

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6463028号  
(P6463028)

(45) 発行日 平成31年1月30日(2019.1.30)

(24) 登録日 平成31年1月11日(2019.1.11)

(51) Int. Cl.		F I	
<b>FO3D 80/50</b>	<b>(2016.01)</b>	FO3D	80/50
<b>FO3D 9/30</b>	<b>(2016.01)</b>	FO3D	9/30

請求項の数 24 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2014-157917 (P2014-157917)	(73) 特許権者	501204525
(22) 出願日	平成26年8月1日(2014.8.1)		国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
(65) 公開番号	特開2015-45329 (P2015-45329A)		東京都三鷹市新川6丁目38番1号
(43) 公開日	平成27年3月12日(2015.3.12)	(74) 代理人	100098545
審査請求日	平成29年7月25日(2017.7.25)		弁理士 阿部 伸一
(31) 優先権主張番号	特願2013-160386 (P2013-160386)	(74) 代理人	100087745
(32) 優先日	平成25年8月1日(2013.8.1)		弁理士 清水 善廣
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(74) 代理人	100106611
			弁理士 辻田 幸史
		(74) 代理人	100111006
			弁理士 藤江 和典
		(74) 代理人	100116241
			弁理士 金子 一郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 浮体施設の荷重・応力モニタリング方法及び浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

浮体施設の稼働時の浮体運動及び／又は気象・海象条件を含む前記浮体施設の全体挙動に係る指標の計測に基づいて、前記浮体施設の複数のモニタリング部位の荷重又は応力をリアルタイムで推定するにあたり、前記浮体施設の前記全体挙動に係る指標の計測結果から前記浮体施設の慣性力及び係留力を求め、前記慣性力及び前記係留力と力学的にバランスする前記浮体施設に働く外力を仮定し、前記外力から前記荷重又は前記応力を求めることを特徴とする浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

【請求項2】

前記浮体運動及び／又は前記全体挙動に係る前記指標を、前記浮体施設に備えた計測手段により計測して求めることを特徴とする請求項1に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

【請求項3】

前記荷重又は前記応力の推定値の履歴を基に、複数の前記モニタリング部位の疲労余寿命を評価することを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

【請求項4】

複数の前記モニタリング部位のうちの前記疲労余寿命の一番少ない前記モニタリング部位に基づいて点検保守の時期を判断することを特徴とする請求項3に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

10

20

## 【請求項 5】

前記荷重又は前記応力の前記推定値の時系列傾向から前記荷重又は前記応力及び / 又は前記疲労余寿命の将来的な変化を予測することを特徴とする請求項 3 又は請求項 4 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 6】

前記荷重又は前記応力の前記推定値及び / 又は前記疲労余寿命の評価値に基づいて警報を発生することを特徴とする請求項 3 から請求項 5 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 7】

前記荷重又は前記応力の前記推定値及び / 又は前記疲労余寿命の評価値に基づいて前記浮体施設の運転を制御することを特徴とする請求項 3 から請求項 6 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 8】

複数の前記モニタリング部位の前記応力の推定値は、前記モニタリング部位ごとに構造解析によって求めた荷重から応力への変換係数を使用することを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 9】

複数の前記モニタリング部位の前記荷重の推定値は、次の数式 ( 1 ) に基づいて求めることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

$$\text{数式 ( 1 ) : } \{ F_i \} = [ A_{ij} ] \{ x_j \} + [ B_{ij} ] \{ \dot{x}_j \} + [ C_{ij} ] \{ \ddot{x}_j \}$$

ただし、 $\{ F_i \}$  は荷重、 $\{ x_j \}$  は変位、 $\{ \dot{x}_j \}$  は速度、 $\{ \ddot{x}_j \}$  は加速度、 $[ A_{ij} ]$  と  $[ B_{ij} ]$  と  $[ C_{ij} ]$  は運動 - 荷重相関マトリックス、 $i$  は荷重の種類、 $j$  は浮体運動の 6 自由度とする。

## 【請求項 10】

前記運動 - 荷重相関マトリックスを、6 自由度の前記浮体運動の応答関数及び前記荷重の応答関数を求めるステップ 1 と、前記浮体運動の応答関数の 1 階微分及び 2 階微分を用意するステップ 2 と、前記荷重の応答関数と、前記浮体運動の応答関数に基づく前記変位の応答関数と、用意した前記 1 階微分及び前記 2 階微分とを数式 ( 1 ) に代入し、前記運動 - 荷重相関マトリックスの値を同定するステップ 3 とによって求めることを特徴とする請求項 9 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 11】

前記ステップ 3 で得られた前記運動 - 荷重相関マトリックスの値及び実際の前記浮体運動の時系列データを用いて、複数の前記モニタリング部位の各剪断力が作用する方向と平行な断面に生じる前記荷重の時系列データを算出するステップ 4 を更に備えることを特徴とする請求項 10 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 12】

前記浮体運動の応答関数と前記荷重の応答関数は、水槽試験又は数値計算より求めることを特徴とする請求項 10 又は請求項 11 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

## 【請求項 13】

複数の前記モニタリング部位の前記応力の推定値は、次の数式 ( 2 ) に基づいて求めることを特徴とする請求項 1、請求項 2、又は請求項 9 から請求項 12 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

$$\text{数式 ( 2 ) : } \{ \sigma_k \} = [ D_{ki} ] \{ f_i \}$$

ただし、 $\{ \sigma_k \}$  は応力、 $\{ f_i \}$  は単位荷重、 $[ D_{ki} ]$  は荷重 - 応力相関マトリックス、 $k$  はモニタリング部位、 $i$  は荷重の種類とする。

10

20

30

40

50

**【請求項 1 4】**

前記荷重 - 応力相関マトリックスを、  
前記浮体施設の前記モニタリング部位を含む有限要素モデルを作成し、モデル境界に単位荷重を作用させるステップ 5 と、  
前記単位荷重の載荷時の前記モニタリング部位における前記応力を算出し前記荷重 - 応力相関マトリックスの値を同定するステップ 6 と  
により求めることを特徴とする請求項 1 3 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

**【請求項 1 5】**

前記ステップ 6 で得られた前記荷重 - 応力相関マトリックスの値及び前記ステップ 4 で算出した前記荷重の時系列データを用いて、推定した前記荷重が断面力として作用した際の前記モニタリング部位に生じる前記応力の時系列データを算出するステップ 7 を備えることを特徴とする請求項 1 1 を引用する請求項 1 4 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

**【請求項 1 6】**

前記ステップ 7 で得られた前記応力の時系列データを基に疲労被害度を算出し、前記モニタリング部位の累積疲労被害度を算出し、前記累積疲労被害度の現状値と許容値との差で疲労余寿命を評価することを特徴とする請求項 1 5 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法。

