

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-114455  
(P2005-114455A)

(43) 公開日 平成17年4月28日(2005.4.28)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	F I	テーマコード (参考)
GO 1 M 19/00	GO 1 M 19/00	Z 2 G O 2 4
B 6 3 B 21/00	B 6 3 B 21/00	B
E O 2 B 3/24	E O 2 B 3/24	
// E O 2 B 1/02	E O 2 B 1/02	

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 17 頁)

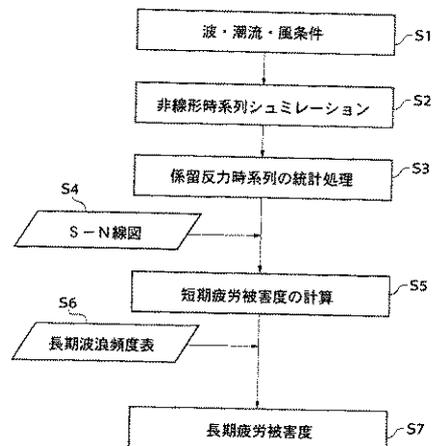
(21) 出願番号	特願2003-346633 (P2003-346633)	(71) 出願人	501204525 独立行政法人海上技術安全研究所 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
(22) 出願日	平成15年10月6日(2003.10.6)	(74) 代理人	100100413 弁理士 渡部 温
		(72) 発明者	加藤 俊司 東京都三鷹市新川6-38-1 海上技術安全研究所内
		(72) 発明者	難波 康広 東京都三鷹市新川6-38-1 海上技術安全研究所内
		Fターム(参考)	2G024 AD34 BA12 CA11 FA06

(54) 【発明の名称】 係留ドルフィンの疲労被害予測方法

(57) 【要約】

【課題】 係留ドルフィンの疲労被害予測をより正確に行なうことができる方法を提供する。

【解決手段】 本発明では、浮体及び係留ドルフィンの配置環境下における自然環境条件（波、潮流、風条件）を取り込み（ステップS1）、この自然環境条件に基づく環境外力が作用した際の浮体の運動状態について、非線形時系列シミュレーションを実施する（ステップS2）。次いで、この非線形時系列シミュレーションに応じて、浮体が係留ドルフィンから受ける係留反力時系列データを統計処理し、係留ドルフィン自体の受ける負荷についての頻度データを用意する（ステップS3）。次いで、S-N線図を取り込み（ステップS4）、ステップS3で得られた係留反力時系列データの統計処理結果から係留ドルフィン自体の受ける負荷（短期疲労被害の度合い）を計算し（ステップS5）、長期波浪頻度表に基づき長期波浪頻度を取り込む（ステップS6）。そして、短期疲労被害の度合いと長期波浪頻度から、係留ドルフィンの長期にわたる疲労被害を予測する（ステップS7）。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

液面上で浮体を係留する係留ドルフィンの疲労被害を予測する方法であって、  
浮体及び係留ドルフィンの配置環境下における自然環境条件を取り込み（第 1 ステップ）、

この自然環境条件に基づく環境外力が作用した際の浮体の運動状態を予測し（第 2 ステップ）、

この運動状態に応じて浮体が係留ドルフィンから受ける係留反力を予測し（第 3 ステップ）、

この係留反力から係留ドルフィン自体の受ける負荷を予測し（第 4 ステップ）、

この係留ドルフィン自体の受ける負荷に基づき係留ドルフィン中の特定箇所の疲労度合いを予測し（第 5 ステップ）、

前記第 2 ステップ中の浮体の運動状態を、非線形時系列シミュレーションを用いて予測することを特徴とする係留ドルフィンの疲労被害予測方法。

## 【請求項 2】

前記第 2 ステップ中の浮体の運動状態を、次式の運動方程式に基づき予測することを特徴とする請求項 1 記載の係留ドルフィンの疲労被害予測方法：

## 【数 1】

$$[M + m_{ii}(\infty)] \frac{d^2}{dt^2} x_i(t) + F_{Vi} \left( \frac{d}{dt} x_i(t) \right) + \int_{-\infty}^t \frac{d}{dt} x_i(\tau) L_{ii}(t - \tau) d\tau + F_{Mi}(x_i) \\ = F_{Hi}^{(1)}(t) + F_{Hi}^{(2)}(t) + F_{Wi}(t) + F_{Ci}(t)$$

但し、

$i = 1, 2, 6$

$m_{ii}(\infty)$  : 周波数無限大での付加質量及び付加慣性モーメント

$F_{Vi}$  : 粘性減衰力及びモーメント

$L_{ii}$  : メモリー影響関数

$F_{Mi}$  : 係留反力

$F_{Hi}^{(1)}$  : 線形波力及びモーメント

$F_{Hi}^{(2)}$  : 長周期変動波力及びモーメント

$F_{Wi}$  : 風力及びモーメント

$F_{Ci}$  : 潮流力及びモーメント

## 【請求項 3】

前記メモリー影響関数  $L_{ii}$  を、次式に基づき算出することを特徴とする請求項 2 記載の係留ドルフィンの疲労被害予測方法：

## 【数 2】

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

但し、

$N_{ii}(\omega)$  : 造波減衰力係数

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、浮体に作用する外力の非線形性や係留ドルフィンの非線形反力特性を考慮した係留ドルフィンの疲労被害予測方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

図 1 2 を参照しつつ背景技術について説明する。

図 1 2 は、石油を備蓄するタンクを洋上で係留する方式の一例を示す模式図である。

図 1 2 には、海中に設置された石油備蓄タンク（浮体構造物：メガフロート）1 が示されている。この石油備蓄タンク 1 は、係留ドルフィン 3 A、3 B によって海中に係留されている。係留ドルフィン 3 A、3 B は、水底から立ち上がった主要杭 5 A、5 B と、これらの上端内側に設けられたフェンダー 6 A、6 B を備えている。石油備蓄タンク 1 の動揺に伴う衝撃は、主要杭 5 A、5 B 上端のフェンダー 6 A、6 B で抑えられる。係留ドルフィン 3 A、3 B の外側は、防波堤 7 で取り囲まれている。この防波堤 7 の内側に静穏海域が形成されることで石油備蓄タンク 1 の動揺が抑えられ、よって係留ドルフィン 3 A、3 B の受ける負荷（疲労）が低減されるようになっている。

