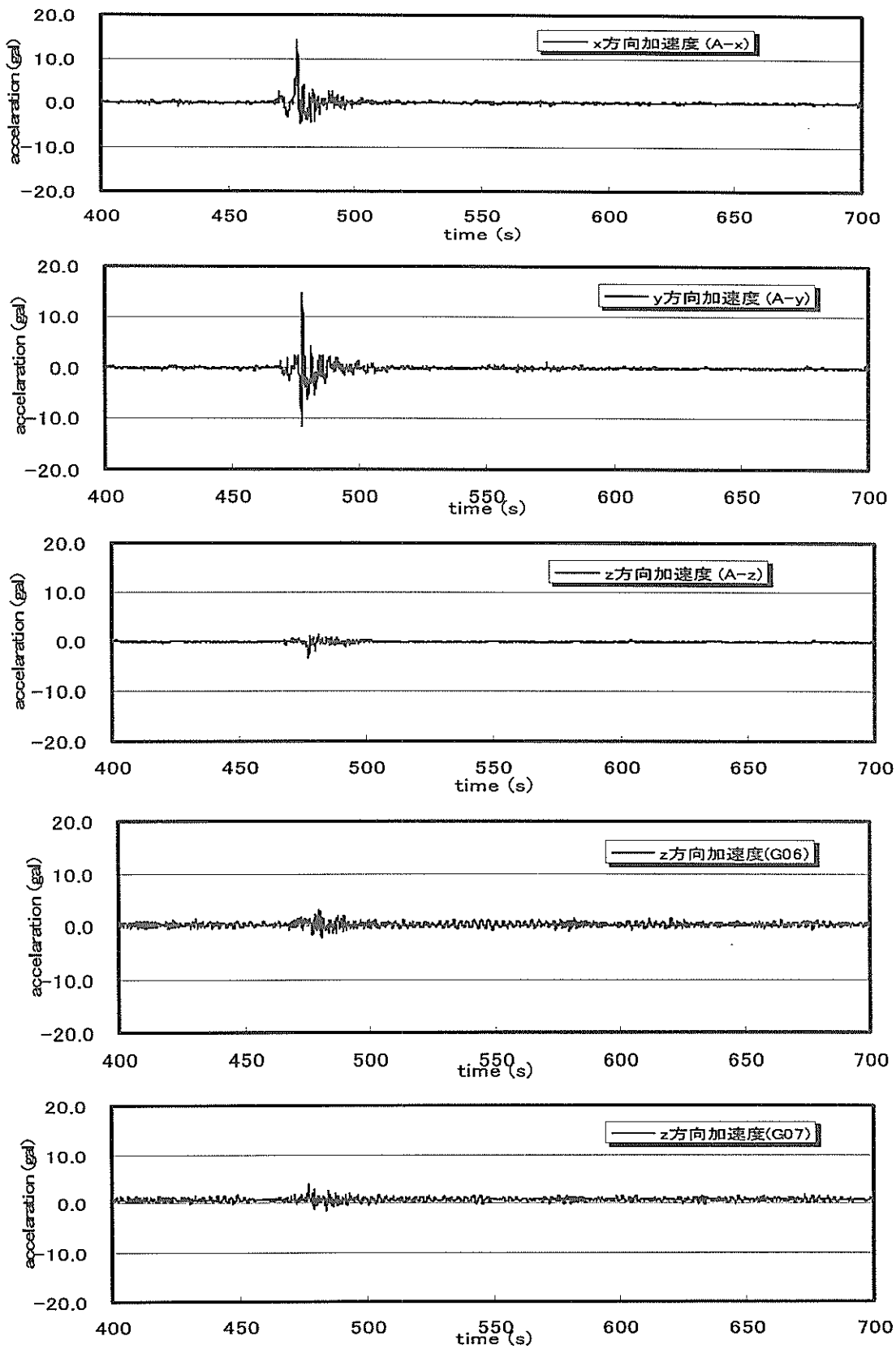


図-34 (a) 地震時応答の時系列データ

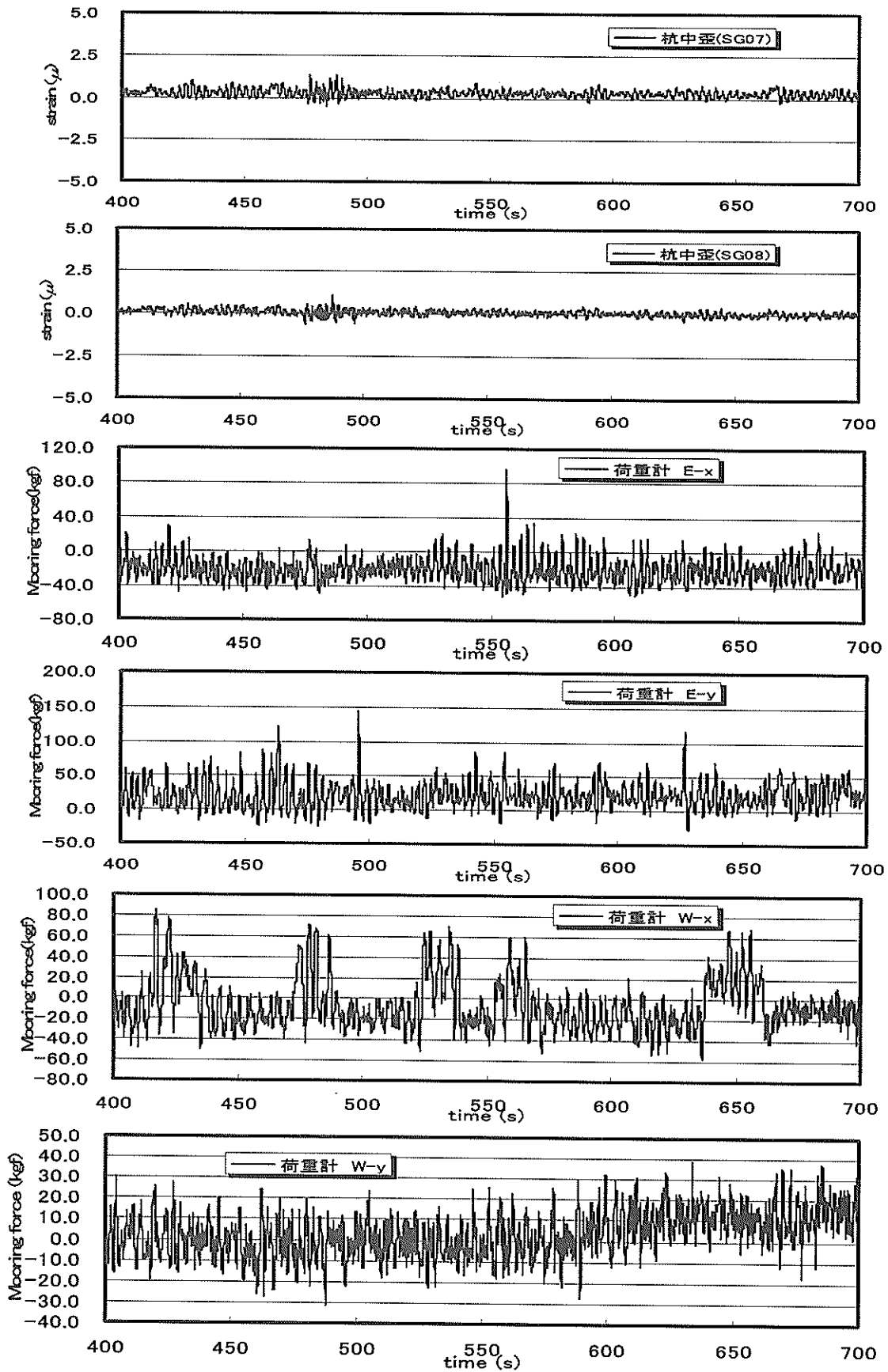


図-34 (b) 地震時応答の時系列データ

4. 考察

4.1 概要

この章では、第3章に示した実験結果を動揺シミュレーション(上田ら, 1984)によって再現することを試みる。実験結果と動揺シミュレーション結果を比較することで動揺シミュレーション手法の妥当性の検証を行うことができる。

さらに、ハイブリッド型フェンダーの適用性について考える。ひとつは今回の実証実験の例に見られるようなメガフロートのように大きな浮体構造物あるいは船舶を係留する場合への適用である。もうひとつは、本章で検討するいわゆるサブハーモニックモーションによる長周期動揺を低減するための係留への適用である。

4.2 計測結果に対するシミュレーション

(1) 浮体の基本応答特性

波浪荷重の水平方向成分は水平方向の水粒子加速度にほぼ比例すると考えられる。長周期域においては、水粒子の水平方向加速度は上下方向の加速度に比べて大きくなるから、水平方向荷重が相対的に大きくなる。動揺振幅は水平方向荷重と慣性力とのバランスで決まるから、長周期域においては、浮体の水平方向動揺の振幅が大きくなる。

メガフロート情報基地についての水平方向動揺の特性を調べるために、規則波中のメガフロート情報基地浮体の動揺シミュレーションを行った。計算条件は以下の通りである。波浪に対する動揺の特性を把握するのが目的なので、ここでは風による荷重は考慮しない。

表-8 基本応答特性把握の際の計算条件

波高	波向き	周期(規則波)
0.1m	東(0度, 一方向)	4s, 6s, 8s, 10s, 12s

図-35には動揺シミュレーション時の座標系の定義を示した。x軸は東方向を正として定義し、y軸は岸壁から離れる方向を正として定義している。

このときの結果を図-36に示した。波向きが0度としておりsurge動揺が卓越するから、surge方向の動揺振幅の結果のみを示している。周期10秒の時には、波高に対して12倍もの応答値を示すのに対して、周期4秒の時には波高に対して1倍程度と動揺が小さくなっていることがわかる。この動揺シミュレーションからもわかるように、浮体の水平面内動揺に関しては長周期の波の寄与が大き

い。

メガフロート情報基地の実証実験において、波浪中にうねりの成分が含まれている場合に、水平動揺、あるいは係留力、フェンダー変位が大きくなるのが容易に推定される。

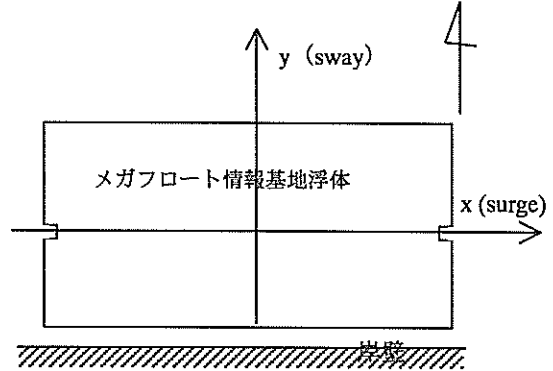


図-35 座標軸の定義

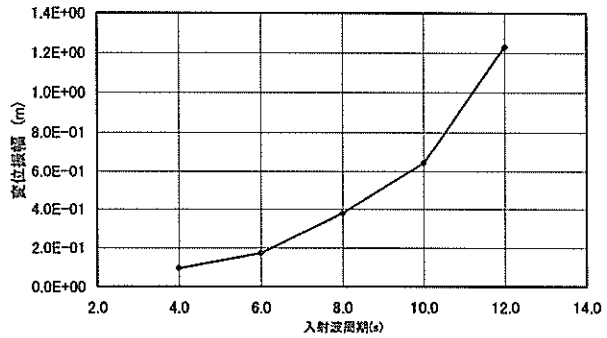


図-36 規則波中のsurge方向応答振幅

(2) 動揺シミュレーションによる観測結果の再現

観測によって選定された解析ケース①~⑩について、動揺シミュレーションによる現象の再現を試る。観測当時の波および風速を入力条件として用い、メガフロート情報基地浮体をモデル化し、動揺シミュレーションを行った。