**【請求項 1 7】**

浮体施設の稼働時の浮体運動及び / 又は気象・海象条件を含む前記浮体施設の全体挙動に係る指標の計測を行う計測手段と、前記計測手段の計測値に基づいて前記浮体施設の慣性力及び係留力を求め、前記慣性力及び前記係留力と力学的にバランスする前記浮体施設に働く外力を仮定し、前記外力から前記浮体施設における複数のモニタリング部位の荷重又は応力を推定する荷重・応力推定手段と、前記荷重・応力推定手段の推定結果を出力する出力手段とを備えたことを特徴とする浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 1 8】**

前記荷重又は前記応力の推定値の履歴を記録する履歴記録手段を更に備えたことを特徴とする請求項 1 7 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 1 9】**

前記履歴記録手段で記録された前記荷重又は前記応力の前記推定値の前記履歴を基に、複数の前記モニタリング部位の疲労余寿命を評価する疲労余寿命評価手段を更に備えたことを特徴とする請求項 1 8 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 2 0】**

前記疲労余寿命評価手段は、前記モニタリング部位のうちの前記疲労余寿命の一番少ない前記モニタリング部位に基づいて点検保守の時期を判断することを特徴とする請求項 1 9 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 2 1】**

前記荷重・応力推定手段及び / 又は前記疲労余寿命評価手段は、前記荷重又は前記応力の前記推定値の時系列傾向から前記荷重又は前記応力及び / 又は前記疲労余寿命の将来的な変化を予測することを特徴とする請求項 1 9 又は請求項 2 0 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 2 2】**

前記荷重・応力推定手段による前記荷重又は前記応力の前記推定値及び / 又は前記疲労余寿命評価手段による前記疲労余寿命の評価値に基づいて警報を行う警報手段を更に備えたことを特徴とする請求項 1 9 から請求項 2 1 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

**【請求項 2 3】**

前記荷重・応力推定手段による前記荷重又は前記応力の前記推定値及び / 又は前記疲労余寿命評価手段による前記疲労余寿命の評価値に基づいて、前記浮体施設の運転を制御す

る運転制御手段を更に備えたことを特徴とする請求項 1 9 から請求項 2 2 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

【請求項 2 4】

前記荷重・応力推定手段及び／又は前記疲労余寿命評価手段と前記出力手段は、前記浮体施設と離隔した場所に設けたことを特徴とする請求項 1 9 から請求項 2 3 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、構造的な弱点箇所に対するモニタリングができる浮体施設の荷重・応力モニタリング方法及び浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムに関する。 10

【背景技術】

【0002】

一般的な建造物の維持管理は、定期点検及び定期保守の概念を基に実施される。しかし、定期点検及び定期保守の施工では、必ずしも一定の残余信頼性を担保することにはならない。破損を防止する上で点検保守のインターバルは安全サイドに設定されるため、不必要な剰余安全性が発生している。

浮体式洋上風力発電施設等では、点検保守の頻度を必要十分にするため、残余信頼性を精度良く且つ遠隔でモニタリングすることが求められる。

例えば、浮体式洋上発電施設の構造上の弱点としては、タワー開口部などがある。タワー開口部においては、疲労亀裂が発生したり、当該部の座屈を起点とする全体倒壊が発生した例がある。 20

これらの構造上の弱点箇所に対して、応力履歴等を常時累積的にモニタリングする手法が求められているが、実用的な手法の開発には至っていない。

【0003】

特許文献 1 には、風力発電設備の定期メンテナンスが、十分な安全率を考慮した一定期間のメンテナンス周期を設定して運用されてきたため、必要以上に短いメンテナンス間隔でメンテナンスを実施する傾向があったことに着目し、運転状態監視手段が取得した風力発電設備の稼働実績と、あらかじめ設定した風力発電設備のメンテナンス条件に基づいて、実際の稼働状況がメンテナンスの必要となる稼働量に達しているか否かを判定することが記載されている。 30

【0004】

特許文献 2 には、風車の評価対象部位に作用する荷重時系列データを求め、この荷重時系列データから応力時系列データを求め、応力時系列データに基づく応力を評価対象部位補償運用期間にわたって与えた場合に、評価対象部位が所定の強度を維持するために最低限必要とされる破壊靱性値を求め、これに基づいて指標となる要求破壊靱性値を決定することが記載されている。

【0005】

特許文献 3 には、船体の一部として構造化された液化ガスタンクを支持する支持構造の複数箇所に応力を計測する複数の歪み計と加速度計を配置し、これらの歪み計と加速度計からの電気信号に基づいて応力を計算し、余寿命を評価することが記載されている。 40

【0006】

特許文献 4 には、船体の応力を応力検出手段で検出し、蓄積手段で応力検出手段の検出情報を蓄積するとともに、航行時の船舶の状態を船舶状態導出手段で導出し、航行中における船舶の応力情報及び船舶状態の情報に基づいて船体構造体の健全性を推定評価することが記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献 1】特開 2 0 0 6 - 3 4 2 7 6 6 号公報

【特許文献 2】国際公開第 2010/038305 号

【特許文献 3】特開 2005-3554 号公報

【特許文献 4】特開 2002-326598 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

特許文献 1 では、風力発電設備の稼働実績として、発電量、風車の回転回数、実稼働時間等を計測している（段落番号（0009））。そして、メンテナンス条件としての稼働時間と風車の回転回数の設定値と、稼働実績としての稼働時間と風車の回転回数の実績値を比較している（段落番号（0014））。

10

従って、特許文献 1 では、浮体施設の浮体運動や浮体施設の全体挙動を計測するものではなく、また構造的な弱点箇所に対するモニタリングをするものではない。

【0009】

特許文献 2 は、部材の耐久性に関連した評価指標の適正値をシミュレーションによって求めるもので、実際の浮体施設の浮体運動や浮体施設の全体挙動を計測するものではない。

【0010】

特許文献 3 のように歪み計を用いる方法は、構造的な弱点箇所における応力を計測することには適しているが、浮体施設では、構造的な弱点箇所は多数存在することから、一部の弱点箇所だけの計測では十分でなく、浮体施設の浮体運動や浮体施設の全体挙動を計測するものとして用いることは現実的にはできない。また、歪み計の寿命の問題もあり、定期的に入渠を行えない浮体施設にあっては、長期間の信頼性を確保することができない。

20

【0011】

特許文献 4 における船舶状態導出手段は、風向を検出する風向検出手段、船体の船首方位を計測する方位計測手段、船体のローリングやピッチングを検出する傾斜検出手段、及び船首の上下加速度を検出する上下加速度検出手段から構成されている。すなわち、船舶状態導出手段を構成する手段を用いることで、船体の稼働時における浮体運動を推測することができる。