【 0 0 0 3 】

図 1 2 に示す係留方式では、石油備蓄タンク 1 の動揺を抑えるため、防波堤 7 の設置が必須である。しかしながら、防波堤 7 を常に設置しなければならないとなると、石油備蓄タンク 1 が大型化した場合等には、多額の建造費用がかかってしまう。さらに、防波堤 7 を設置すると、海流を阻害することとなるため、周辺海域の環境への悪影響も懸念される。あるいは、石油備蓄タンク 1 を沖合に配置する場合には、そもそもタンク周囲への防波堤の設置自体が不可能となる。

【 0 0 0 4 】

そこで、防波堤を建造せず、石油備蓄タンク等の浮体構造物を長期にわたって係留し続ける方式が求められている。防波堤を建造しない場合、浮体構造物は、波浪外力や潮流力を直接的に受けることとなるため、係留ドルフィンに加わる負荷も大きくなる。そこで、浮体構造物や係留ドルフィンの将来的な健全性を定量的に予測診断し、ダメージに至りそうな箇所を未然に見つけて適切に補修し、長期的な維持管理を円滑に実施できるようにすることが必要となる。特に、浮体構造物からの負荷を受ける係留ドルフィンについては、正確な疲労状況を予測することが不可欠の要請となる。

【 0 0 0 5 】

このような係留ドルフィンの疲労被害予測診断については、従来より、例えば非特許文献 1 に記載されている方法が知られている。この方法は、浮体構造物に作用する外力（風力、波力、潮流力）を定常成分と変動成分に分離し、これら各々の成分に対する係留反力を足し合わせて、全体の係留反力を評価するものである。但し、この方法では、外力の変動成分を計算するに当たって、浮体構造物の運動の応答関数と統計理論を組み合わせて計算している。

【 0 0 0 6 】

【非特許文献 1】社団法人・日本造船研究協会、第 1 7 9 研究部会、『浅海域における箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムの設計基準に関する研究報告書』、1 9 8 3 年 3 月

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 7 】

前述した非特許文献 1 においては、外力の変動成分から係留反力を見積もる際に、浮体構造物の運動の応答関数と統計理論を組み合わせて計算しているため、線型理論の範囲内での取り扱いとなっている。しかしながら、実際の現象は非線形であるから、線型理論の範囲内で問題を取り扱っては、係留反力の見積もり精度が低い。そのため、係留ドルフィンの疲労状況を正確に予測することも困難である。

【 0 0 0 8 】

本発明は、前記の課題に鑑みてなされたものであって、浮体に作用する外力の非線形性や係留ドルフィンの非線形反力特性を考慮することで、係留ドルフィンの疲労被害予測をより正確に行なうことができる方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

本発明の係留ドルフィンの疲労被害予測方法は、液面上で浮体を係留する係留ドルフィ

10

20

30

40

50

ンの疲労被害を予測する方法であって、浮体及び係留ドルフィンの配置環境下における自然環境条件を取り込み（第1ステップ）、この自然環境条件に基づく環境外力が作用した際の浮体の運動状態を予測し（第2ステップ）、この運動状態に応じて浮体が係留ドルフィンから受ける係留反力を予測し（第3ステップ）、この係留反力から係留ドルフィン自体の受ける負荷を予測し（第4ステップ）、この係留ドルフィン自体の受ける負荷に基づき係留ドルフィン中の特定箇所の疲労度合いを予測し（第5ステップ）、前記第2ステップ中の浮体の運動状態を、非線形時系列シミュレーションを用いて予測することを特徴とする。

【0010】

本発明によれば、浮体に作用する外力の非線形性や係留ドルフィンの非線形反力特性を考慮した非線形時系列シミュレーションを実施することで、係留ドルフィンの疲労被害予測をより正確に行なうことができる。これにより、ダメージに至りそうな箇所を未然に見つけて適切に補修することができるので、係留ドルフィンの長期的な維持管理を円滑に実施することができる。

10

【0011】

本発明の係留ドルフィンの疲労被害予測方法においては、前記第2ステップ中の浮体の運動状態を、次式の運動方程式に基づき予測することが好ましい：

【数3】

$$[M + m_{ii}(\infty)] \frac{d^2}{dt^2} x_i(t) + F_{Vi} \left( \frac{d}{dt} x_i(t) \right) + \int_{-\infty}^t \frac{d}{dt} x_i(\tau) L_{ii}(t - \tau) d\tau + F_{Mi}(x_i) \\ = F_{Hi}^{(1)}(t) + F_{Hi}^{(2)}(t) + F_{Wi}(t) + F_{Ci}(t)$$

但し、

$$i = 1, 2, 6$$

$m_{ii}(\infty)$  : 周波数無限大での付加質量及び付加慣性モーメント、

$F_{Vi}$  : 粘性減衰力及びモーメント、

$L_{ii}$  : メモリー影響関数、

$F_{Mi}$  : 係留反力、

$F_{Hi}^{(1)}$  : 線形波力及びモーメント

$F_{Hi}^{(2)}$  : 長周期変動波力及びモーメント

$F_{Wi}$  : 風力及びモーメント

$F_{Ci}$  : 潮流力及びモーメント

である。

【0012】

本発明の係留ドルフィンの疲労被害予測方法においては、前記メモリー影響関数  $L_{ii}$  を、次式に基づき算出することが好ましい：

【数4】

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

但し、

$N_{ii}(\omega)$  : 造波減衰力係数

である。

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、浮体に作用する外力の非線形性や係留ドルフィンの非線形反力特性を考慮した非線形時系列シミュレーションを用いることで、係留ドルフィンの疲労被害予測をより正確に行なうことができ、係留ドルフィンの長期的な維持管理を円滑に実施できる効果がある。