実証実験においては、波高計や流速計を用いて直接的に波浪場を計測していない。浮体周辺部に取り付けた相対水位計による相対水位の情報のみを得られており、絶対的な波高の情報が得られていない。つまり、相対的な水位計なので、浮体が上下方向に動揺する場合には、水位の時系列に動揺の成分がノイズとして含まれることになるし、浮体の辺縁部に取り付けられているために、浮体からの流体力学的な散乱を多く含んだ計測になっている。また、波の方向が得られていないという欠点もある。

一方で、COMEINS(Coastal Oceanic Meteoric

Information System = 気象海象予測情報提供システム)による波浪情報を用いることも考えられる。ところが、COMEINSは周囲の気象状況と地形から推定される波浪推定情報であるから、現地の実験計測当時の波浪の情報が必ずしも正しく得られるわけではない。特に、今回の実証実験期間中において、波浪が全般的に穏やかであったことを考慮すると波向きや波高についての誤差も大きくなる場合があることが想像される。また、メガフロート情報基地の水平面内動揺にとって寄与の大きなうねりの情報について該当する時刻について適切に得られていない場合が大半であった。

それぞれの波浪情報を用いる欠点について、表-9にまとめている。今回の実証実験の場合には入力条件としての波浪場の適当な情報が必ずしも得られていないから、相対波高計からの波浪情報を用いる場合と、COMEINSからの波浪情報を用いる場合とをそれぞれのケースについて行った。

表-9 各波浪情報を動揺シミュレーションに用いる場合の欠点

波浪情報	欠点
相対波高計	<ul style="list-style-type: none"> ・浮体上下方向動揺によるノイズが含まれる。 ・浮体からの流体力学的散乱の影響が含まれる。 ・波方向がわからない。
COMEINS からの波浪情報	<ul style="list-style-type: none"> ・あくまでも推算であり、特に今回の実験ケースのように波高の低いケースについては、精度が十分でない場合がある。 ・今回の推算に関しては、うねりについての情報が不十分

相対波高計からの波浪情報を用いる場合には、まず相対波高計で計測された波浪について、パワースペクトルを求めた。次に、周期5秒から35秒の間で周期幅が一定になるようにパワースペクトルを分割し、各周期帯毎のパワーから要素波振幅を求めて、各要素波について重ね合わせを行った。各要素波の位相は乱数によって決定した。波向きについては、港湾の形状から最も波の入射があると思われるN~Eの中間値として、NEの方向で一定とした。ただし、後で説明するように解析ケース5の場合には、東向きを仮定した。波方向分布関数としては、いずれの場合にも主方向からの偏角 θ に対して $\cos^4\theta$ の分布関数を用いた。

COMEINSからの情報では風浪について、メガフロート情報基地浮体の設置海域における有義波高と有義周期、お

よび波向きが推算されている。動揺シミュレーションに用いる場合にはプレットシュナイダー・光易型のスペクトルを仮定した。

COMEINSにより推算された、各解析ケースに対応する気象・海象条件は表-10のようになっている。メガフロート情報基地浮体の設置されている港湾の港口は北から東方向に向いており、メガフロート情報基地浮体は湾内南側に位置する護岸部に近接して設置されている。このことを考えると、波向きは北から東向きになると思われるが、COMEINSの情報では南あるいは西向きの波が推定されている。これは推定するべき波浪の波高がそもそも小さいこともあって、COMEINSの情報に推定上の誤差があることが原因と思われる。

風速および風向については、現地の計測結果とCOMEINSからの情報がほぼ一致していることを確認した上で、共通してCOMEINSからの情報を用いた。

表-10 各解析ケースの解析条件

解析ケース	波向		有義波高 (m)	有義波周期 (s)	風向		風速 (m/s)
	1	SE	315.0	0.46	4.06	S	270.0
2	W	180.0	0.33	2.47	W	180.0	10.3
3	N	90.0	0.74	3.44	NNW	112.5	13.7
4	SSE	292.5	0.20	3.04	WSW	202.5	14.7
5	SE	315.0	0.25	3.26	SW	225.0	14.3
6	N	90.0	0.66	3.49	N	90.0	9.3
7	SSE	292.5	0.17	3.13	SSW	247.5	9.5
8	N	90.0	0.63	3.49	N	90.0	9.9
9	SE	315.0	0.63	4.25	WSW	202.5	13.2
10	SE	315.0	0.43	4.43	SW	225.0	9.9

動揺シミュレーションによる結果を浮体重心位置における動揺に関して表-11および表-12に示す。これらの表には各ケースの最大値、最小値および有義値が示されている。表-11は相対水位計から波浪を推定した場合の結果であり、表-12はCOMEINSによる推定を用いた場合の結果である。両者には大きな差があり、相対水位計からの波浪推定結果を用いた場合の方が、動揺を大きく推定していることがわかる。相対水位計の計測結果からの情報とCOMEINSからの情報で大きくことなるのは、うねりの成分が含まれているかどうかという点であり、このことが結果に大きく影響しているものと考えられる。

動揺シミュレーションの結果から、各フェンダー位置における変位量を求め、フェンダーと浮体との間の間隙0.1mを考慮することで、各フェンダーの変形量が求めら

れる。表-13には各ケースのフェンダー変形量の最大値と有義値について示した。これらは相対水位計からの情報を用いた場合の結果を示している。表-14にはCOMEINSからの情報を用いた場合のフェンダー変形量最大値を示している。

図-37には動揺シミュレーション結果と実験結果(表-7参照)とをフェンダー変形量の最大値について比較した。COMEINSによる推定結果を計算条件として与えるシミュレーション結果(図中COMEINSで示す)では、全般的に実験値よりも小さい応答が予測されている。相対水位計から得られたスペクトルを直接与える計算法(図中相対水位計で示す)では、実測された応答値と同程度かあるいは実測値を上回る応答値が予測されていることがわかり、実験値との相関は良好であるといえる。

なお、図中のケース⑤については、相対水位計から得られた情報を用いて、波向きはNEを仮定した動揺シミュレーション結果では実験値の半分ほどになっていた。波向きについて推定の精度が不十分な点があるものと考えて、仮に波向きを東向きとする場合についても動揺シミュレーションを再試行した。ここで示す図あるいは表の中でのケース⑤については再試行を行った結果を示している。他のケースについては、波向きはNEで固定したが、同様に波向きについての誤差があると思われるから、ある程度結果に幅があるものと考えられる。

また、図-38にはフェンダーの変形量の有義値を示している。相対水位計の情報を用いた動揺シミュレーションによって再現されたフェンダー変形量の有義値は、実験で計測されたフェンダー変形量の有義値に対してほぼ同程度の大きさになっているといえる。このように、実証実験における計測結果は、有義値に関しても動揺シミュレーションで十分に説明ができる程度の応答量であったといえる。

なお、実験における有義値の定義とは若干異なる。実験においてはフェンダー変形量の時系列そのものについて統計解析を行っている。これに対してシミュレーション結果に関しては、例えばE2変位については正に変位した部分の時系列に関して統計量解析しているから、フェンダーと浮体の間の間隙の0.1mを含めて解析していることになる。そこで、最大値および有義値からそれぞれ0.1mを差し引いたものを改めて最大値と有義値と定義し直している。

以上のことから、動揺シミュレーションによる実験結果の再現について次のことがいえる。

・相対水位計からの波浪情報を用いた場合には、実験結果と同程度かそれを若干上回る程度の推定を行うこと

ができた。この点で実験結果の再現には成功しているものと思われる。

・COMEINSからの波浪推算情報を用いた場合には、実験結果を下回る結果が得られた。COMEINS自身の波浪推定精度の問題と、今回用いた情報が風浪成分だけであったことが原因と思われる。

・実証実験における計測結果は動揺シミュレーションで再現できる程度の応答量を示しており、異常な現象は確認されない。

また、より精度の高い動揺シミュレーションを行うためには以下のことが必要であると思われる。

・現地波浪の多方向性の考慮。今回は \cos^4 乗則を仮定している。

・減衰定数の合わせ込み。今回は造波減衰以外の減衰の効果が含まれていない。現実には係留系の減衰や非線形の流体力学的な減衰が存在している。

・岸壁のモデル化。岸壁に隣接しているため岸壁からの反射波を考慮するべきである。ただし、岸壁の形状がやや複雑なので(図-2参照)、やや考慮が必要である。

・減揺板のモデル化。メガフロート情報基地浮体の北側側面部には動揺を減ずるためのスリット入りの鉛直板(波エネルギー吸収装置、図-2参照)が取り付けられているが、動揺シミュレーションの数値モデルには含まれていない。

・風の情報についての検討。今回は比較のためにCOMEINSからの情報を一意的に用いたが、現地において観測された風速あるいは風向を使うことも考えられる。両者に大きな差はないことは確認しているが、それでも若干の差がある場合が見られた。

表-11 メガフロート情報基地の変位量(相対水位計)

解析ケース	surge (m)			sway (m)		
	最大値	最小値	有義値	最大値	最小値	有義値
ケース①	0.45	-0.46	0.46	0.22	-0.24	0.28
ケース②	0.37	-0.29	0.35	0.16	-0.17	0.20
ケース③	0.32	-0.21	0.35	0.06	-0.15	0.10
ケース④	0.37	-0.13	0.24	0.14	-0.09	0.14
ケース⑤	0.28	-0.29	0.44	0.12	-0.15	0.18
ケース⑥	0.34	-0.34	0.49	0.11	-0.14	0.14
ケース⑦	0.27	-0.21	0.37	0.21	-0.21	0.32
ケース⑧	0.29	-0.29	0.44	0.10	-0.15	0.15
ケース⑨	0.38	-0.27	0.33	0.19	-0.12	0.22
ケース⑩	0.37	-0.31	0.40	0.15	-0.15	0.20

表-12 メガフロート情報基地の変位量 (COMEINS)

解析ケース	surge (m)			sway (m)		
	最大値	最小値	有義値	最大値	最小値	有義値
ケース①	0.02	-0.03	0.03	0.12	0.02	0.05
ケース②	0.15	0.10	0.03	0.00	0.00	0.00
ケース③	0.17	0.10	0.05	-0.07	-0.12	0.02
ケース④	0.22	0.11	0.08	0.10	0.10	0.00
ケース⑤	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
ケース⑥	0.01	-0.01	0.01	-0.07	-0.12	0.03
ケース⑦	0.13	0.10	0.02	0.11	0.10	0.00
ケース⑧	0.01	-0.01	0.01	-0.07	-0.12	0.03
ケース⑨	0.20	0.05	0.07	0.13	-0.03	0.08
ケース⑩	0.17	0.06	0.06	0.12	-0.02	0.08