しかし、特許文献 4 では、応力検出手段で検出する応力を、船舶状態導出手段による情報に基づいて補正演算することで、応力検出手段を設置していない箇所の応力を推測するものであり、船舶状態導出手段によって船体の稼働時における浮体運動を計測するものではない（段落番号（0033））。

30

【0012】

本発明は、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、浮体施設の浮体運動をはじめとした全体挙動に係る限られた指標を計測するのみで、多数の構造的な弱点箇所に対するモニタリングができる浮体施設の荷重・応力モニタリング方法及び浮体施設の荷重・応力モニタリングシステム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】

【0013】

請求項 1 記載の本発明に対応した浮体施設の荷重・応力モニタリング方法においては、浮体施設の稼働時の浮体運動及び / 又は気象・海象条件を含む浮体施設の全体挙動に係る指標の計測に基づいて、浮体施設の複数のモニタリング部位の荷重又は応力をリアルタイムで推定するにあたり、浮体施設の全体挙動に係る指標の計測結果から浮体施設の慣性力及び係留力を求め、慣性力及び係留力と力学的にバランスする浮体施設に働く外力を仮定し、外力から荷重又は応力を求めることを特徴とする。請求項 1 に記載の本発明によれば、浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を計測するのみで、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、モニタリング部位、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対するモニタリングをリアルタイムで行うことができる。また、求めた慣性力及び / 又は係留力と端部条件を満たす外力を仮定することで、合理的な荷重を簡便に推定することができる。

40

50

## 【 0 0 1 4 】

請求項 2 記載の本発明は、請求項 1 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、全体挙動に係る指標を、浮体施設に備えた計測手段により計測して求めることを特徴とする。請求項 2 に記載の本発明によれば、浮体施設に備えた計測手段で浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を直接計測することができる。

## 【 0 0 1 5 】

請求項 3 記載の本発明は、請求項 1 又は請求項 2 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、荷重又は応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位の疲労余寿命を評価することを特徴とする。請求項 3 に記載の本発明によれば、荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価することができる。

## 【 0 0 1 6 】

請求項 4 記載の本発明は、請求項 3 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、複数のモニタリング部位のうちの疲労余寿命の一番少ないモニタリング部位に基づいて点検保守の時期を判断することを特徴とする。請求項 4 に記載の本発明によれば、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

## 【 0 0 1 7 】

請求項 5 記載の本発明は、請求項 3 又は請求項 4 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、荷重又は応力の推定値の時系列傾向から荷重又は応力及び / 又は疲労余寿命の将来的な変化を予測することを特徴とする。請求項 5 に記載の本発明によれば、荷重・応力や疲労余寿命の将来予測を行うことで、危険状態に入る前に的確に対処できる。

## 【 0 0 1 8 】

請求項 6 記載の本発明は、請求項 3 から請求項 5 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、荷重又は応力の推定値及び / 又は疲労余寿命の評価値に基づいて警報を発することを特徴とする。請求項 6 に記載の本発明によれば、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

## 【 0 0 1 9 】

請求項 7 記載の本発明は、請求項 3 から請求項 6 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、荷重又は応力の推定値及び / 又は疲労余寿命の評価値に基づいて浮体施設の運転を制御することを特徴とする。請求項 7 に記載の本発明によれば、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

## 【 0 0 2 0 】

請求項 8 記載の本発明は、請求項 1 から請求項 7 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、複数のモニタリング部位の応力の推定値は、モニタリング部位ごとに構造解析によって求めた荷重から応力への変換係数を使用することを特徴とする。請求項 8 に記載の本発明によれば、それぞれの弱点箇所、すなわちモニタリング部位ごとに応力を合理的に推定することができる。

## 【 0 0 2 1 】

請求項 9 記載の本発明は、請求項 1 又は請求項 2 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、複数のモニタリング部位の荷重の推定値は、次の数式 ( 1 ) に基づいて求めることを特徴とする。

$$\text{数式 ( 1 ) : } \{ F_i \} = [ A_{ij} ] \{ x_j \} + [ B_{ij} ] \{ x_j' \} + [ C_{ij} ] \{ x_j'' \}$$

ただし、 $\{ F_i \}$  は荷重、 $\{ x_j \}$  は変位、 $\{ x_j' \}$  は速度、 $\{ x_j'' \}$  は加速度、 $[ A_{ij} ]$  と  $[ B_{ij} ]$  と  $[ C_{ij} ]$  は運動 - 荷重相関マトリックス、 $i$  は荷重の種類、 $j$  は浮体運動の 6 自由度とする。請求項 9 に記載の本発明によれば、定められた計算式を用いて荷重を簡便に推定することができる。

## 【 0 0 2 2 】

10

20

30

40

50

請求項 1 0 記載の本発明は、請求項 9 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、運動 - 荷重相関マトリックスを、6 自由度の浮体運動の応答関数及び荷重の応答関数を求めるステップ 1 と、浮体運動の応答関数の 1 階微分及び 2 階微分を用意するステップ 2 と、荷重の応答関数と、浮体運動の応答関数に基づく変位の応答関数と、用意した 1 階微分及び 2 階微分を数式 ( 1 ) に代入し、運動 - 荷重相関マトリックスの値を同定するステップ 3 とによって求めることを特徴とする。請求項 1 0 に記載の本発明によれば、モニタリング部位によって異なる荷重の推定値を得る運動 - 荷重相関マトリックスを、簡便に求めることができる。

【 0 0 2 3 】

請求項 1 1 記載の本発明は、請求項 1 0 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、ステップ 3 で得られた運動 - 荷重相関マトリックスの値及び実際の浮体運動の時系列データを用いて、複数のモニタリング部位の各剪断力が作用する方向と平行な断面に生じる荷重の時系列データを算出するステップ 4 を更に備えることを特徴とする。請求項 1 1 に記載の本発明によれば、荷重の時系列データを算出し、浮体施設に生じる荷重の傾向を知ることができる。

【 0 0 2 4 】

請求項 1 2 記載の本発明は、請求項 1 0 又は請求項 1 1 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、浮体運動の応答関数と荷重の応答関数は、水槽試験又は数値計算より求めることを特徴とする。請求項 1 2 に記載の本発明によれば、計算に必要な応答関数をあらかじめ簡便に求めることができる。

【 0 0 2 5 】

請求項 1 3 記載の本発明は、請求項 1 、請求項 2 、又は請求項 9 から請求項 1 2 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、複数のモニタリング部位の応力の推定値は、次の数式 ( 2 ) に基づいて求めることを特徴とする。