30

50

## 【発明を実施するための形態】

## 【0014】

以下、本発明の実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。

図1(A)は本実施例に係る浮体及び係留ドルフィンを示す平面図であり、図1(B)は同浮体の側面図である。

図2は、同係留ドルフィンの全体構成を示す斜視図である。

図3は、同係留ドルフィンの詳細図である。(A)は平面図であり、(B)は側面図であり、(C)は正面図である。

## 【0015】

図1には、本実施例に係る浮体(メガフロート)10が示されている。この浮体10は、図1中に示す矢印x方向及びy方向に広がる長方形板状をしている。浮体10は、x方向に延びる岸壁に沿って配置されている。図1(B)に示すように、浮体10の沖側下端縁には、下方(水中)に垂下したカーテンウォール部11が形成されている。本実施例における浮体10の性状は、岸壁側長さ $L_1 = 203.0\text{ m}$ ・沖側長さ $L_2 = 201.5\text{ m}$ (公称長さ $200\text{ m}$ )、幅 $B = 100\text{ m}$ 、高さ $D = 3\text{ m}$ 、浮体主要部の喫水高さ $d = 1\text{ m}$ 、カーテンウォール部を含む喫水高さ $d = 2.5\text{ m}$ であって、横曲げ剛性が $2.037 \times 10^{10}\text{ Nm}$ 、縦曲げ剛性が $1.656 \times 10^{10}\text{ Nm}$ である。

10

## 【0016】

浮体10の両側部には、矩形状に抉られた切欠き部13が形成されている。各切欠き部13の内側には、係留ドルフィン20が配置されている。図2及び図3に詳細に示すように、本実施例の係留ドルフィン20は、水底から立ち上がった円柱状の主要杭21a~21h(計8本)を備えている。一对の主要杭21aと21b、21cと21d、21eと21f並びに21gと21hにより、係留ドルフィン20をなすジャケット構造の4側面が構成される。主要杭21a・21bで構成される面は、浮体10の切欠き部13の底辺に対向し、主要杭21c・21d、及び、21e・21fで構成される面は、浮体10の切欠き部13の両側辺に対向する(図1参照)。図2に示すように、主要杭21a~21hの上端寄りには矩形枠状の歩廊22が設けられており、この歩廊22の両側には手摺24が設けられている。

20

## 【0017】

図2及び図3に示すように、隣り合う各主要杭21a~21h間のそれぞれには、横梁23が架け渡されている。これらの横梁23は、主要杭21a~21hの高さ方向上端寄り、及び、高さ方向中央近くにおいて、合計16本架け渡されている。さらに、各主要杭21a~21hの内側には、水底から立ち上がった円柱状の仮受杭25(計4本)が設けられている(図2参照)。そして、これら仮受杭25の上側には、主要杭21a~21hの内側に架け渡された、井型に組まれた井型梁27が配置されている(図3(A)参照)。井型梁27は、主要杭21a~21hの高さ方向上端寄り、及び、高さ方向中央近くにおいて、合計2組架け渡されている。

30

## 【0018】

図2及び図3(C)に示すように、主要杭21aと21bの間において、それらを繋ぐ横梁23間には、さらに2本の縦梁28が架け渡されている。そして、これら縦梁28には、ハイブリッドフェンダー30が取り付けられている。このハイブリッドフェンダー30は、両縦梁28に固定される取付板に設置された係留力検出装置33を備えている。この係留力検出装置33には、直列に接続された定反力型フェンダー35及びエアフェンダー37が突設されている。これらフェンダー35、37間には接続板36が介装されており、エアフェンダー37の先端には受衝板39が取り付けられている。接続板36には、浮体10からハイブリッドフェンダー30に過剰な負荷がかかるのを防止するためのストッパー36aが形成されている。

40

## 【0019】

図3(B)にわかり易く示すように、主要杭21cと21d、並びに、21eと21fの間の奥側において、上下の井型梁27間には、さらに2本ずつの縦梁29が架け渡され

50

ている。そして、これら縦梁 29 には、二重フェンダー 40 が取り付けられている。二重フェンダー 40 は、主要杭 21c・21d 側、21e・21f 側のそれぞれに設けられており（図 3（A）、（C）参照）、両者とも同一構成である。

#### 【0020】

図 2 及び図 3（A）にわかり易く示すように、二重フェンダー 40 は、両縦梁 29 に固定される取付板に設置された係留力検出装置 43 を備えている。この係留力検出装置 43 には、直列に接続された 2 つの定反力型フェンダー 45、47 が突設されている。これらフェンダー 45、47 の先端には、受衝板 49 が取り付けられている。この受衝板 49 は、前述したエアフェンダー 37 の受衝板 39 よりも大きく形成されている。各二重フェンダー 40 の受衝板 49 は、シェアチェーン 51 を介して、主要杭 21a～21h に固定された支持部材 53 にも支持されている。

10

#### 【0021】

前述のハイブリッドフェンダー 30 の係留力検出装置 33、及び、両二重フェンダー 40 の係留力検出装置 43 は、制御装置に接続されている。この制御装置内では、図 4 に示す手順で、係留ドルフィン 10 の疲労被害を予測する。係留ドルフィンは、フェンダーの非線形反力特性や、浮体 10 の水平面内動揺の長周期運動等の非線形現象の影響を大きく受ける。本発明に係る方法は、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方法とは異なり、以下に述べる非線形シミュレーションを用いて疲労被害予測を行なうものである。

#### 【0022】

以下、図 4 を参照して、係留ドルフィンの疲労被害予測方法について説明する。

20

図 4 は、本実施例に係る係留ドルフィンの疲労被害予測方法の手順を示すフローチャートである。

図 4 に示すように、まずステップ S1 で、浮体 10 及び係留ドルフィン 20 の配置環境下における自然環境条件（波、潮流、風条件）を取り込み、ステップ S2 へと移行する。ステップ S2 では、ステップ S1 で取り込んだ自然環境条件に基づく環境外力が作用した際の浮体 10 の運動状態について、非線形時系列シミュレーションを実施し、ステップ S3 へと移行する。ステップ S3 では、ステップ S2 で実施された非線形時系列シミュレーションに応じて、浮体 10 が係留ドルフィン 20 から受ける係留反力時系列データを統計処理し、係留ドルフィン 20 自体の受ける負荷についての頻度データを用意する。次いで、ステップ S4 において、後述する図 7 等の S-N 線図（繰り返し外力と破壊までの繰り返し回数との関係）を取り込み、ステップ S5 へと移行する。