表-13 フェンダーの変形量

(相対水位計, 上段: 最大値, 下段: 有義値*)

	E1 (m)	E2 (m)	E3 (m)	W1 (m)	W2 (m)	W3 (m)
ケース①	0.16	0.35	0.18	0.15	0.36	0.17
	0.08	0.15	0.09	0.08	0.14	0.09
ケース②	0.10	0.27	0.09	0.12	0.19	0.12
	0.06	0.20	0.06	0.07	0.08	0.07
ケース③	0.09	0.22	0.04	0.07	0.11	0.05
	0.07	0.21	0.02	0.07	0.08	0.03
ケース④	0.05	0.26	0.07	0.05	0.03	0.07
	0.02	0.26	0.04	0.01	0.00	0.04
ケース⑤	0.08	0.45	0.00	0.02	0.44	0.00
	0.00	0.26	0.00	0.00	0.27	0.00
ケース⑥	0.08	0.24	0.06	0.10	0.24	0.06
	0.06	0.15	0.04	0.06	0.16	0.04
ケース⑦	0.13	0.17	0.15	0.10	0.11	0.13
	0.08	0.14	0.10	0.07	0.06	0.09
ケース⑧	0.07	0.19	0.06	0.08	0.19	0.05
	0.06	0.12	0.06	0.07	0.13	0.05
ケース⑨	0.12	0.28	0.12	0.10	0.17	0.13
	0.05	0.22	0.08	0.05	0.09	0.08
ケース⑩	0.10	0.37	0.10	0.09	0.21	0.12
	0.04	0.31	0.06	0.07	0.08	0.07

*本文参照

表-14 フェンダーの変形量 (COMEINS, 最大値のみ)

	E1 (m)	E2 (m)	E3 (m)	W1 (m)	W2 (m)	W3 (m)
ケース①	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02
ケース②	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
ケース③	0.04	0.07	0.00	0.03	0.00	0.00
ケース④	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
ケース⑤	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ケース⑥	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
ケース⑦	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
ケース⑧	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
ケース⑨	0.01	0.10	0.04	0.00	0.00	0.05
ケース⑩	0.00	0.08	0.03	0.00	0.00	0.03

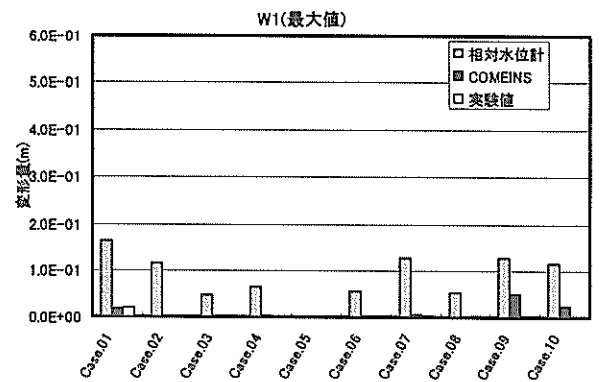
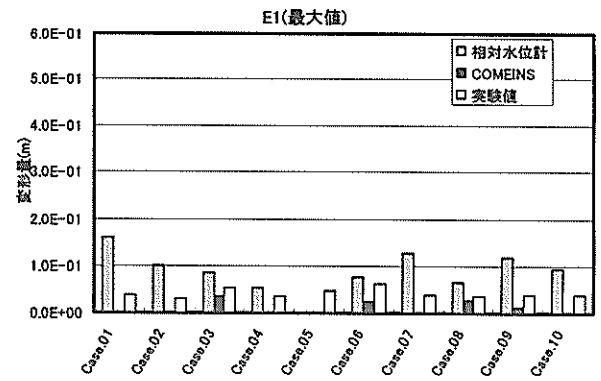
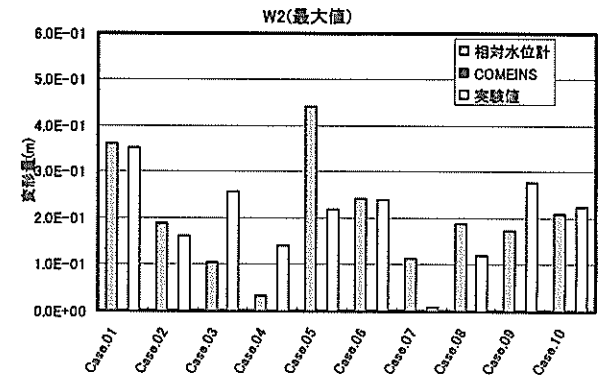
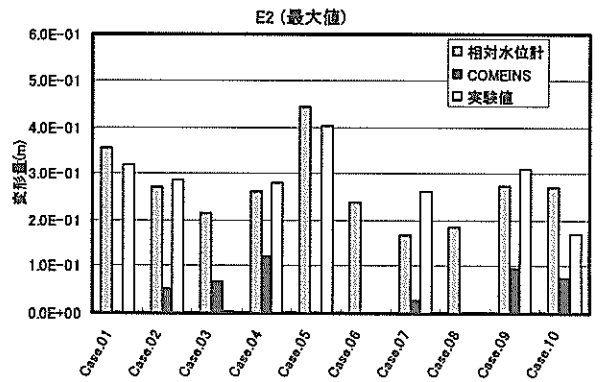


図-37 フェンダー変形量最大値の比較

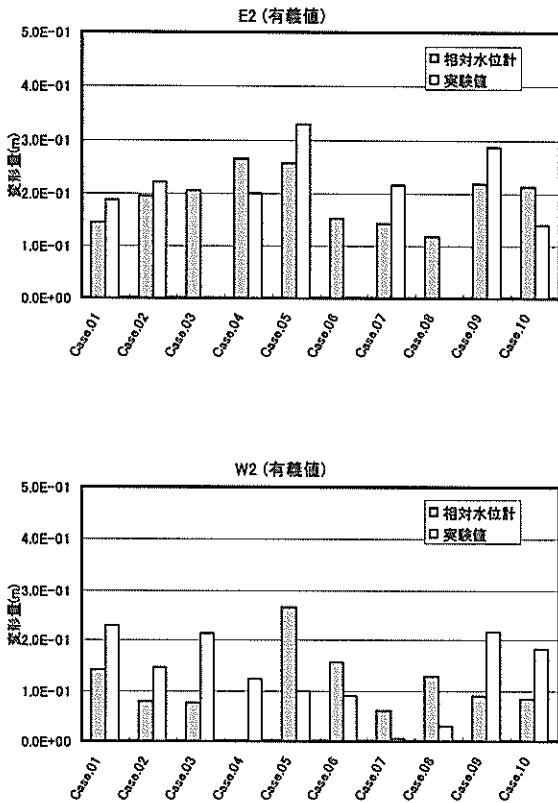


図-38 フェンダー変形量有義値の比較

表-15 観測当時の波浪特性 (うねりの有無)

年/月/日	解析ケース	図中記号	うねり有無	備考
01/12/10		(a)		
01/12/13	①	(b)	有	
01/12/15	②	(c)	有	
01/12/17		(d)		
01/12/26	③	(e)		波高大
01/12/29		(f)		
01/12/30	④	(g)	有	
02/01/08	⑤	(h)	有	
02/01/16	⑥	(i)		風浪最大
02/01/17		(j)		
02/01/18		(k)		
02/01/19		(l)		
02/01/21	⑦	(m)	有	
02/02/09	⑧	(n)	有	
02/03/13		(o)		
02/03/15	⑨	(p)	有	
02/03/21	⑩	(q)	有	

4.3 ハイブリッド型フェンダーのメガフロートへの適用

(1) 気象・海象条件の厳しい場合

メガフロートの係留についての簡単な考察を行ってみる。仮に長さ $L=4000\text{m}$ 、幅 $B=600\text{m}$ 、喫水 $d=1.0\text{m}$ のメガフロートを係留する場合について考えてみる。自然環境条件としては、波高 6.0m 、風速 40m/s 、潮流 2kt を想定する。ここで与えた自然環境条件は、今回実証実験を行ったメガフロート情報基地の設置海域の自然環境条件に比べて厳しいものである。Sway方向の定常外力は表-16のように計算される。ただし、第2章で用いたのと同じ漂流力係数、抗力係数、摩擦係数を用いている。

表-16 定常力の計算結果

波漂流力	$1.8 \times 10^8 \text{ N}$
風摩擦力	$9.6 \times 10^6 \text{ N}$
風抗力	$6.4 \times 10^6 \text{ N}$
潮流力	$2.0 \times 10^6 \text{ N}$
定常外力総和	$1.9 \times 10^8 \text{ N}$

仮に現存する定反力型フェンダーで最大のもの（高さ 3000mm ）のフェンダーを用いるとすれば、10%歪時の反力は $400\text{tf} (=4.0 \times 10^5 \text{ N})$ であることから、フェンダーは50個必要となることがわかる。フェンダー1個あたりのばね定数 k が $1000\text{tf/m} (=1.0 \times 10^7 \text{ N})$ であることを考えると固有周期 T は、

(3) 実証実験期間における波浪についての考察

これまでの考察から、メガフロート情報基地浮体の水平面内動揺に関して、比較的長周期のうねり成分が重要な役割を持っていることがわかった。図-39は観測期間中のそれぞれのある日時における波浪スペクトルを示したものである。これらの日時はトレンドグラフから応答がやや大きいものから選んでいる。解析ケース①～⑩はその中でも係留系の応答の大きかったケースであった。また、表-15にはそれぞれの日時についてうねりの有無を示した。解析ケース①～⑩のうち、うねり成分が見られるのは、解析ケース③と⑥を除く全ケースであり、解析ケース③と解析ケース⑥は表-4から風浪の発達の度合いが観測期間中で上位になるケースであったことがわかり、むしろ例外的なケースであったといえる。

解析ケース①～⑩は係留系に関する水平面内の応答が大きくなる上位ということで選ばれているから、応答が大きいケースとうねりの有無の間に強い相関があるということがわかる。