数式 ( 2 ) :  $\{ \sigma_k \} = [ D_{ki} ] \{ f_i \}$

ただし、 $\{ \sigma_k \}$  は応力、 $\{ f_i \}$  は単位荷重、 $[ D_{ki} ]$  は荷重 - 応力相関マトリックス、 $k$  はモニタリング部位、 $i$  は荷重の種類とする。請求項 1 3 に記載の本発明によれば、定められた計算式を用いて応力を簡便に推定することができる。

【 0 0 2 6 】

請求項 1 4 記載の本発明は、請求項 1 3 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、荷重 - 応力相関マトリックスを、浮体施設のモニタリング部位を含む有限要素モデルを作成し、モデル境界に単位荷重を作用させるステップ 5 と、単位荷重の載荷時のモニタリング部位における応力を算出し荷重 - 応力相関マトリックスの値を同定するステップ 6 とにより求めることを特徴とする。請求項 1 4 に記載の本発明によれば、モニタリング部位によって異なる応力の推定値を得る荷重 - 応力相関マトリックスを、簡便に求めることができる。

【 0 0 2 7 】

請求項 1 5 記載の本発明は、請求項 1 1 を引用する請求項 1 4 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、ステップ 6 で得られた荷重 - 応力相関マトリックスの値及びステップ 4 で算出した荷重の時系列データを用いて、推定した荷重が断面力として作用した際のモニタリング部位に生じる応力の時系列データを算出するステップ 7 を備えることを特徴とする。請求項 1 5 に記載の本発明によれば、応力の時系列データを算出し、浮体施設に生じる応力の傾向を知ることができる。

【 0 0 2 8 】

請求項 1 6 記載の本発明は、請求項 1 5 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法において、ステップ 7 で得られた応力の時系列データを基に疲労被害度を算出し、モニタリング部位の累積疲労被害度を算出し、累積疲労被害度の現状値と許容値との差で疲労余寿命を評価することを特徴とする。請求項 1 6 に記載の本発明によれば、荷重及び応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価し、危険状態に入る前に、危険を予知することが可能となる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 9 】

請求項 1 7 記載の本発明に対応した浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいては、浮体施設の稼働時の浮体運動及び / 又は気象・海象条件を含む浮体施設の全体挙動に係る指標の計測を行う計測手段と、計測手段の計測値に基づいて浮体施設の慣性力及び係留力を求め、慣性力及び係留力と力学的にバランスする浮体施設に働く外力を仮定し、外力から浮体施設における複数のモニタリング部位の荷重又は応力を推定する荷重・応力推定手段と、荷重・応力推定手段の推定結果を出力する出力手段とを備えたことを特徴とする。請求項 1 7 に記載の本発明によれば、浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を計測するのみで、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、モニタリング部位、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対する荷重又は応力を推定し、モニタリングを行うことができる。

## 【 0 0 3 0 】

請求項 1 8 記載の本発明は、請求項 1 7 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、荷重又は応力の推定値の履歴を記録する履歴記録手段を更に備えたことを特徴とする。請求項 1 8 に記載の本発明によれば、履歴記録手段に記録された荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所の将来的な予測を行うことができる。

## 【 0 0 3 1 】

請求項 1 9 記載の本発明は、請求項 1 8 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、履歴記録手段で記録された荷重又は応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位の疲労余寿命を評価する疲労余寿命評価手段を更に備えたことを特徴とする。請求項 1 9 に記載の本発明によれば、記録された荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を評価することができる。

## 【 0 0 3 2 】

請求項 2 0 記載の本発明は、請求項 1 9 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、疲労余寿命評価手段は、モニタリング部位のうちの疲労余寿命の一番少ないモニタリング部位に基づいて点検保守の時期を判断することを特徴とする。請求項 2 0 に記載の本発明によれば、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

## 【 0 0 3 3 】

請求項 2 1 記載の本発明は、請求項 1 9 又は請求項 2 0 に記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、荷重・応力推定手段及び / 又は疲労余寿命評価手段は、荷重又は応力の推定値の時系列傾向から荷重又は応力及び / 又は疲労余寿命の将来的な変化を予測することを特徴とする。請求項 2 1 に記載の本発明によれば、荷重・応力や疲労余寿命の将来予測を行うことで、危険状態に入る前に的確に対処できる。

## 【 0 0 3 4 】

請求項 2 2 記載の本発明は、請求項 1 9 から請求項 2 1 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、荷重・応力推定手段による荷重又は応力の推定値及び / 又は疲労余寿命評価手段による疲労余寿命の評価値に基づいて警報を行う警報手段を更に備えたことを特徴とする。請求項 2 2 に記載の本発明によれば、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

## 【 0 0 3 5 】

請求項 2 3 記載の本発明は、請求項 1 9 から請求項 2 2 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、荷重・応力推定手段による荷重又は応力の推定値及び / 又は疲労余寿命評価手段による疲労余寿命の評価値に基づいて、浮体施設の運転を制御する運転制御手段を更に備えたことを特徴とする。請求項 2 3 に記載の本発明によれば、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

## 【 0 0 3 6 】

請求項 2 4 記載の本発明は、請求項 1 9 から請求項 2 3 のいずれかに記載の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムにおいて、荷重・応力推定手段及び / 又は疲労余寿命評価手段と出力手段は、浮体施設と離隔した場所に設けたことを特徴とする。請求項 2 4 に

記載の本発明によれば、例えば沖合に設置した複数の浮体施設を陸上でモニタリングできる。

【発明の効果】

【0037】

本発明の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法によれば、浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を計測するのみで、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、モニタリング部位、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対するモニタリングをリアルタイムで行うことができる。また、求めた慣性力及び／又は係留力と端部条件を満たす外力を仮定することで、合理的な荷重を簡便に推定することができる。

10

【0038】

また、全体挙動に係る指標を、浮体施設に備えた計測手段により計測して求める場合には、浮体施設に備えた計測手段で浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を直接計測することができる。

【0039】

また、荷重・応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位の疲労余寿命を評価する場合には、荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価することができる。

【0040】

また、複数のモニタリング部位のうちの疲労余寿命の一番少ないモニタリング部位に基づいて点検保守の時期を判断する場合には、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

20

【0041】

また、荷重・応力の推定値の時系列傾向から荷重・応力及び／又は疲労余寿命の将来的な変化を予測する場合には、荷重・応力や疲労余寿命の将来予測を行うことで、危険状態に入る前に的確に対処できる。

【0042】

また、荷重・応力の推定値及び／又は疲労余寿命の評価値に基づいて警報を発する場合には、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

30

【0043】

また、荷重・応力の推定値及び／又は疲労余寿命の評価値に基づいて浮体施設の運転を制御する場合には、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

【0044】

また、複数のモニタリング部位の応力の推定を、モニタリング部位ごとに構造解析によって求めた荷重から応力への変換係数を使用する場合には、それぞれの弱点箇所、すなわちモニタリング部位ごとに応力を合理的に推定することができる。