30

#### 【0023】

ステップ S5 では、ステップ S4 で取り込んだ S-N 線図と、ステップ S3 で得られた係留反力時系列データの統計処理結果から、後述する「数 9」式に基づいて係留ドルフィン 20 自体の受ける負荷（短期疲労被害の度合い）を計算する。次いで、ステップ S6 において、後述する「表 1」の長期波浪頻度表に基づき長期波浪頻度を取り込み、ステップ S7 へと移行する。そして、ステップ S7 では、ステップ S5 における短期疲労被害の度合いと、ステップ S6 における長期波浪頻度から、係留ドルフィン 20 の長期にわたる疲労被害を予測する。

40

#### 【0024】

以下、前述のフローチャート（図 4 参照）における各ステップの内容について詳細に説明する。

ステップ S1 で取り込む自然環境条件（波力、潮流力、風力）は、以下の通りとする。波条件は、本実施例では次の「表 1」に示す波浪頻度表

【表 1】

	周期(秒)									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
波高(m)	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	

に従うものとし、波高が 0.25 m ~ 3.25 m、波周期が 3.0 秒 ~ 11.0 秒までの範囲をとり得るものとする。なお、実際には、「表 1」のデータに限らず、考慮対象となる海域に応じた波浪頻度表を用意する。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ッドシュナイダー光易型スペクトルとし、方向分布関数としては光易型を用いるものとする。なお、波の方向集中度パラメータは、東京湾で一般的な 10 を用いるものとする。

20

潮流条件は、流向 0°、流速 0.5 ノットとする。

風条件については、前述の波条件から予測する。風向は波向と同一とし、1つの波条件に対して時間  $t_s$  が 3 時間分のシミュレーション計算を行なうものとする。

## 【0025】

ステップ S2 において行なう非線形時系列シミュレーションの内容について説明する。

まず、前述したような浮体 (メガフロート) の流体力係数、波浪外力及び係留反力特性の算定方法について説明する。

流体力係数としては、付加質量  $m_{jj}(\omega_j)$ 、造波減衰力係数  $N_{jj}(\omega_j)$  及び無次元粘性減衰力係数  $\alpha_j$  を求める必要がある。

30

付加質量  $m_{jj}(\omega_j)$  及び造波減衰力係数  $N_{jj}(\omega_j)$  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、動揺周波数ごとにデータベース化しておく。

無次元粘性減衰力係数  $\alpha_j$  は、自由動揺試験から求めることができる。この自由動揺試験は、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である。

## 【0026】

この無次元粘性減衰力係数  $\alpha_j$  は、以下の通りに定義される。すなわち、粘性減衰力  $N_{Vj}$  については、一般に速度の二乗に比例するが、本実施例に係る浮体のように広大な没水底面を有するもの場合には、速度  $(d/dt)x_j$  に比例する。但し、 $j = 1, 2, 6$  であって、 $j = 1$  は前後揺モード、 $j = 2$  は左右揺モード、 $j = 6$  は回頭揺モードをそれぞれ表す。ここで、浮体の水平面内動揺の特性周波数 (等価固有周波数) を  $\omega_{0j}$  とすると、無次元粘性減衰力係数  $\alpha_j$  は次式「数 5」で表される：

40

## 【数 5】

$$N_{Vj} = 2\alpha_j\omega_{0j}(M + m_{jj}(\omega_{0j}))$$

但し、

$M$  : 浮体の質量

$m_{jj}(\omega_{0j})$  : 水平面内動揺の付加質量である。

50

## 【 0 0 2 7 】

波浪外力については、本実施例のような浮体は波長に比べて喫水が非常に小さいので、浮体周囲における水位を用いて評価することができる（線型及び長周期変動波力）。

## 【 0 0 2 8 】

係留反力特性は、以下に述べる図 5 及び「数 6」に基づき決定する。

図 5 (A)、(B) は、本実施例に係る合成フェンダー（各々ハイブリッドフェンダー及び二重フェンダー）の反力特性を示すグラフである。

図 5 (A)、(B) の縦軸はそれぞれ係留反力（単位 kN）を示し、横軸はそれぞれ歪（単位 %）を示す。横軸の歪（%）は、フェンダー高さに対する変位量の比を歪量として表している。

## 【 0 0 2 9 】

前述の通り、本実施例の係留ドルフィン 20 においては、合成フェンダー（図 1 の x 方向のハイブリッドフェンダー 30（1 個）と、y 方向の二重フェンダー 40（2 個））を有している。図 5 (A) 及び (B) のグラフに示す特性をそれぞれ  $f_A$ 、 $f_B$  で表すと、係留反力特性  $F_{M1}$ 、 $F_{M2}$ 、 $F_{M6}$  は、次式「数 6」で表される：

## 【 数 6 】

$$\begin{aligned} F_{M1} &= f_A(x_1) \\ F_{M2} &= 2f_B(x_2) \\ F_{M6} &= 2l_0 f_B(l_0 x_6) \end{aligned}$$

但し、

$l_0$ ：浮体の回転中心から二重フェンダーと浮体の接点までの距離であり、指数の 1、2、6 については、前述の通り、1 が前後揺モード、2 が左右揺モード、6 が回頭揺モードをそれぞれ表す。

## 【 0 0 3 0 】

次に、前述の環境外力が作用した際の浮体の運動状態を予測する原理（浮体の水平面内動揺の時間領域運動方程式）について説明する。

浮体の面内剛性は十分大きいものとし、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、浮体の水平面内の運動方程式は、前述した流体力係数、波浪外力、係留反力特性を用いて、次式「数 7」で表される。この「数 7」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。