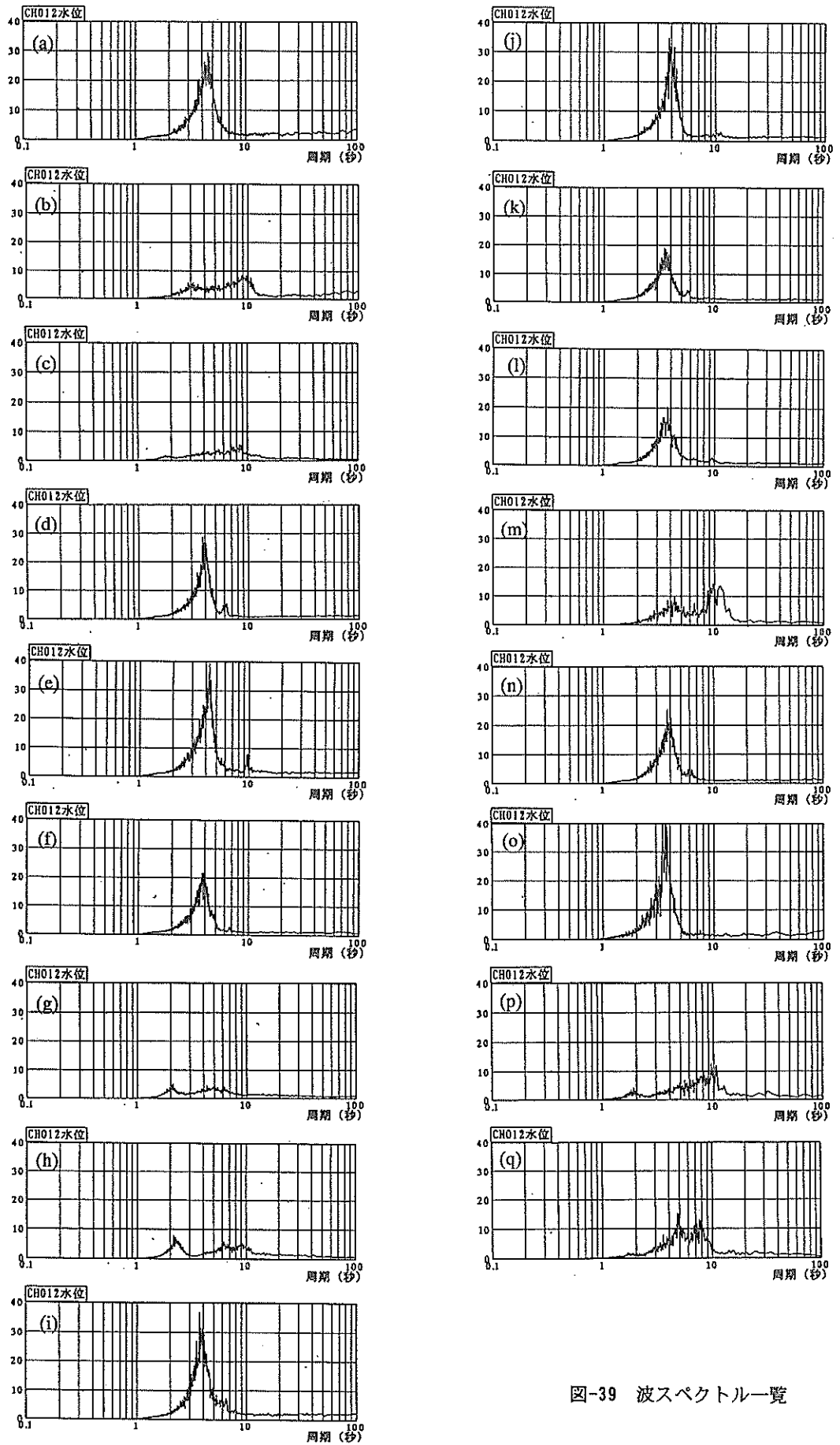


図-39 波スペクトル一覧

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 13.9 \text{ s} \quad (1)$$

と計算される。係留系の固有周期としては短周期側に設定されたことになり、うねりに対して同調応答によって応答が大きくなることが懸念される。そこで、ハイブリッド型フェンダーを用いることを考えると、通常時にはやわらかいばね特性をいかすことができるので、同調応答を抑えて機能性の向上をはかることができる。一方で、異常気象時には、ストッパーが作用し固いばね特性が生かされるから大変形が抑えられることになる。

このように、設置海域の気象・海象条件が厳しい場合にはハイブリッド型フェンダーは有効である。

(2) 気象・海象条件が穏やかな場合

次に気象・海象条件が比較的緩い場合の係留設計を考えてみる。自然環境条件としては、波高2.0m、風速25m/s、潮流0.5ktを想定する。同様に定常力を計算すると、表-17のようになる。

表-17 定常力の計算結果

波漂流力	$2.0 \times 10^7 \text{ N}$
風摩擦力	$3.8 \times 10^6 \text{ N}$
風抗力	$2.5 \times 10^6 \text{ N}$
潮流力	$4.0 \times 10^5 \text{ N}$
定常外力総和	$2.6 \times 10^7 \text{ N}$

このとき、同じタイプのフェンダー（定反力型、高さ3000mm）を用いることとすれば、10%歪時の反力400tfから計算して、フェンダーの必要数は7個となる。また、このときの固有周期は、フェンダー1個あたりのばね定数kが1000tf/mであるとすれば、37.1sと計算される。従って、同調応答は考えられにくく、特にハイブリッド型フェンダーを用いる必要性は生じてこない。

このように、気象・海象条件が比較的穏やかな場合には、ハイブリッド型フェンダーの特性が発揮されにくい。

なお、ここでの検討は簡単な計算に基づく試算であり、本来は動揺シミュレーションなどを行って決定するべきものである。なお、ここで得られたフェンダー配置選択結果の妥当性については以下のように考える。

メガフロート技術研究組合による空港利用に関する実証的研究に供された1000mの浮体はここで設定されたものと同程度の自然環境条件で浮体の設計が行われている。このとき、浮体はSUC1700HあるいはSUC1600Hの16個のフ

エンダーによって、6箇所係留されていた。Sway方向への動揺に対しては、4個のフェンダーで係留されていた。フェンダー1個あたり250mという計算になる。SUC1700Hの最大反力が150tf程度でSUC3000Hの定反力の半分以下であることを考えると、ここで想定した4000mの浮体に対して、SUC3000Hのフェンダーで7個という設計はSUC1700H相当で14個程度となり、フェンダー1個あたり290mと計算される。メガフロート技術研究組合による実証的研究に用いられたフェンダー配置と同等であるといえる

4.5 ハイブリッド型フェンダーの船舶係留への適用

(1) サブハーモニックモーションについて

係留系が非対称な場合には、サブハーモニックモーションといわれる長周期動揺が生じることが知られている（青木ら、1992、谷垣ら、1999、榎木、1991）。

サブハーモニックモーションとは係留系に強い非対称性がある場合に生じる長周期の動揺である。例えば、岸壁に係留された船舶の動揺はその良い例である。すなわち、船体は岸壁から離れる側には係留索を用いて流出が防がれている。岸壁に近づく側にはフェンダーによって岸壁への衝突が防がれている。ここで係留索はやわらかいばねであり、フェンダーは硬いばねである。船体はSway方向に動揺する際に非対称な係留特性を経ていることとなる。

外力が周期的（角周波数 ω ）であるとして、このときの動揺 y に関する最も単純化された運動方程式は次式のようなになる。ここで、 m は付加質量を含めた質量を表し、 c は減衰係数を、 k_+ は正方向に動揺した場合のばね定数を、 k_- は負の方向に動揺した場合のばね定数を、 f は外力の振幅を、 t は時刻を表している。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + k_{\pm}y = f \sin(\omega t) \quad (2)$$

上式中で、 $\ddot{\cdot}$ は二階の時間微分を、 $\dot{\cdot}$ は一階の時間微分を表している。

ここで表-18に示すような場合について、上式に関する計算を行ってみた。岸壁に係留索によって係留された船舶で、岸壁と船舶の間にはそれぞれ、定反力型フェンダーとハイブリッド型係留が用いられる場合を想定している。

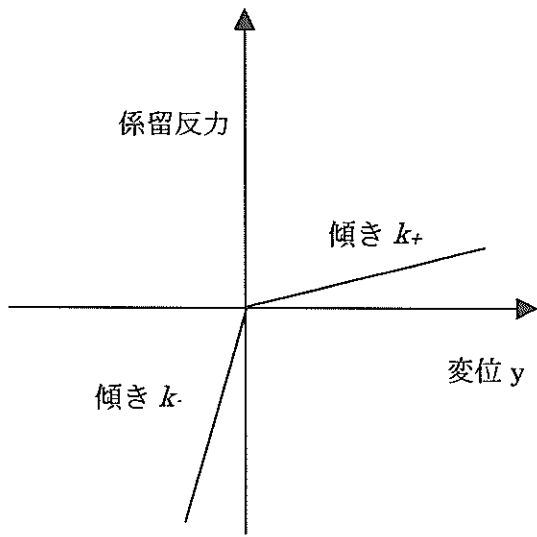


図-40 係留ばねの非線型性

表-18 試算時のフェンダー概略

フェンダータイプ	m (kg)	c (Ns/m)	k_+ (N/m)	k_- (N/m)
定反力型	7.0×10^7	4.0×10^6	3.00×10^5	3.00×10^7
ハイブリッド型	7.0×10^7	4.0×10^6	3.00×10^5	5.00×10^6

図-41 に計算の結果を示す。この図から、定反力型フェンダーを用いた係留の場合には、外力周期が10秒以上の長周期側で、周期50秒程度の非常に長い周期の動揺が生じていることがわかる。これがサブハーモニックモーションといわれる現象である。これに対して、ハイブリッド型フェンダーによる係留の場合には、外力周期が5秒では定反力型フェンダーと同じ程度の動揺量であるが、外力周期10秒以上の場合では長周期の動揺が生じておらず、定反力型フェンダーで係留した場合に比較して、小さな動揺量になっている。

定反力型フェンダーとハイブリッド型フェンダーの違いのひとつに、ばねの傾きの違いがあり、比 k_+/k_- が大きいほど、サブハーモニックモーションが生じることが知られている。ハイブリッド型フェンダーを用いることでこの比が小さく抑えられるから、サブハーモニックモーションは抑制される。

特に太平洋に面した港湾においては、比較的長い周期の波が相当な頻度で港内に入射することが知られている。定反力型の大容量のフェンダーと係留索を用いて非対称船舶を係留している場合には、サブハーモニックモーシ

ョンによる動揺の増加が生じている可能性が指摘される。そこで、ハイブリッド型フェンダーを用いることで動揺が低減され、荷役の稼働率の向上が期待される。

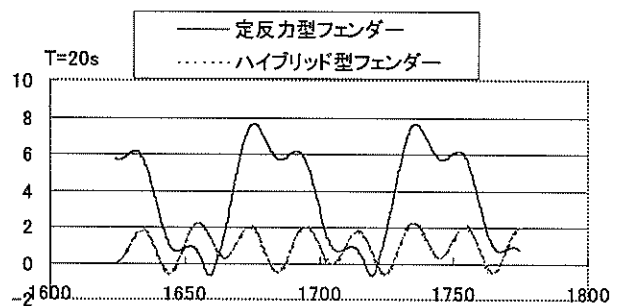
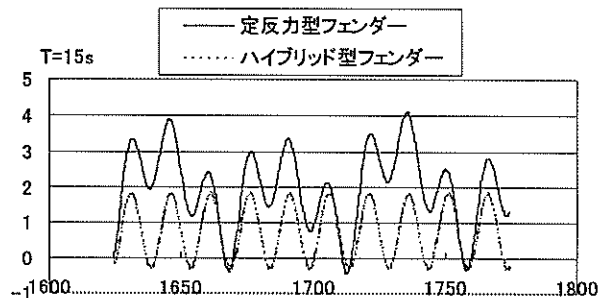
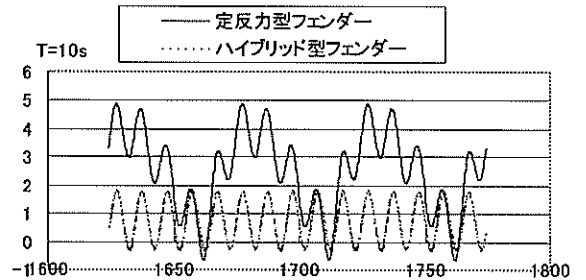
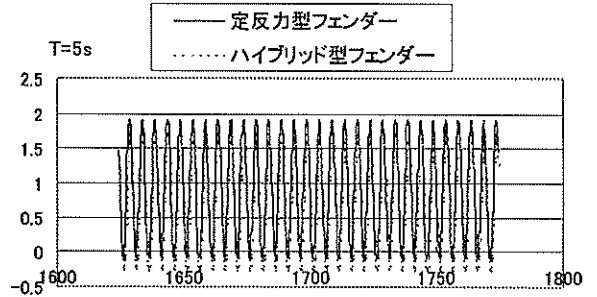