【0045】

また、複数のモニタリング部位の荷重の推定値は、次の数式(1)に基づいて求める場合には、定められた計算式を用いて荷重を簡便に推定することができる。

40

$$\text{数式(1)}: \{F_i\} = [A_{ij}] \{x_j\} + [B_{ij}] \{x_j'\} + [C_{ij}] \{x_j''\}$$

ただし、 $\{F_i\}$ は荷重、 $\{x_j\}$ は変位、 $\{x_j'\}$ は速度、 $\{x_j''\}$ は加速度、 $[A_{ij}]$ と $[B_{ij}]$ と $[C_{ij}]$ は運動-荷重相関マトリックス、 $i$ は荷重の種類、 $j$ は浮体運動の6自由度とする。

【0046】

また、運動-荷重相関マトリックスを、6自由度の浮体運動の応答関数及び荷重の応答関数を求めるステップ1と、浮体運動の応答関数の1階微分及び2階微分を用意するステップ2と、荷重の応答関数と、浮体運動の応答関数に基づく変位の応答関数と、用意した

50

1階微分及び2階微分を数式(1)に代入し、運動-荷重相関マトリックスの値を同定するステップ3とによって求める場合には、モニタリング部位によって異なる荷重の推定値を得る運動-荷重相関マトリックスを、簡便に求めることができる。

【0047】

また、ステップ3で得られた運動-荷重相関マトリックスの値及び実際の浮体運動の時系列データを用いて、複数のモニタリング部位の各剪断力が作用する方向と平行な断面に生じる荷重の時系列データを算出するステップ4を更に備える場合には、浮体施設に生じる荷重の傾向を知ることができる。

【0048】

また、浮体運動の応答関数と荷重の応答関数は、水槽試験又は数値計算より求める場合には、計算に必要な応答関数をあらかじめ簡便に求めることができる。

【0049】

また、複数のモニタリング部位の応力の推定値は、次の数式(2)に基づいて求める場合には、定められた計算式を用いて応力を簡便に推定することができる。

数式(2)： $\{ \sigma_k \} = [ D_{ki} ] \{ f_i \}$

ただし、 $\{ \sigma_k \}$ は応力、 $\{ f_i \}$ は単位荷重、 $[ D_{ki} ]$ は荷重-応力相関マトリックス、 $k$ はモニタリング部位、 $i$ は荷重の種類とする。

【0050】

また、荷重-応力相関マトリックスを、浮体施設のモニタリング部位を含む有限要素モデルを作成し、モデル境界に単位荷重を作用させるステップ5と、単位荷重の載荷時のモニタリング部位における応力を算出し荷重-応力相関マトリックスの値を同定するステップ6とにより求める場合には、モニタリング部位によって異なる応力の推定値を得る荷重-応力相関マトリックスを、簡便に求めることができる。

【0051】

また、ステップ6で得られた荷重-応力相関マトリックスの値及びステップ4で算出した荷重の時系列データを用いて、推定した荷重が断面力として作用した際のモニタリング部位に生じる応力の時系列データを算出するステップ7を備える場合には、応力の時系列データを算出し、浮体施設に生じる応力の傾向を知ることができる。

【0052】

また、ステップ7で得られた応力の時系列データを基に疲労被害度を算出し、モニタリング部位の累積疲労被害度を算出し、累積疲労被害度の現状値と許容値との差で疲労余寿命を評価する場合には荷重及び応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価し、危険状態に入る前に、危険を予知することが可能となる。

【0053】

本発明の浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムによれば、浮体施設の浮体運動や気象・海象条件を含む全体挙動に係る限られた指標を計測するのみで、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、モニタリング部位、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対する荷重・応力を推定し、モニタリングを行うことができる。

【0054】

また、荷重・応力の推定値の履歴を記録する履歴記録手段を更に備えた場合には、履歴記録手段に記録された荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所の将来的な予測を行うことができる。

【0055】

また、履歴記録手段で記録された荷重・応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位の疲労余寿命を評価する疲労余寿命評価手段を更に備えた場合には、記録された荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を評価することができる。

【0056】

また、疲労余寿命評価手段が、モニタリング部位のうちの疲労余寿命の一番少ないモニ

タリング部位に基づいて点検保守の時期を判断する場合には、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

【 0 0 5 7 】

また、荷重・応力推定手段及び／又は疲労余寿命評価手段が、荷重・応力の推定値の時系列傾向から荷重・応力及び／又は疲労余寿命の将来的な変化を予測する場合には、荷重・応力や疲労余寿命の将来予測を行うことで、危険状態に入る前に的確に対処できる。

【 0 0 5 8 】

また、荷重・応力推定手段による荷重・応力の推定値及び／又は疲労余寿命評価手段による疲労余寿命の評価値に基づいて警報を行う警報手段を更に備えた場合には、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

10

【 0 0 5 9 】

また、荷重・応力推定手段による荷重・応力の推定値及び／又は疲労余寿命評価手段による疲労余寿命の評価値に基づいて、浮体施設の運転を制御する運転制御手段を更に備えた場合には、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

【 0 0 6 0 】

また、荷重・応力推定手段及び／又は疲労余寿命評価手段と出力手段を、浮体施設と隔離した場所に設けた場合には、例えば沖合に設置した複数の浮体施設を陸上でモニタリングできる。

【 図面の簡単な説明 】

20

【 0 0 6 1 】

【 図 1 】 本実施形態による荷重・応力モニタリング方法の基本概念を示す図

【 図 2 】 本実施形態による荷重・応力モニタリングシステムを示す構成図

【 図 3 】 本実施形態による応力の推定値の時系列傾向からの予測方法の一例を示すグラフ

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 6 2 】

以下に、本発明の実施形態による荷重・応力モニタリング方法について説明する。

図 1 は本実施形態による荷重・応力モニタリング方法の基本概念を示す図である。

図 1 ( a ) に示すように、計測対象は、浮体施設の稼働時の浮体運動及び／又は気象・海象条件を含む浮体施設の全体挙動であり、浮体施設の浮体運動や気象・海象条件等の全体挙動に係る指標の計測に基づいて、浮体施設の複数のモニタリング部位の荷重をリアルタイムで推定し、この推定した荷重に基づいて応力をリアルタイムで推定する。

30

すなわち、浮体施設の動揺や気象・海象を含む全体挙動に係る指標を計測するのみで、浮体施設に多数存在する構造的な弱点を網羅的・即物的に計測するのではなく、モニタリング部位、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対するモニタリングをリアルタイムで行うことができる。