## 【 0 0 3 1 】

## 【 数 7 】

$$\begin{aligned} & [M + m_{ii}(\infty)] \frac{d^2}{dt^2} x_i(t) + F_{Vi} \left( \frac{d}{dt} x_i(t) \right) + \int_{-\infty}^t \frac{d}{dt} x_i(\tau) L_{ii}(t - \tau) d\tau + F_{Mi}(x_i) \\ &= F_{Hi}^{(1)}(t) + F_{Hi}^{(2)}(t) + F_{Wi}(t) + F_{Ci}(t) \end{aligned}$$

但し、

$i = 1, 2, 6$

$m_{ii}(\infty)$ ：周波数無限大での付加質量及び付加慣性モーメント、

$F_{Vi}$ ：粘性減衰力及びモーメント、

$L_{ii}$ ：メモリー影響関数、

$F_{Mi}$ ：係留反力、

$F_{Hi}^{(1)}$ ：線形波力及びモーメント

$F_{Hi}^{(2)}$ ：長周期変動波力及びモーメント

$F_{Wi}$ ：風力及びモーメント

$F_{Ci}$ ：潮流力及びモーメント

である。

## 【 0 0 3 2 】

なお、「数 7」におけるメモリー影響関数  $L_{ii}$  は、次式「数 8」に基づき算出することができる：

## 【 数 8 】

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

但し、

$N_{ii}(\ )$  : 造波減衰力係数

である。

10

## 【 0 0 3 3 】

ステップ S 3 における時系列データの統計処理について説明する。

本実施例における時系列データの統計処理は、次の ( 1 ) ~ ( 3 ) に示す要領で行なった。

( 1 ) 方向 ( = x、y ) の各々について、反力レベル  $F_{ii}$  ごとの極値頻度数  $n_{ii}$  を求める。

( 2 ) 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。

( 3 ) 極値頻度数のカウントは、反力の絶対値について行なう。

## 【 0 0 3 4 】

ステップ S 4 において取り込む S - N 線図について説明する。

20

図 6 は、本実施例に係る係留ドルフィンの構造解析モデルを示す図である。

図 7 は、図 6 の構造解析モデルを用いた S - N 特性の評価結果の一例を示すグラフである。

本実施例において、係留ドルフィンの S - N 特性の評価は、図 6 に示す有限要素モデルを作成して行なった。本実施例では、地盤条件をも考慮した上で、図 6 中に矢印で示す x 方向及び y 方向に外力を加えた際に最大応力が発生する点 ( 疲労損傷の著しい箇所 ) として、主要杭 2 1 a、2 1 b、2 1 g、2 1 h と、それらを繋ぐ下横梁 2 3、井型梁 2 7 との格子点 ( 図 6 中の格子点 LP 1、LP 2、LP 3、LP 4 ) を抽出して S - N 特性を求めた。なお、図 6 中に符号 3 0 で示すものが前述のハイブリッドフェンダーに相当し、符号 4 0 で示すものが前述の二重フェンダーに相当する。

30

## 【 0 0 3 5 】

図 7 は、前述の各格子点のうち、主要杭 2 1 a 上の格子点 LP 4 について求めた S - N 線図である。このグラフは、具体的には以下 ( 1 )、( 2 ) の通りに求めた。

( 1 ) 各フェンダーに 9 8 k N 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 解析により求める。この際、応力集中係数は、( 財 ) 沿岸開発技術センター編、「ジャケット工法技術マニュアル」、2 0 0 0 年発行、の標準値を用いた。

( 2 ) 応力変動幅に対する許容繰り返し回数を、前述の「ジャケット工法技術マニュアル」の第 3 9 ページを参照して求めた。

## 【 0 0 3 6 】

ステップ S 5 における短期疲労被害の度合いの計算について説明する。

40

ステップ S 5 における短期疲労被害度は、マイナー則を用いて、次式「数 9」に基づき計算する。計算結果は、波高、周期ごとのそれぞれについてデータベース化を行なう。

## 【 数 9 】

$$D_{\beta}(H, T) = \sum_i \frac{n_{\beta_i}(H, T)}{N_{\beta_i}}$$

但し、

= x、y

$N_{ii}$  :  $F_{ii}$  に対する許容繰り返し数

であり、 $N_{ii}$  のデータについては、前述した図 7 等の各格子点における S - N 線図を用

50

いるものとする。

【 0 0 3 7 】

ステップ S 6 において取り込む長期波浪頻度表は、前述の「表 1」に示す波浪頻度表に基づくものとする。

【 0 0 3 8 】

ステップ S 7 における長期疲労被害の度合いの計算について説明する。

ステップ S 7 における長期疲労被害度の算定は、前述のステップ S 5 におけるデータベースを用い、次式「数 1 0」に基づき算定した：

【 数 1 0 】

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

但し、

$f(H_j, T_k)$  : 年間に、有義波高  $H_j$ 、平均波周期  $T_k$  である海象が発生する延べ時間

である。この延べ時間  $f(H_j, T_k)$  は、ステップ S 6 で取り込んだ長期波浪頻度表から求めることができる。

【 0 0 3 9 】

次に、本発明者らが行なった水槽模型試験について述べる。

この水槽模型試験は、独立行政法人・海上技術安全研究所内の海洋構造物試験水槽（長さ 40 m × 幅 2.7 m）を用いて行なった。供試模型の縮尺は 1 / 50 とし、その性状は、公称長さ 4000 mm、幅  $B = 2000$  mm、高さ  $D = 70$  mm、浮体主要部の喫水高さ  $d = 20$  mm、カーテンウォール部を含む喫水高さ  $d = 50$  mm であって、横曲げ剛性・縦曲げ剛性がともに 715 N m である。

【 0 0 4 0 】

この試験に用いた模型（水槽実験用浮体）の主構造は、厚さ 5 mm のアルミ平板であり、この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。模型側面には、深さ 3 cm、スリット幅 0.5 cm の波エネルギー吸収装置（カーテンウォール）を取り付けた。さらに、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。

水槽実験用浮体を係留する係留装置としては、前述した図 2、図 3 に示すような係留ドラフィン方式であって、図 5 に示す通りのフェンダー反力特性を有する模型を作成した。

【 0 0 4 1 】

図 8 は、本実施例に係る水槽模型試験における計測位置を説明する図である。

図 8 には、各計測項目に対応した計測装置の設置位置が示されている。各計測項目とその計測装置は、

- ・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並びにフェンダー変位：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