図-41 サブハーモニックモーションの例

(2) 計算例

前項ではサブハーモニックモーションの説明のために、1自由度の簡単なモデルを用いたが、ここでは動揺シミュレーションを用いて、実際の船舶の係留についてハイブリッド型フェンダーを用いた場合にサブハーモニックモーションを低減できるかどうかを調査した。

40,000DWTの一般貨物船を岸壁に係留することを考える。接岸速度を10cm/sと想定して、適当なハイブリッド型フェンダーの選択を行った。比較のために、通常用いられると考えられる定反力型フェンダーについても検討を行った。

① 必要吸収エネルギーEの計算

接岸エネルギー E_s に対して10%の余裕を考える。
必要吸収エネルギー $E=1.1E_s=261$ (kJ)=261 (kNm)

② フェンダーの選択

フェンダーメーカーから出されているカタログを参考に、下記のように適当なフェンダーを選択した。

定反力フェンダー： 高さ1150mmのフェンダー

ハイブリッド型フェンダー： 高さ1000mmの定反力フェンダーと高さ1330mmの反力漸増型フェンダーを組み合わせた。このとき、定反力型フェンダーと反力漸増型フェンダーのエネルギー吸収の割合は7:3と考えた。反力漸増型フェンダーにおいては、フェンダー高さに対して

40%までの変形を許容するものとした。

③ 計算の条件

動揺シミュレーションを行うにあたって、下表のような気象・海象条件を仮定した。不規則波のスペクトルとしてプレットシュナイダー・光易型を用いている。また、計算の比較のために、定反力型フェンダーのヒステリシスは考慮しない。係留索は標準型として、初期張力は30kN(3tf)を仮定した。係留索は使用後に硬化することが知られているが、ここでは硬化の影響は考慮していない。動揺シミュレーション時の係留索およびフェンダーの配置は図に示した。25分間分をシミュレーションして、解析対象としては5分～25分を選んだ。図-42には係留索およびフェンダーの配置を示す。フェンダー配置は12m毎になっている。

表-19 動揺シミュレーションのための気象・海象条件

	波高	周期	風速
規則波	$H=0.3\text{m}$	$T=5\text{s}, 10\text{s}, 15\text{s}$	0m/s
不規則波	$H_{1/3}=0.2\text{m}$	$T_{1/3}=5\text{s}, 6\text{s}, 8\text{s}, 10\text{s}, 12\text{s}, 15\text{s}$	0m/s
	$H_{1/3}=0.5\text{m}$	$T_{1/3}=5\text{s}, 6\text{s}, 8\text{s}, 10\text{s}, 12\text{s}, 15\text{s}$	0m/s
	$H_{1/3}=0.5\text{m}$	$T_{1/3}=10\text{s}$	15m/s

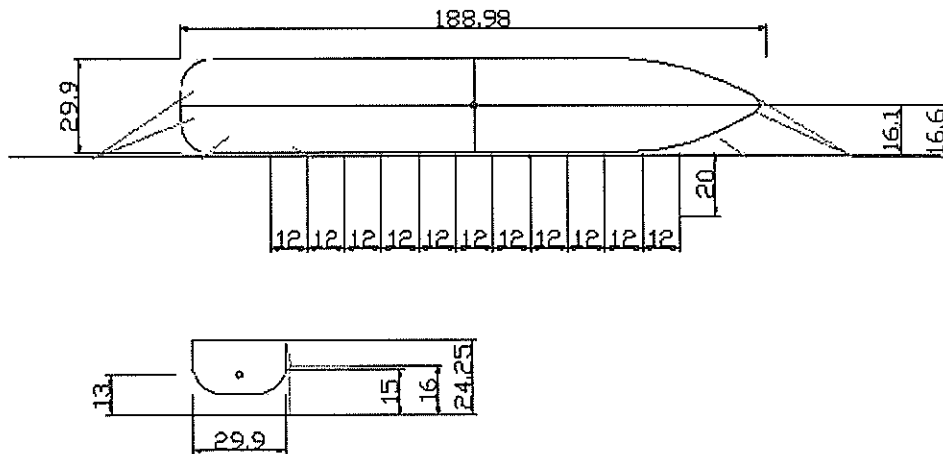
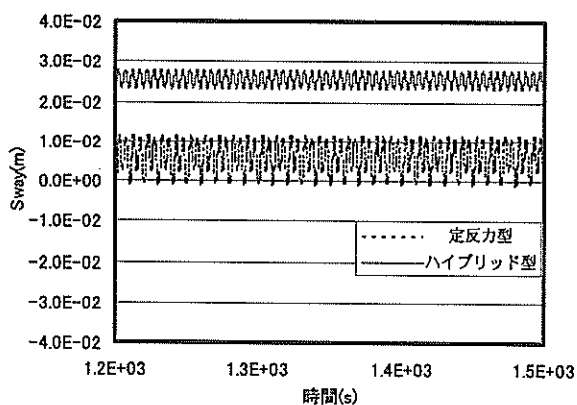
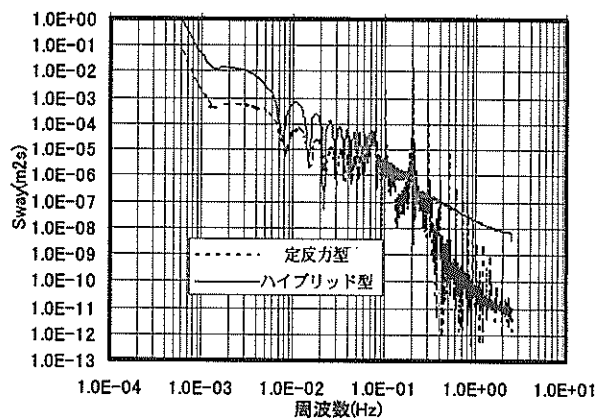


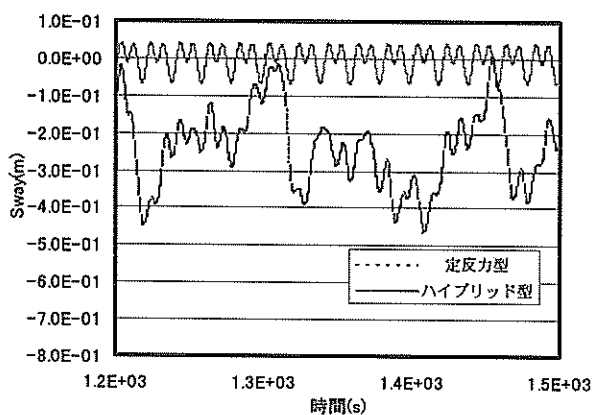
図-42 動揺シミュレーション時の係留索およびフェンダーの配置



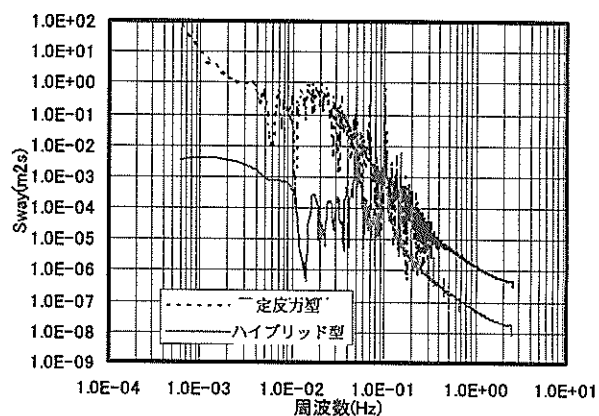
(a) 波周期5s 応答時系列



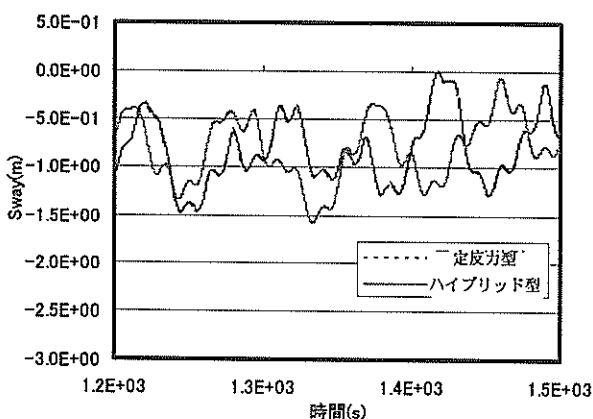
(a) 波周期5s 応答スペクトル



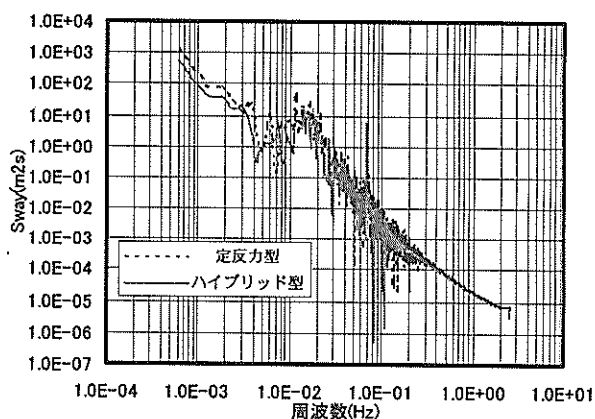
(b) 波周期10s 応答時系列



(b) 波周期10s 応答スペクトル



(c) 波周期15s 応答時系列



(c) 波周期15s 応答スペクトル

図-43 一般貨物船に対する動揺シミュレーション結果(規則波)

3) 動揺シミュレーション結果

図-43(a)～(c)には規則波中の場合について、動揺シミュレーションの結果を示した。Sway方向の動揺のみについて示している。1)項の簡単なシミュレーションでも示されたように、ハイブリッド型フェンダーを用いた場合にsway動揺のサブハーモニックモードが抑えられている様子がわかる。今回、選択されたハイブリッド型フェンダーでは周期10s付近で最も動揺低減の効果が現れている。周期5sでは、どちらのフェンダーを用いた場合でもサブハーモニックモードに起因する長周期の動揺が見られていない。周期15sでは、どちらのフェンダーを用いた場合でもサブハーモニックモードと思われる長周期の動揺が生じていることがわかる。

なお、1)項の簡単なシミュレーションとの手法における違いは、実際の船舶形状を用いて、荷重や付加質量、造波減衰などを適当に推定していること、波漂流力が含まれていること、rollやyawなど他の動揺モードとの連成が考慮されていることである。