【 0 0 6 3 】

構造的な弱点の網羅的・即物的な計測が不要であるため、多数の計測手段を必要とせず、また、例えば即物的に歪ゲージを用いる場合のように、多数の計測手段の耐久性や信頼性を考慮する必要がなくなる。

40

また、モニタリング部位の荷重や応力をリアルタイムで推定し、多数の構造的な弱点箇所に対するモニタリングをリアルタイムで行うことにより、浮体運動及び／又は気象・海象条件を含む浮体施設の全体挙動に係る指標の荷重や応力への影響を時々刻々と知ることができ、荷重や応力の設計限界値との対比や安全率の確認に寄与できる。また、荷重や応力の時々刻々の変化を知ることができ、傾向から荷重や応力の今後の予測が容易に可能となる。更に、荷重や応力の時々刻々の変化を積み上げることにより、点検保守の管理が的確にできる。

【 0 0 6 4 】

図 1 ( b ) は、各パラメータの関係を示している。

浮体施設は、図 1 ( b ) に示すような、種々の外力が負荷される力学系となっている。

50

図1(b)に示すように、外力によって浮体運動が発生するが、それによって発生する慣性力及び係留力がバランスする形で結果として運動が起こっている。また、外力、慣性力及び係留力の積分値として、曲げ・捻り・剪断の荷重が発生している。

但し、外力や慣性力の全体像を掴むことは、着力位置・力の方向など多くのパラメータを要するので、事実上不可能である。

#### 【0065】

図1(c)に、荷重推定概念を示す。

6自由度に集約される運動(浮体施設の動揺)に着目し、運動から曲げ・捻り・剪断・軸力荷重を推定する。この6自由度の運動とは、ピッチング、ローリング、ヨーイング、ヒーピング、スウェイング、及びサージングである。

曲げ・捻り・剪断荷重を推定する方法は具体的には、先ず、6自由度の運動から慣性力及び係留力を求めて、慣性力及び係留力による荷重を計算する。そのままでは、力学的条件等を満たさないため、力学的条件等を満たすように、波力等の外力を推定(仮定)する。これによって、合理的な荷重が簡便に推定できる。

なお、構造全体の曲げ・捻り・剪断荷重の単位荷重が負荷された時に、構造上の弱点箇所(モニタリング箇所)に発生する応力は構造解析によって求める。

構造上の弱点箇所(モニタリング箇所)の選定は、過去の類似の陸上施設での損傷事例や、他用途の浮体構造物での損傷事例を参照し、浮体施設の実体構造を考慮して選定する。

#### 【0066】

図2は本実施形態による荷重・応力モニタリングシステムを示す構成図である。

本実施形態では、浮体施設10として洋上風力発電施設を示している。

浮体施設(洋上風力発電施設)10は、下部構造体11、タワー12、ナセル13、及びローター14からなり、下部構造体11を、浮力を有した浮体構造体とし、係留索で係留した浮体式の洋上風力発電施設である。ただし、洋上風力発電施設以外の浮体施設であってもよい。

#### 【0067】

本実施形態による荷重・応力モニタリングシステムは、浮体施設10の稼働時の浮体運動及び/又は気象・海象条件を含む浮体施設10の全体挙動に係る指標の計測を行う計測手段21と、計測手段21の計測値に基づいて浮体施設10における複数のモニタリング部位15a、15b、15cの荷重・応力を推定する荷重・応力推定手段31と、荷重・応力推定手段31の推定結果を出力する出力手段32とを備えている。

#### 【0068】

計測手段21は浮体施設10に備えている。

計測手段21は、例えば、浮体施設10のピッチング、ローリング、及びヨーイングを計測するジャイロセンサと、ヒーピング、スウェイング、及びサージングを計測する加速度計とから構成される。すなわち、浮体施設10の稼働時の浮体運動は、ジャイロセンサと加速度計によって計測される、ピッチング、ローリング、ヨーイング、ヒーピング、スウェイング、及びサージングの6自由度に集約される全体挙動に係る運動(浮体施設の動揺)である。

また、気象・海象条件は、例えば、風向計と風速計と波高計のような計測手段21で計測される。浮体施設10の全体挙動は、6自由度による浮体施設動揺に加えて、風向、風速、及び波高等による浮体施設10の挙動に影響を及ぼす指標にも支配される場合がある。従って、気象・海象条件を含む浮体施設10の全体挙動に係る指標を計測することにより、浮体施設10の複数のモニタリング部位15a、15b、15cの荷重・応力をリアルタイムで推定することが可能となる。

モニタリング部位15aは例えばタワー12の開口部、モニタリング部位15bは例えばタワー12の内部補強部材の交差部、モニタリング部位15cは例えば下部構造体11の内部補強部材の末端部である。

#### 【0069】

10

20

30

40

50

本実施形態による荷重・応力モニタリングシステムによれば、浮体施設 10 の動揺や気象・海象等を計測するのみで、モニタリング部位 15 a、15 b、15 c、すなわち多数の構造的な弱点箇所に対する荷重・応力を網羅的・即物的に計測せずに推定し、モニタリングを行うことができる。

また、浮体施設 10 の稼働時の浮体運動による全体挙動に係る指標の計測結果あるいは気象・海象条件を含む浮体施設 10 の全体挙動に係る指標の計測結果は、それぞれ単独に用いて、モニタリング部位 15 a、15 b、15 c、の荷重・応力をリアルタイムで推定することもできるが、両者を組み合わせて用いることもできる。浮体運動による全体挙動に係る指標の計測結果と気象・海象条件を含む全体挙動に係る指標の計測結果を組み合わせるにより、より精度よく荷重・応力の推定が可能となる。

10

#### 【0070】

本実施形態による荷重・応力モニタリングシステムは、荷重・応力の推定値の履歴を記録する履歴記録手段 33、履歴記録手段 33 で記録された荷重・応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位 15 a、15 b、15 c の疲労余寿命を評価する疲労余寿命評価手段 34、荷重・応力推定手段 31 による荷重・応力の推定値及び / 又は疲労余寿命評価手段 34 による疲労余寿命の評価値に基づいて警報を行う警報手段 35、荷重・応力推定手段 31 による荷重・応力の推定値及び / 又は疲労余寿命評価手段 34 による疲労余寿命の評価値に基づいて、浮体施設 10 の運転を制御する運転制御手段 22 を更に備えている。

運転制御手段 22 は、浮体施設 10 に備えている。

20

#### 【0071】

履歴記録手段 33 を備えることで、履歴記録手段 33 に記録された荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所の将来的な予測を行うことができる。

履歴記録手段 33 には、荷重・応力の時系列の推定値以外に、計測手段 21 で計測される浮体運動や全体挙動に係る指標の計測結果の履歴も記録することが可能である。例えば浮体施設 10 の浮体運動や風向、風速、及び波高等の記録と現在値から台風を予測し、荷重・応力の時系列の推定値の将来的な予測をより精度よく行うこともできる。