の通りである（図 8 下側参照）。

【 0 0 4 2 】

水槽模型試験は、（ 1 ）開水域（水深が実機相当で 20 m）の場合、（ 2 ）岸壁が平板の場合、（ 3 ）岸壁が実機と同じく円筒ケーソンの場合、の 3 通りの状態を想定して行なった。前述の波エネルギー吸収装置については、これら（ 1 ）～（ 3 ）の各状態について、波エネルギー吸収装置がある場合とない場合とで計測を行なった。なお、この波エネルギー吸収装置として、スリット（実機相当で 0.25 m 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。

20

30

40

50

【 0 0 4 3 】

【表 2】

岸壁の状態	減揺板	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				

「表 2」には、水槽模型試験の計測条件が示されている。この「表 2」中の不規則波とは、左から順に、設置海域における 2、10、50 年確率波である。さらに、波向きは設置海域における主方向である 63.8°とした。なお、波向き の定義は、図 8 の上側に示す角度を意味する。さらに、この水槽模型試験の他に、水槽実験用浮体の自由動揺試験も併せて行なった。

20

【 0 0 4 4 】

図 9 は、本実施例に係る水槽模型試験における不規則波（10 年確率波）中のフェンダー変位の時系列データの一部を示すグラフである。

図 9 に示す時系列グラフにおいて、縦軸はフェンダー変位（単位 m）を表し、横軸は時刻（単位 sec）を表す。次の「表 3」は、この不規則波（10 年確率波）中の各フェンダーの最大変位（有義波高 2.6 m、波周期 5.5 sec）を示す。

【表 3】

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

【 0 0 4 5 】

次いで、このような不規則波（10 年確率波）の水槽模型実験に対応して、前述した図 4 のフローチャートに基づき非線形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データの統計処理を行なって、係留反力の標準偏差、最大値を推定した。この推定結果の一例を次の「表 4」に示す。

【表 4】

		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
	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
	最大値	2545.02	960.45	1284.80	597.62	737.42	171.02

【 0 0 4 6 】

50

この「表 4」において、係留反力の番号（No.）は、前述した図 8 中のフェンダー番号に相当する。「表 4」中の値は全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波エネルギー吸収装置がある場合である。本ケースにおける推定結果は、No. 5 の係留反力の計測結果とは若干の差があるが、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よ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、浮体の水平面内動揺の粘性減衰力係数に関しては、前述した自由動揺試験の結果を用いている。

【 0 0 4 7 】

次に、本発明者らが行なった実海域実証実験について述べる。

本実験では、図 1 の浮体 10 上で、波高計、風速計、KGPS、加速度計、水圧計、歪みゲージ等を用い、自然環境、浮体挙動等を計測した。

10

図 10 は、本実施例に係る実海域実証実験における計測位置を説明する図である。

図 11 は、本実海域実証実験における GPS の測定値から求めた浮体の挙動と、本発明の疲労被害予測方法を用いて予測した浮体の挙動とを比較して示すグラフである。（A）の縦軸はヨー角（単位 deg）、横軸は時間（単位 sec）を示し、（B）の縦軸は浮体の揺れ（単位 mm）、横軸は時間（単位 sec）を示す。

【 0 0 4 8 】

図 10 には、本実海域実証実験における浮体上での各計測器の設置位置が示されている。本実験では、水圧計（P1～P13：計 13 個）、相対水位計（RW1～RW5：計 5 個）、風速計（計 2 個）、加速度計（G1～G12：計 12 個）、KGPS（KGP0～KGP2：計 3 個）を用い、その他必要に応じて波高計や歪みゲージ等を用いている。

20

【 0 0 4 9 】

図 11（A）、（B）に示す実験結果から明らかなように、本発明に係る浮体の水平面内挙動予測結果（点線で示すグラフ）と、実海域実証実験において GPS で実際に測定した浮体の水平面内挙動（実線で示すグラフ）との比較を示すと、両曲線はよく一致していることがわかる。このように、浮体の挙動を正確に予測することができるので、係留ドルフィンの疲労被害予測をより正確に行なうことができるといえる。したがって、実際上は、係留ドルフィンのダメージに至りそうな箇所を未然に見つけて適切に補修することができるので、係留ドルフィンの長期的な維持管理を円滑に実施することができるといえる。