図-43(d)～(f)にはこのときの応答スペクトルの様子を示した。特に波周期10sの条件で、ハイブリッド型フェンダーを用いた場合に、定反力型フェンダーを用いた場合に比較して長周期成分の応答エネルギーが小さいことがわかる。周期15sになると、どちらのフェンダーを用いた場合にもサブハーモニックモードが生じているが、ハイブリッド型フェンダーの性能の選択を適当に変更することで、周期15sの波浪に対してもサブハーモニックモードを抑えることができるものと思われる。

次に、不規則波中の応答の比較を行った。図-44(a),(b)は有義周期5sで風がない場合、有義周期10sで風がない場合、それぞれの条件下での応答の比較を行っている。不規則波中においても、ハイブリッド型フェンダーによる動揺低減の効果が現れていることがわかる。規則波の検討の際に、周期5sで長周期動揺が見られなかったのに対して、有義周期5sのスペクトル波で長周期動揺が見られるのは、成分の大きさとしては小さくともスペクトル中に10sやそれ以上の成分を含んでいるからであると考えられる。

また、実際の使用環境条件下では風が同時に作用すると考えられる。図-44(c)には有義周期10sで風がある(15m/s)場合における応答の比較を行っている。強い風が同時に作用する場合には、フェンダー側に船体が押し付けられて、ハイブリッド型フェンダーの二つのフェンダーのうちの反力漸増型フェンダーが主として作用する区間が短くなり、定反力型フェンダー部分が作用する区間が増える。強風が作用する場合には、ハイブリッド型フ

エンダーの特性が定性的に定反力型フェンダーの特性に近くなることを意味している。図中の下図に見るように、ハイブリッド型フェンダーにおいても若干動揺が大きくなって生じるのはこのためである。

図-44(d)～(f)にはそれぞれの条件下における動揺の応答スペクトルを示した。ハイブリッド型フェンダーを用いた場合には、特に長周期域において、応答スペクトルのエネルギーが低減されており、いわゆるサブハーモニックモードが抑えられていることがわかる。

一般貨物船の、荷役限界動揺量は国際航路協会会議(PIANC)によって、表-20のような値が提案されている。Sway方向については岸壁から離れる向きに、1.5mとされている。仮に岸壁からの動揺量の最大値が1.5mを超える場合に、荷役限界に達すると考えて、荷役限界時の波高を求めることを試みた。

動揺シミュレーションは波高0.2mおよび波高0.5mの各有義周期で行われた。表-21にはここで行った動揺シミュレーションケースの波浪条件が示されている。風は作用していないものと仮定している。

表-22、表-23には各計算ケースの最大値と最小値を示した。ここでは岸壁から離れる方向へのsway動揺を正に取っている。負の値はフェンダー側に押し込まれていることを表す。

図-45には有義波高0.5mの不規則波下の応答特性と有義波高0.2mの不規則波下の応答特性が示されている。横軸には不規則波の有義周期を、縦軸には岸壁から最も離れる際のsway最大値を示している。図中にはswayの荷役限界動揺量をあわせて示している。メガフロート情報基地の場合にも見られたように(図-36参照)、入射波周期が大きいほど動揺量が大きくなる傾向が見られる。波高0.5mの場合の曲線と波高0.2mの場合の計算から線形に補間あるいは補外して、限界動揺量の線と交わる波高を探すことで、各周期における荷役限界波高が推定される。

結果を図-46に示した。入射波周期が大きくなるほど、荷役限界波高が小さくなる傾向が見られる。ハイブリッド型フェンダーと定反力型との間の比較を行ったときに、ハイブリッド型フェンダーを用いると、定反力型フェンダーを用いた場合に比較して、各周期についておよそ二倍の波高まで荷役が許容されるようになることがわかる。表-23中の限界波高はこのように求められたものである。周期5s,6sの時に、ハイブリッド型フェンダーを用いた場合の荷役限界波高が定義されていないのは、これらの波周期では、常にフェンダー側に押し付けられる状態が生じており、岸壁側から離れることがないためである。

サブハーモニックモードはフェンダーの取り付け

た岸壁側から離れる側に大きく動揺が生じる現象である。そこで、岸壁側から離れる量 y_+ とフェンダーに押し込まれる量 y_- の比は、サブハーモニックモーションの生じる程度を表す指標になると考えられる。この指標が大きいほど、サブハーモニックモーションが大きく生じていると判断される。

表-22, 表-23には、このような指標が示されている。図-47には同じ指標が各周期ごとに示されている。定反力型フェンダーに比べて、ハイブリッド型フェンダーではサブハーモニックモーションが生じにくいこと、一般的に入射波波高が大きい方がサブハーモニックモーションが生じやすいこと、入射波周期が大きい方がサブハーモニックモーションが生じやすいということがわかる。

表-20 PIANCによる荷役限界動揺量

	sway	roll	Yaw
動揺限界量	1.5m	2.5deg	1.5deg

表-21 動揺シミュレーションのための波浪条件

波高	周期	風速
$H_{1/3}=0.5\text{m}$	$T_{1/3}=5\text{s}, 6\text{s}, 8\text{s}, 10\text{s}, 12\text{s}, 15\text{s}$	0m/s
$H_{1/3}=0.2\text{m}$	$T_{1/3}=5\text{s}, 6\text{s}, 8\text{s}, 10\text{s}, 12\text{s}, 15\text{s}$	0m/s

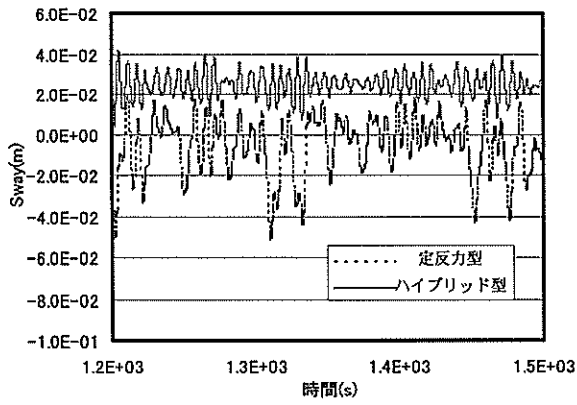
表-22 定反力型フェンダー動揺シミュレーション結果
(上段:波高0.5m, 下段:波高0.2m)

有義波周期	最大値 y_+	最小値 y_-	$ y_+/y_- $	限界波高
5s	0.051m	-0.023m	2.217	12.92m
	0.016m	-0.017m	0.941	
6s	0.199m	-0.024m	8.292	3.002m
	0.043m	-0.019m	2.263	
8s	0.577m	-0.033m	17.485	1.329m
	0.243m	-0.027m	9.000	
10s	1.337m	-0.057m	23.456	0.562m
	0.550m	-0.042m	13.095	
12s	2.770m	-0.061m	45.51	0.285m
	0.997m	-0.100m	9.970	

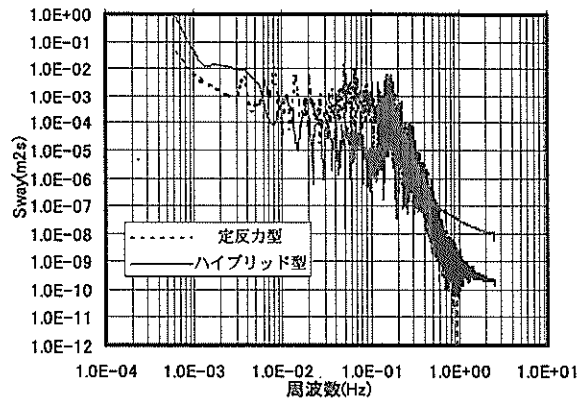
表-23 ハイブリッド型フェンダー動揺シミュレーション
結果(上段:波高0.5m, 下段:波高0.2m)

有義波周期	最大値 y_+	最小値 y_-	$ y_+/y_- $	限界波高
5s	-0.004m	-0.048m	-	-
	-0.017m	-0.035m	-	
6s	0.036m	-0.056m	0.643m	-
	-0.005m	-0.040m	-	
8s	0.168m	-0.085m	1.976m	3.749m
	0.045m	-0.056m	0.804m	
10s	0.497m	-0.131m	3.794m	1.474m
	0.188m	-0.100m	1.880m	
12s	1.178m	-0.208m	5.663m	0.645m
	0.510m	-0.163m	3.129m	

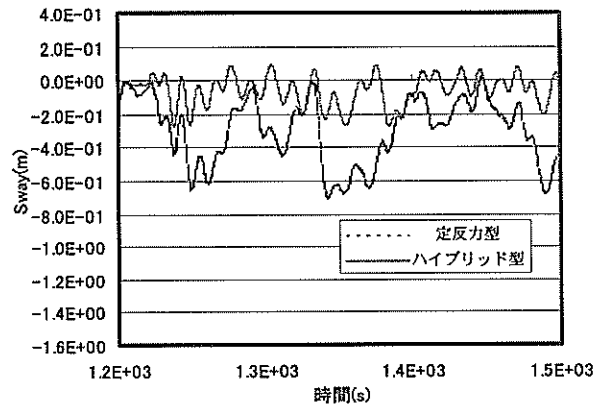
ハイブリッド型フェンダーにより係留された浮体の動揺特性



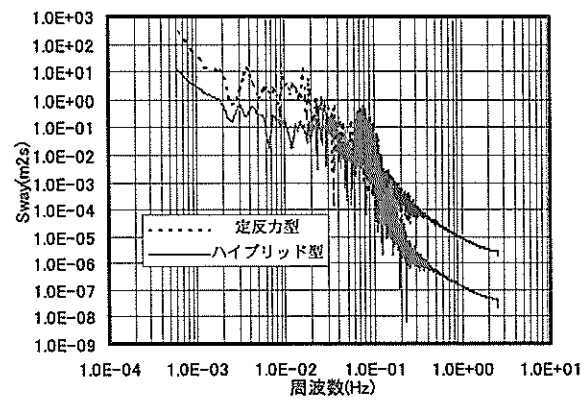
(a) 有義周期5s, 風無し



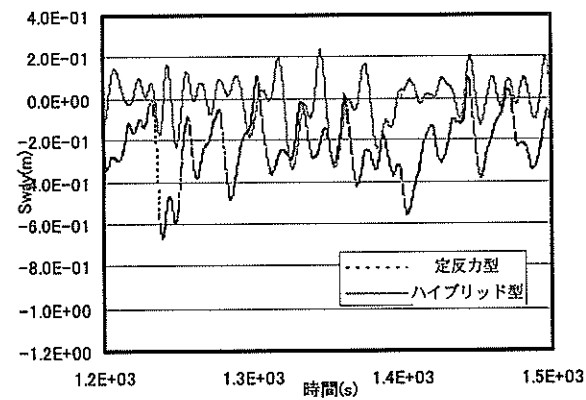
(a) 有義周期5s, 風無し



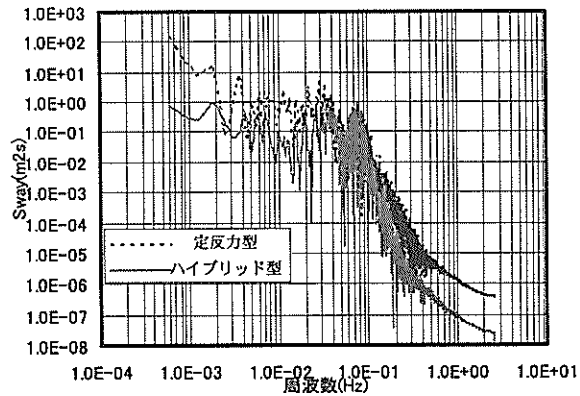
(b) 有義周期10s, 風無し



(b) 有義周期10s, 風無し



(c) 有義周期10s, 風速15m/s



(c) 有義周期10s, 風速15m/s

図-44 一般貨物船に対する動揺シミュレーション結果(不規則波)