また、疲労余寿命評価手段 34 を備えることで、記録された荷重・応力の時系列の推定値から、モニタリング部位 15 a、15 b、15 c における余寿命を部位ごとに評価することができる。

30

また、警報手段 35 を備えることで、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

また、運転制御手段 22 を備えることで、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

#### 【0072】

荷重・応力推定手段 31、出力手段 32、履歴記録手段 33、疲労余寿命評価手段 34、及び警報手段 35 は、浮体施設 10 と離隔した場所に設けることが好ましく、例えば沖合に設置した複数の浮体施設 10 を陸上でモニタリングできる。離隔した場所と複数の浮体施設 10 間は、無線通信や海底ケーブルを利用して情報の送受信が可能である。

疲労余寿命評価手段 34 は、モニタリング部位 15 a、15 b、15 c のうちの疲労余寿命の一番少ないモニタリング部位 15 a、15 b、15 c に基づいて点検保守の時期を判断することが好ましく、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

40

また、荷重・応力推定手段 31 及び / 又は疲労余寿命評価手段 34 は、荷重・応力の推定値の時系列傾向から荷重・応力及び / 又は疲労余寿命の将来的な変化を予測することが好ましく、荷重・応力や疲労余寿命の将来予測を行うことで、危険状態に入る前に的確に対処できる。

#### 【0073】

保守点検に当たっては、浮体施設 10 に人が常駐することは稀なため、通常、近傍の港から船舶によって保守点検者や機材、また交換部品等を輸送し保守点検を行う。特に、台

50

風接近時には、保守点検用の船舶の出港が不可能となるため、疲労余寿命の将来予測を行い早めに点検を行うことが重要となる。このため、浮体施設 10 の浮体運動や風向、風速、及び波高等の記録と現在値から台風の予測に加えて、地球規模の気象情報を利用することが好ましい。

【 0 0 7 4 】

図 3 に、本実施形態による応力の推定値の時系列傾向からの予測方法の一例を示す。図 3 では、横軸が時刻、縦軸が応力であり、現在までの推定値（区間 A）を実線で表している。図 3 における一点破線 B は、区間 A に基づいた予測であり、推定時刻 C において、許容値に達することを示している。出力手段 3 2 によってこのようなグラフ表示を行うことができる。

10

図 3 に示す状態では、推定時刻 C よりも所定時間前に警報手段 3 5 によって警報を発する。また、推定時刻 C に至る前に、運転制御手段 2 2 によって、例えばナセル 1 3 の向き及び / 又はローター 1 4 のブレード角度を変更することで、応力が許容値を超えないように制御する。

【 0 0 7 5 】

本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、荷重・応力の推定値の履歴を基に、複数のモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c の疲労余寿命を評価することで、荷重・応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価することができる。

【 0 0 7 6 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、複数のモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c のうちの疲労余寿命の一番少ないモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c に基づいて点検保守の時期を判断することで、不必要な剰余安全性を設定することなく、保守点検の時期を合理的に判断できる。

20

【 0 0 7 7 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、荷重・応力の推定値の時系列傾向から荷重・応力及び / 又は疲労余寿命の将来的な変化を予測することで、危険状態に入る前に対処できる。

【 0 0 7 8 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、荷重・応力の推定値及び / 又は疲労余寿命の評価に基づいて警報を発することで、警報によって危険状態を報知でき、将来的な安全性を確実に確保することができる。

30

【 0 0 7 9 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、荷重・応力の推定値及び / 又は疲労余寿命の評価に基づいて浮体施設 10 の運転を制御することで、危険状態に入る前に、危険を回避する運転条件に変更することが可能となる。

【 0 0 8 0 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、複数のモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c の荷重の推定値は、浮体運動から浮体施設 10 の慣性力及び / 又は係留力を計算し、力学的条件を満たすように波力を含む外力を仮定して求めることで、合理的な荷重を推定することができる。

40

【 0 0 8 1 】

また、本実施形態による荷重・応力モニタリング方法では、複数のモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c の応力の推定値は、モニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c ごとに構造解析によって求めた荷重から応力への変換係数を使用することで、それぞれの弱点箇所、すなわちモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c ごとに応力を合理的に推定することができる。

【 0 0 8 2 】

浮体施設 10 の複数のモニタリング部位 1 5 a、1 5 b、1 5 c に生じる荷重（断面力）は、計測される浮体運動の時系列データを基に、次の数式（1）から求めることもでき

50

る。

$$\text{数式(1)}: \{F_i\} = [A_{ij}] \{x_j\} + [B_{ij}] \{x_j'\} + [C_{ij}] \{x_j''\}$$

ただし、 $\{F_i\}$ は荷重、 $\{x_j\}$ は変位、 $\{x_j'\}$ は速度、 $\{x_j''\}$ は加速度、 $[A_{ij}]$ と $[B_{ij}]$ と $[C_{ij}]$ は運動-荷重相関マトリックス、 $i$ は荷重の種類、 $j$ は浮体運動の6自由度とする。このように定められた計算式を用いることで、荷重を簡便に推定することができる。

なお、上述のように、荷重の種類としては、曲げ・捩り・剪断・軸力があり、浮体運動の6自由度は、ピッチング、ローリング、ヨーイング、ヒーピング、スウェイング、及びサージングである。

#### 【0083】

数式(1)を基本算式として、基本的には数式(1)内の運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ を同定する作業を行う。また、着目するモニタリング部位15a、15b、15cの断面ごとに、各マトリックスの数値は異なる。

運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ を求める手順は次の通りである。

ステップ1として、水槽試験または数値計算により、6自由度の浮体運動の応答関数及び荷重の応答関数を求める。水槽試験または数値計算を用いることで、実際の浮体施設10を使用せずに計算に必要な応答関数をあらかじめ簡便に求めることができる。

ステップ2として、ステップ1で求めた浮体運動の応答関数の1階微分及び2階微分を

ステップ3として、ステップ1で求めた荷重の応答関数と、浮体運動の応答関数に基づく変位の応答関数と、用意した1階微分及び2階微分を、それぞれ数式(1)の、 $\{F_i\}$ 、 $\{x_j\}$ 、 $\{x_j'\}$ 、 $\{x_j''\}$ に代入し、最小二乗法を用いることで運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ の値を同定する。このように、モニタリング部位15a、15b、15cによって異なる荷重の推定値を得る運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ を、簡便に求めることができる。

なお、各マトリックスの同定においては、十分な近似が得られる場合には、対象となる荷重に関係する運動に限定してもよい。(例えばY軸まわりのモーメントに対してはサージングとピッチングに限定してもよい。)また、運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ の値の同定に当たっては、最小二乗法以外にも補完法等を含めた各種の近似法が利用可能である。