【 図面の簡単な説明 】

30

【 0 0 5 0 】

【図 1】図 1（A）は本実施例に係る浮体及び係留ドルフィンを示す平面図であり、図 1（B）は同浮体の側面図である。

【図 2】同係留ドルフィンの全体構成を示す斜視図である。

【図 3】同係留ドルフィンの詳細図である。（A）は平面図であり、（B）は側面図であり、（C）は正面図である。

【図 4】本実施例に係る係留ドルフィンの疲労被害予測方法の手順を示すフローチャートである。

【図 5】本実施例に係る合成フェンダー（各々ハイブリッドフェンダー及び二重フェンダー）の反力特性を示すグラフである。

40

【図 6】本実施例に係る係留ドルフィンの構造解析モデルを示す図である。

【図 7】図 6 の構造解析モデルを用いた S - N 特性の評価結果の一例を示すグラフである。

【図 8】本実施例に係る水槽模型試験における計測位置を説明する図である。

【図 9】本実施例に係る水槽模型試験における不規則波（10 年確率波）中のフェンダー変位の時系列データの一例を示すグラフである。

【図 10】本実施例に係る実海域実証実験における計測位置を説明する図である。

【図 11】本実海域実証実験における GPS の測定値から求めた浮体の挙動と、本発明の疲労被害予測方法を用いて予測した浮体の挙動とを比較して示すグラフである。

【図 12】石油を備蓄するタンクを洋上で係留する方式の一例を示す模式図である。

50

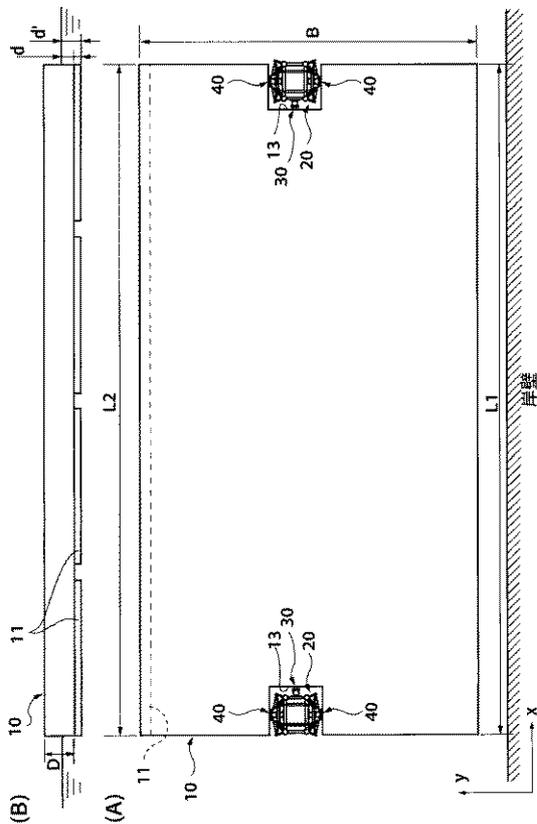
【符号の説明】

【0051】

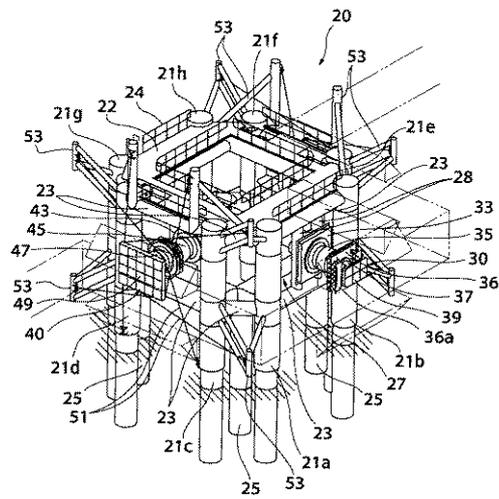
- 10 浮体（メガフロート）
- 13 切欠き部
- 21 a ~ 21 h 主要杭
- 25 仮受杭
- 28、29 縦梁
- 30 ハイブリッドフェンダー
- 35 定反力型フェンダー
- 39 受衝板
- 40 二重フェンダー
- 45、47 定反力型フェンダー

- 11 カーテンウォール部
- 20 係留ドルフィン
- 23 横梁
- 27 井型梁
- 33 係留力検出装置
- 37 エアフェンダー
- 43 係留力検出装置
- 49 受衝板