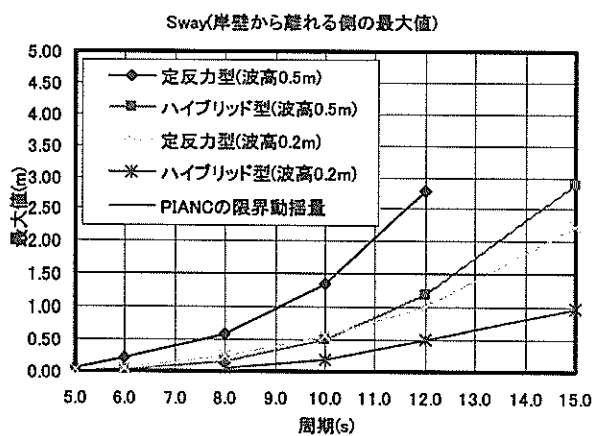


図-45 動揺量と限界動揺量

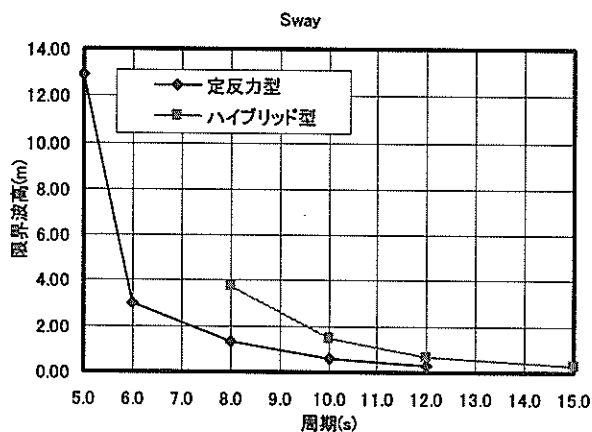


図-46 荷役限界波高

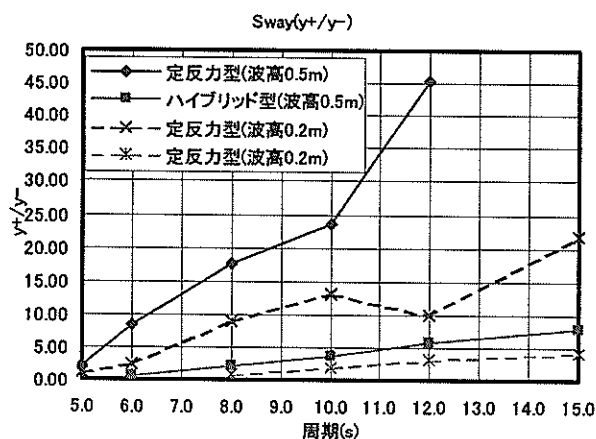


図-47 サブハーモニックモーションの程度の指標 y_+/y_-

5. ハイブリッド型フェンダーの縮尺模型実験

5.1 概要

実証実験で得られたデータは限られた期間の中で得られたものであり、実証観測期間が短いこと、また同期間中に観測された気象・海象が比較的穏やかであったことを考慮すると、ハイブリッド型フェンダーの応答や特性が十分に把握されたとは言い難い。そこで縮尺模型を用いて、ハイブリッド型フェンダーの基本応答特性を把握する。縮尺模型を用いた実験においては、想定される極限的な状況における変位復元力特性を求めるものとし、各種ケースについて実験を行う。

すでに、実機のハイブリッド型フェンダーに関して圧縮試験が行われているが、単純に準静的に圧縮する荷重条件下のみで行われたものである。ここではさらに、圧縮速度を変えた単純圧縮荷重、傾斜圧縮、せん断荷重+圧縮荷重の各条件下でのハイブリッド型フェンダーの変位-荷重特性を調べる。これら試験の荷重条件について、図-48に示した。

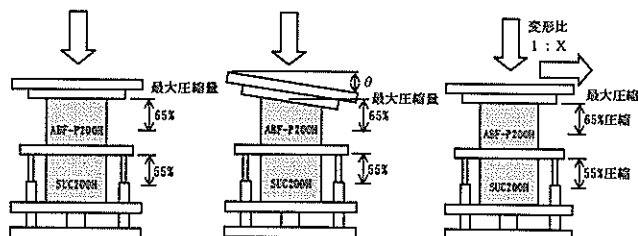


図-48 フェンダー縮尺模型実験荷重条件

縮尺模型実験の様子を写真-8に示す。写真中右側が固定壁であり、左側の壁が変位することによって、荷重が行われる。中央にフェンダー模型が写っており、二つのフェンダー模型が組み合わされている様子がわかる。各フェンダーの諸元については表-24に示した。基部には定反力型のフェンダーを用い、二段目には反力漸増型のフェンダーを用いている。今回用いた反力漸増型フェンダーの最大圧縮量は65%である。また、基部にはせん断変形を防止する目的で治具を取り付ける。各フェンダーの変位-荷重特性曲線および予想されるハイブリッド型フェンダーの変位-荷重曲線を図-49に示した。

表-24 フェンダー縮尺模型諸元

フェンダータイプ	寸法
定反力型	フェンダー高さH200mm
反力漸増型	空気式フェンダー 200H×φ200 内圧0.8kgf/cm ²

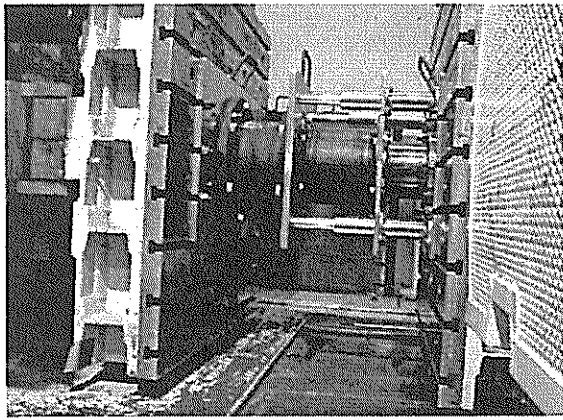


写真-8 縮尺模型実験の様子

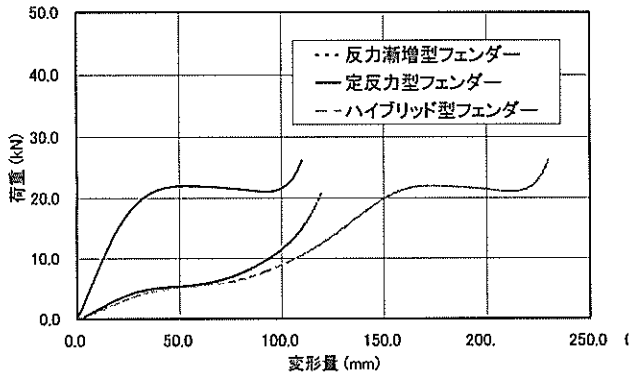


図-49 フェンダー縮尺模型の変位-荷重特性

また、実験で用いた試験機の性能は以下の通りである。

3軸試験機

・ストローク

圧縮：±125mm, せん断：300mm, 傾斜：±35度

・圧縮能力

圧縮：最大5tf (静的) (動的の場合は4tf)

せん断：最大5tf (静的) (動的の場合は4tf)

・寸法

面盤間隔：最大700mm

面盤サイズ：900mm×900mm

表-25 単純圧縮試験 ケース (A)

ストローク(mm)		圧縮時間 (s)		Case No.
模型	相当実物	模型	相当実物	
240	1,920	4.8	13.5	A-1
		7.1	20	A-2
		135.0	382(準静的)	A-3
120	960	2.4	6.8	A-4
		3.55	10	A-5
		67.5	191(準静的)	A-6

本研究において行った実験ケースを表-25から表-27に示す、

表-26 傾斜圧縮試験 ケース (I)

ストローク(mm)		圧縮時間 (s)		傾斜角 deg	治具有無	Case No.
模型	相当実物	模型	相当実物			
240	1,920	4.8	13.5	10	有	I-1
		7.1	20			I-2
		135.0	382			I-3
120	960	2.4	6.8	10	有	I-4
		3.55	10			I-5
		67.5	191			I-6
240	1,920	4.8	13.5	10	無	I-7
		135.0	382			I-8
240	1,920	13.5	4.8	5	有	I-9
		135.0	382			I-10
240	1,920	13.5	4.8	5	無	I-11
		135.0	382			I-12

表-27 せん断圧縮試験 ケース (S)

ストローク(mm)		圧縮時間(s)		せん断変位比	治具有無	Case No.
模型	相当実物	模型	相当実物			
240	1,920	4.8	13.5	1:0.5	有	S-1
				1:0.375		S-2
				1:0.25		S-3
				1:0.125		S-4
240	1,920	7.1	20	1:0.5	有	S-5
				1:0.25		S-6
240	1,920	135.0	382	1:0.5	有	S-7
				1:0.375		S-8
				1:0.25		S-9
				1:0.125		S-10
120	960	2.4	6.8	1:1	有	S-11
				1:0.75		S-12
				1:0.5		S-13
				1:0.25		S-14
120	960	67.5	191	1:1	有	S-15
				1:0.75		S-16
				1:0.5		S-17
				1:0.25		S-18
240	1,920	4.8	13.5	1:1	無	S-19
				1:0.5		S-20
				1:0.25		S-21
		135.0	382	1:1		S-22
				1:0.5		S-23
				1:0.25		S-24
120	960	2.4	6.8	1:1	無	S-25
				1:0.5		S-26
		67.5	191	1:1		S-27
				1:0.5		S-28

5.2 縮尺模型実験結果

図-50と図-51に単純圧縮試験の結果を示す。単純圧縮試験においては、圧縮時の速度を様々に変えており、変位復元力特性に速度依存性が現れていることがわかる。速度が高い方場合に傾きが大きく、いわゆるばね定数が大きいことがわかる。これは、フェンダーのダンピングの効果によるものと考えられる。例えば、圧縮時間が短い場合(A-1, A-4)と準静的な場合(A-3, A-6)の変位特性曲線を比較したときに50mm変形時には反力は15パーセントほどの違いが生じている。定反力部については、25パーセントほどの違いが見られており、速度依存性が無視できない。