#### 【0084】

また、ステップ4として、ステップ3で得られた運動-荷重相関マトリックス $[A_{ij}]$ 、 $[B_{ij}]$ 、 $[C_{ij}]$ の値及び実際の浮体運動の時系列データを用いて、複数のモニタリング部位15a、15b、15cの各断面に生じる荷重の時系列データを算出することもでき、この場合は、浮体施設10に生じる荷重の傾向を知ることができる。

なお、実際の浮体運動の時系列データは、浮体施設10に設けた計測手段としてのジャイロセンサや加速度計を用いて計測して求める。

#### 【0085】

また、浮体施設10の複数のモニタリング部位15a、15b、15cに生じる応力は、弾性有限要素解析を実施し、次の数式(2)から求めることもできる。

$$\text{数式(2)}: \{ \sigma_k \} = [D_{ki}] \{ f_i \}$$

ただし、 $\{ \sigma_k \}$ は応力、 $\{ f_i \}$ は単位荷重、 $[D_{ki}]$ は荷重-応力相関マトリックス、 $k$ はモニタリング部位、 $i$ は荷重の種類とする。このように定められた計算式を用いることで、応力を簡便に推定することができる。

#### 【0086】

数式(2)を基本算式として、基本的には数式(2)内の荷重-応力相関マトリックス $[D_{ki}]$ を同定する作業を行う。また、応力を評価するモニタリング部位15a、15b、15cの断面ごとに、各マトリックスの数値は異なる。

10

20

30

40

50

荷重 - 応力相関マトリックス  $[D_{ki}]$  を求める手順は次の通りである。

ステップ5として、浮体施設10のモニタリング部位15a、15b、15cを含む有限要素モデル（局部応力を評価するモニタリング部位15a、15b、15cはファインメッシュ）を作成し、モデル境界に単位荷重を作用させる。

ステップ6として、単位荷重載荷時のモニタリング部位15a、15b、15cにおける応力を算出し、荷重 - 応力相関マトリックス  $[D_{ki}]$  の値を同定する。このように、モニタリング部位15a、15b、15cによって異なる応力の推定値を得る荷重 - 応力相関マトリックス  $[D_{ki}]$  を、簡便に求めることができる。

【0087】

また、ステップ7として、ステップ6で得られた荷重 - 応力相関マトリックス  $[D_{ki}]$  の値及びステップ4で算出した荷重の時系列データを用いて、推定した荷重が断面力として作用した際のモニタリング部位15a、15b、15cに生じる応力の時系列データを算出することもでき、この場合は、応力の時系列データを算出し、浮体施設10に生じる応力の傾向を知ることができる。

【0088】

また、ステップ7で得られた応力の時系列データを基に疲労被害度  $d_i$  を算出し、次の数式(3)で表されるように、モニタリング部位15a、15b、15cの累積疲労被害度  $D$  を算出することができる。

数式(3) :  $D = d_i$

そして、累積疲労被害度  $D$  の現状値と許容値との差で疲労余寿命を評価することができる。すなわち、荷重及び応力の時系列の推定値から、多数の弱点箇所における余寿命を部位ごとに評価し、危険状態に入る前に、危険を予知することが可能となる。

なお、モニタリング時間が限定される場合（1日のうち数時間分等）には、モニタリング時間中に得られた  $d_i$  を適宜修正し、数式(3)に代入する。

【0089】

なお、上記した数式(1)を用いた荷重の推定方法、数式(2)を用いた応力の推定方法、又数式(3)を用いた累積疲労被害度  $D$  の推定方法は、それぞれの他の推定方法を含めて任意に組み合わせて使用することが可能である。

【産業上の利用可能性】

【0090】

本発明の浮体施設の荷重・応力モニタリング方法及び浮体施設の荷重・応力モニタリングシステムは、例えば洋上風力発電施設に利用できる。

【符号の説明】

【0091】

- 10 浮体施設（洋上風力発電施設）
- 11 下部構造体
- 12 タワー
- 13 ナセル
- 14 ローター
- 15a、15b、15c モニタリング部位
- 21 計測手段
- 22 運転制御手段
- 31 荷重・応力推定手段
- 32 出力手段
- 33 履歴記録手段
- 34 疲労余寿命評価手段
- 35 警報手段

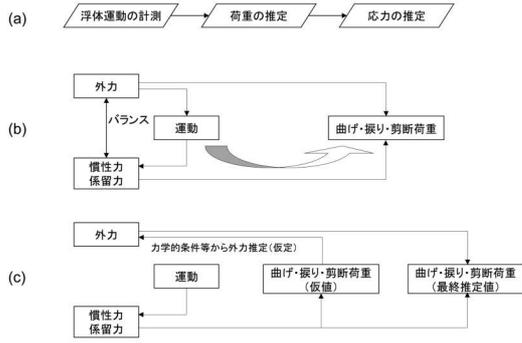
10

20

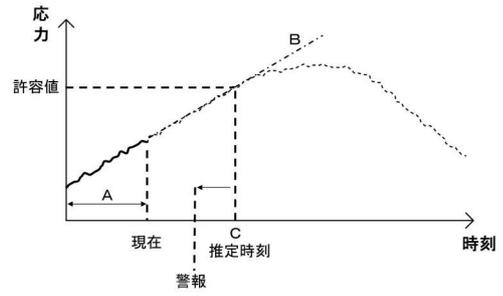
30

40

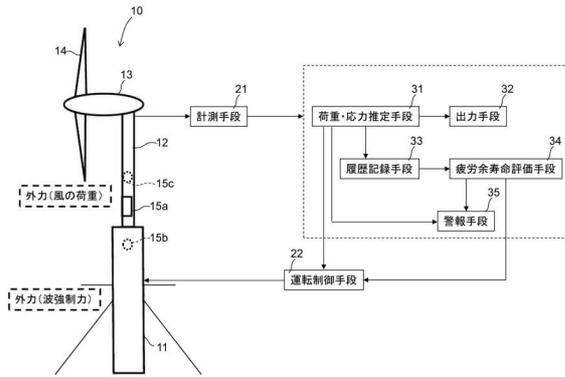
【 図 1 】



【 図 3 】



【 図 2 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 井上 俊司

東京都三鷹市新川6丁目38番1号 独立行政法人海上技術安全研究所内

審査官 大瀬 円

(56)参考文献 特表2011-521820(JP,A)  
特開2005-240785(JP,A)  
特開平4-147031(JP,A)  
特開2002-326598(JP,A)  
特開2004-101417(JP,A)  
米国特許出願公開第2010/0332272(US,A1)  
特開2005-264865(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F03D 9/30

F03D 80/50