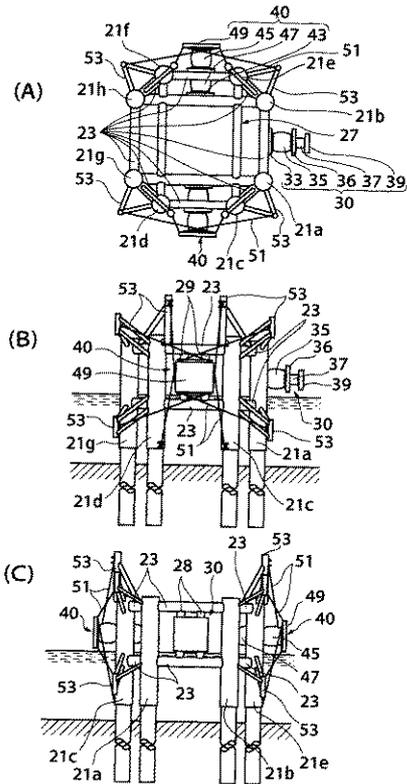
【図1】



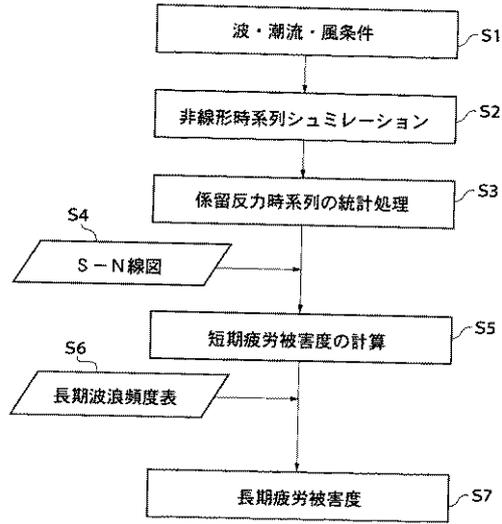
【図2】



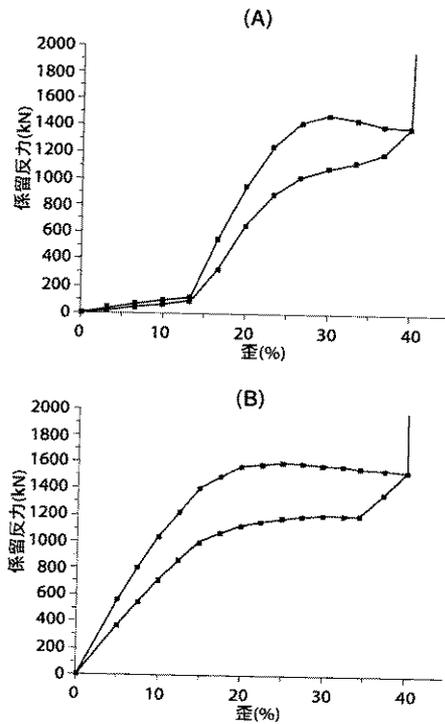
【 図 3 】



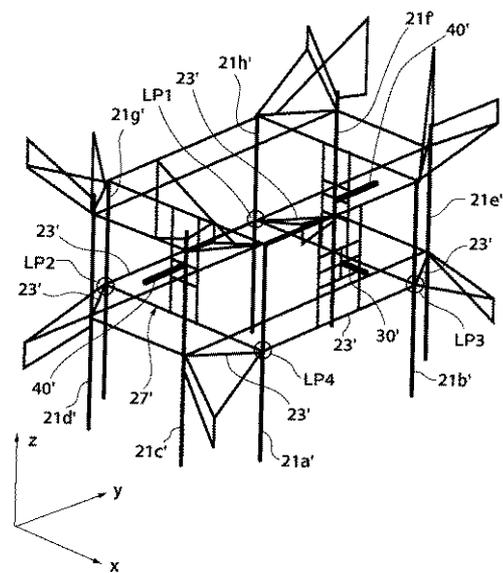
【 図 4 】



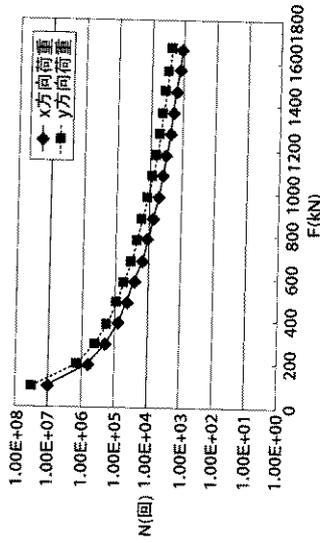
【 図 5 】



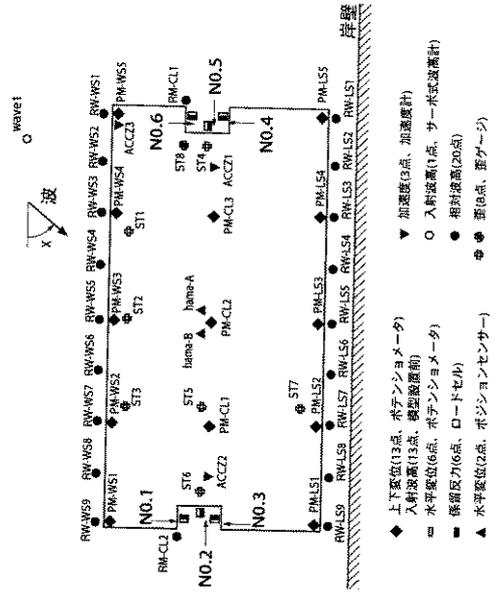
【 図 6 】



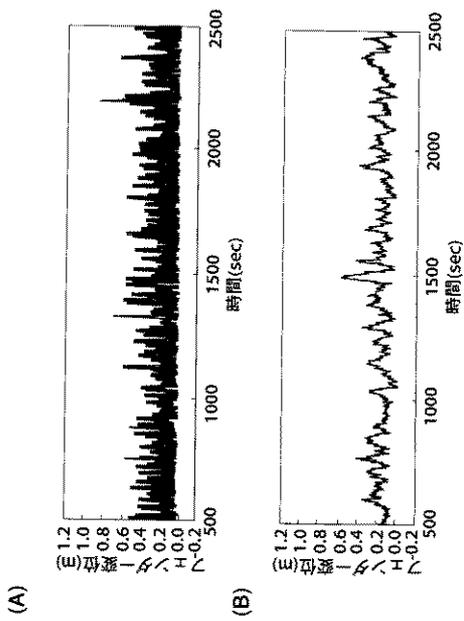
【 図 7 】



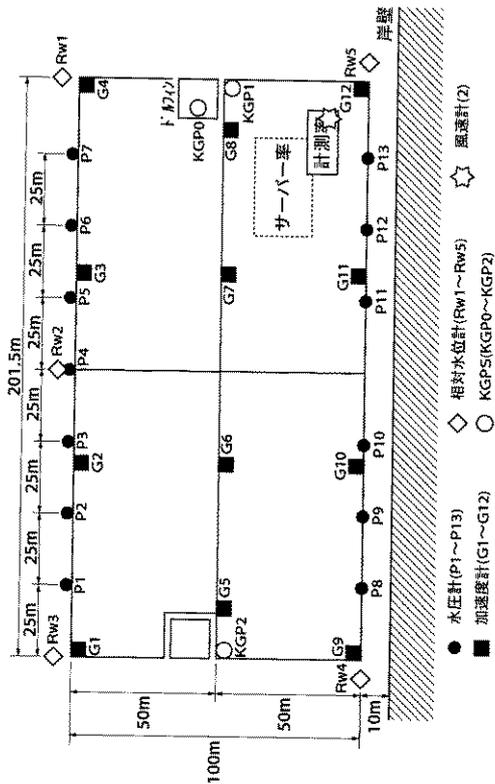
【 図 8 】



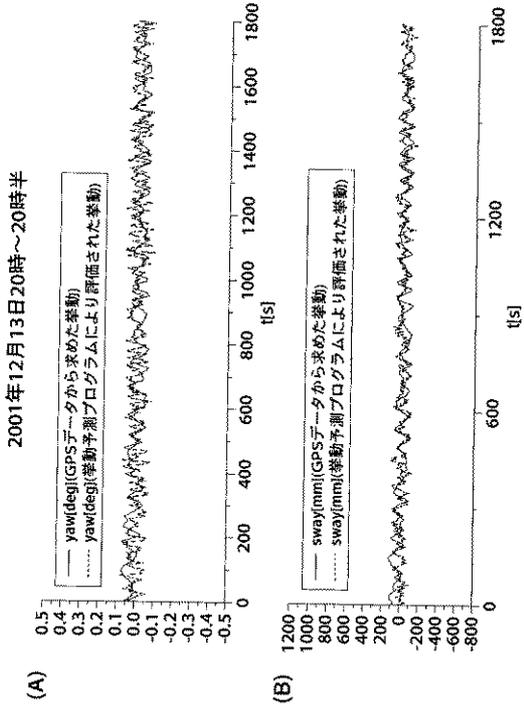
【 図 9 】



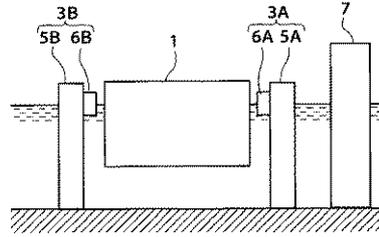
【 図 10 】



【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



フロントページの続き

【要約の続き】

【選択図】 図4