このように現象としては速度依存性が存在するものの、実際の係留状態を考慮したときに速度依存性は無視できると考えられる。例えば、実証実験による観測ではハイブリッド型フェンダーが作用する東西方向の浮体の動揺周期は70秒程度であった。ハイブリッド型フェンダーに荷重がかかっていない状態から、圧縮されるまでの時間はその1/4の17.5秒と計算される。メガフロートの係留の場合には固有周期が長くなっているために、圧縮時間が長くなっており、準静的に圧縮した場合との差がほとんど生じていなかったものと思われる。

一方で、通常の岸壁においてハイブリッド型フェンダーを通常の船舶に用い、その固有周期が短い場合には圧縮時間も短くなる。このような場合には速度依存性が比較的強く生じるものと考えられる。

図-52と図-53に傾斜圧縮試験の結果を示す。傾斜圧縮試験の場合にはケース数が多いので、準静的な実験ケースに絞って結果を示した。図-52はせん断変形防止のための治具を有する場合の試験結果を示し、図-53は治具がない場合の試験結果を示す。

図-52中で、最も差の現れる定反力部においてもI-3, I-10, A-3いずれの場合についても定反力20tf程度であり、全般的に曲線間の特性の差は微小である。これらの結果から、傾斜角度の影響は大きくないということがわかる。また、図-53中のI-8, I-12, A-3の場合についても同じことがいえる。図-52と図-53を比較した場合についても両者にほとんど差はみられず、せん断変形がほとんど生じていないことが伺われる。

傾斜試験の場合についても圧縮速度を変えて実験を行っている。結果は単純圧縮時と同様の傾向が見られ、定反力部においては圧縮時間が最も短いケース(I-1, I-7)では準静的な圧縮ケース(I-3, I-8)の場合に比べて25パーセントほど定反力荷重が大きくなっていた。

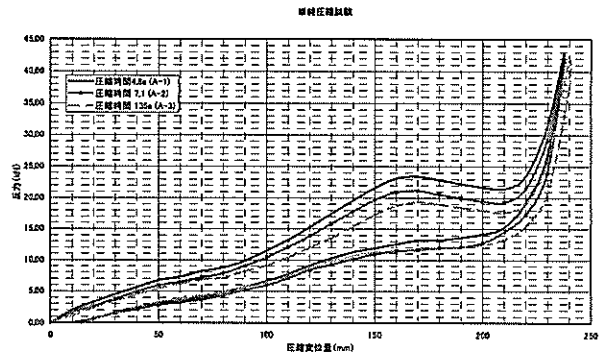


図-50 単純圧縮試験 (ストローク 240mm)

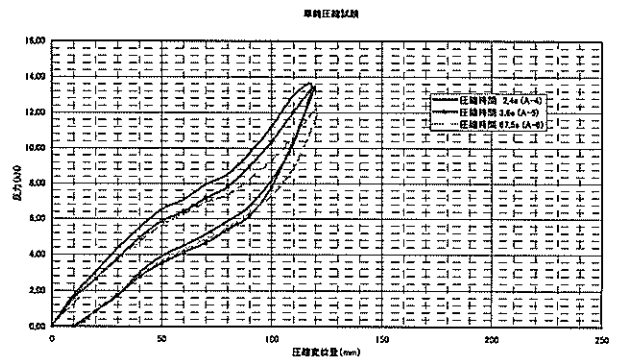


図-51 単純圧縮試験 (ストローク 120mm)

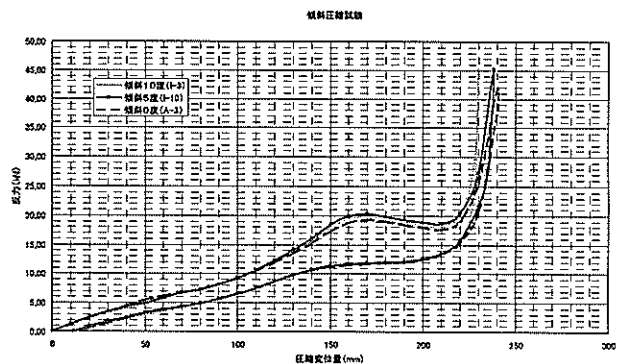


図-52 傾斜圧縮試験結果 (準静的, 治具有り)

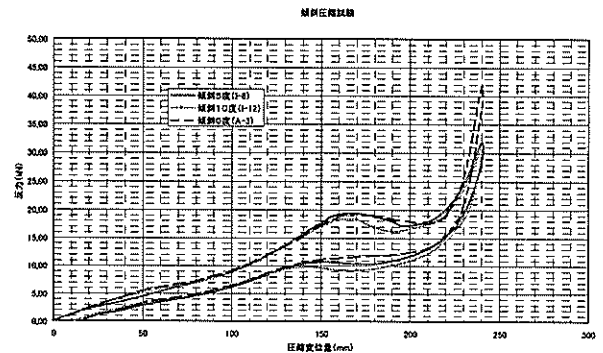


図-53 傾斜圧縮試験結果 (準静的, 治具無し)

次に、図-54と図-55にせん断圧縮試験の結果を示す。

この場合についてもケース数が多いので、準静的な実験ケースに絞って結果を示した。図-54はせん断変形防止のための治具なし、ストローク240mmの場合の試験結果を示し、図-55は治具がある場合のストローク120mmの場合の試験結果を示す。

せん断力が作用している場合には、せん断力による応力が加わるためにミーゼス相当応力的な意味で全体の応力は高くなるはずである。治具がない場合のせん断圧縮試験の結果では、定反力部の荷重が低下しており、せん断力が加わっている影響が明確に現れている。

今回の実験においては強制的にせん断変位を与えたが、実際には摩擦力の限界がありフェンダー前面で摩擦面が滑るから、せん断変位比で0.2程度が最大と思わる。図の下図でせん断変位比1:0.25の場合の曲線と、せん断変位比1:0の場合の曲線を比較すると両者には数パーセント程度の違いしか生じていない。以上のような考察から、せん断力による変位復元力曲線の変化は現象的にはあるものの、実際の設計では大きな影響とはならないと考えられる。

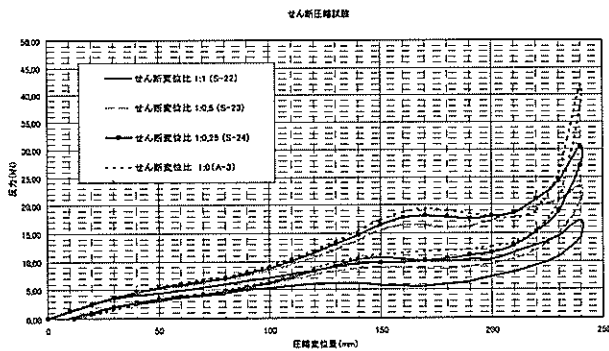


図-54 せん断圧縮試験結果（準静的、治具無し、ストローク240mm）

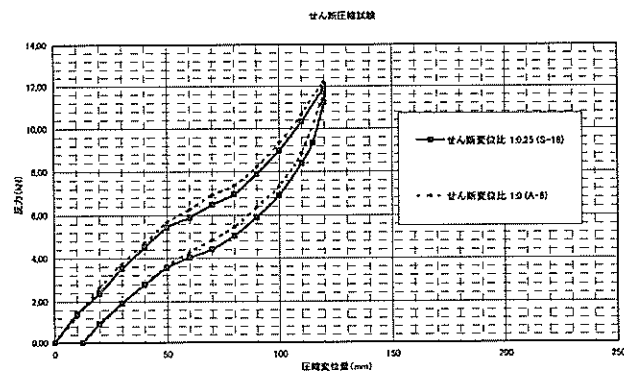


図-55 せん断圧縮試験結果（準静的、治具あり、ストローク120mm）

6. あとがき

本研究では、反力漸増型フェンダーと定反力型フェンダーそれぞれの長所を併せ持つ、ハイブリッド型フェンダーを提案し、メガフロート情報基地の係留について用いて、実証実験を行った。この実証実験については、次のようにまとめられる。

- 1) 4ヶ月間の実証実験を通して、不断なくメガフロート情報基地浮体の係留を行うことができ、ハイブリッド型フェンダーの使用性態についての検証を行うことができた。
- 2) 実証期間中の気象・海象条件は比較的穏やかであったために、ハイブリッド型フェンダーの機能性についての検証が十分にできたとは言い難い。

そこで、動揺シミュレーションによる考察を行った。実験結果について動揺シミュレーションを行ったところ、

- 3) 現地で観測された波高を入力条件として用いることで、実験結果をほぼ十分に説明付けることができることが示された。

また、同じ動揺シミュレーションを用いて、ハイブリッド型フェンダーを一般貨物船などの船舶の係留に用いた場合の有効性の検討を行った。その結果、

- 4) ハイブリッド型フェンダーを船舶の係留の一部に用いた場合に、サブハーモニックモーションとして知られる長周期動揺を低減させることができ、荷役限界波高が高くなることが示された。

また、メガフロートのような大型浮体の係留にハイブリッド型フェンダーを用いる際には、

- 5) 比較的海象条件の厳しい海域にメガフロートを係留する場合に、ハイブリッド型フェンダーの特徴が生かされることが概略検討によって示された。

最後に、縮尺模型による異常荷重を想定した圧縮試験を行っている。その結果

- 6) ハイブリッド型フェンダーには速度依存性、傾斜圧縮時の反力特性の変化、せん断圧縮時の反力特性の変化が見られるが、通常の使用環境下ではこれらの影響は少なく、準静的な単純圧縮特性で様々な条件下における特性を表すことができることがわかった。

ハイブリッド型フェンダーは定反力型フェンダーと反力漸増型フェンダー、それぞれの長所を含んでおり、組

み合わせるフェンダーの選択とストッパー位置の選択を適当に行えば、安全性を確保したままで機能性の向上も図ることができる。この点で、係留の自由度を飛躍的に高めることができ、気象・海象条件に応じた幅広い係留に対応が可能である点が評価される。

(2002年9月2日受付)

謝辞

本研究で行ったメガフロート情報基地機能実証実験は、独立行政法人海上技術安全研究所、通信・放送機構、NTTコミュニケーションズの連携協力の下で行われた。多くの方がこの研究に携わり、また、多数の方にお世話になった。関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- 青木伸一・榎木亨・Michael Isaacson(1992): 非線型係留浮体の長周期動揺とカオスの挙動に関する数値的検討, 海岸工学論文集 第39巻, pp. 791--795
- 上田茂(1984): 係岸船舶の動揺解析手法とその応用に関する研究, 港湾技研資料, No. 504
- 榎木亨(1991): 波と漂砂と構造物 第8章湾内静穏論, 技報堂出版
- 谷垣信吉・尾崎雅彦(1999): 非対称係留特性を有する浮体の長周期動揺, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 71-76
- 例えば, 永井紀彦・佐藤和敏・菅原一晃(2002): 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2000), 港湾空港技術研究所資料, No. 1017
- 運輸省港湾局(2000): 港湾の施設の技術上の基準・同開設 改訂版上・下, 日本港湾協会
- 日本道路協会(1996): 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, IV 下部構造編
- (財)沿岸開発技術センター(2000): ジャケット工法技術マニュアル
- 日本建築学会(1990): 鋼管構造設計施工指針・同解説 1990年改定
- 土木学会(1978): 鋼構造仮設指針