

(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2017-58292
(P2017-58292A)

(43) 公開日 平成29年3月23日(2017.3.23)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO1B 11/16 (2006.01)	GO1B 11/16	Z 2F065
GO1D 5/353 (2006.01)	GO1D 5/353	B 2F103

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2015-184512 (P2015-184512)
(22) 出願日 平成27年9月17日 (2015.9.17)

(71) 出願人 304026696
国立大学法人三重大学
三重県津市栗真町屋町1577
(74) 代理人 100109210
弁理士 新居 広守
(72) 発明者 成瀬 央
三重県津市栗真町屋町1577 国立大学
法人三重大学大学院工学研究科内
Fターム(参考) 2F065 AA02 AA03 AA09 AA46 AA65
BB08 FF41 LL02 QQ14 QQ16
QQ25 QQ44 RR08
2F103 CA07 EC09 ED34 FA02

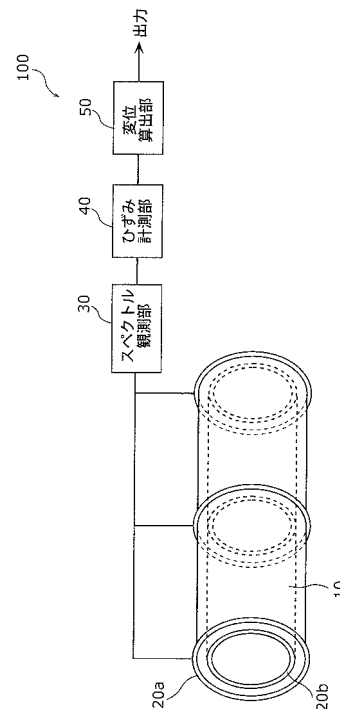
(54) 【発明の名称】 変位計測方法および変位計測装置

(57) 【要約】

【課題】計測対象物のあらゆる位置においてひずみおよび変位を計測することができる変位計測方法および変位計測装置を提供する。

【解決手段】変位計測方法は、環構造体10の周囲に配置された光ファイバ20aおよび20bから、環構造体10のひずみに基づく散乱光のブリルアンゲインスペクトルを観測するスペクトル観測ステップと、ひずみの観測モデルを構築し、観測したブリルアンゲインスペクトルと観測モデルを用いてひずみを計測するひずみ計測ステップとを含み、観測モデルにおいて、ひずみをフーリエ級数で与える。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

環構造体の周囲に配置された光ファイバから、前記環構造体のひずみに基づく散乱光のブリルアンゲインスペクトルを観測するスペクトル観測ステップと、
前記ひずみの観測モデルを構築し、観測した前記ブリルアンゲインスペクトルと前記観測モデルを用いて前記ひずみを計測するひずみ計測ステップとを含み、
前記観測モデルにおいて、前記ひずみをフーリエ級数で与える変位計測方法。

【請求項 2】

前記観測モデルは、以下の(式 A)で表される
請求項 1 に記載の変位計測方法。

10

【数 1】

$$G_{\text{mod}}(\nu_j, \phi_i, p) = \int_{\phi_i - \Delta\phi/2}^{\phi_i + \Delta\phi/2} \frac{h(w/2)^2}{\{\nu_j - \nu_B(0) - C\varepsilon(\phi, p)\}^2 + (w/2)^2} d\phi \quad \dots\dots(\text{式 A})$$

ここで、

$\phi_i (i=1, 2, \dots, I)$ は、 i 番目の観測点に対応する角度

$\nu_j (j=1, 2, \dots, I)$ は、 j 番目の観測周波数

$\Delta\phi$ は、 ϕ を中心とした BGS (ブリルアンゲインスペクトル) 観測区間

h は、非積分関数であるローレンツ関数の最大値

w は、被積分関数であるローレンツ関数の半値全幅

$\nu_B(0)$ は、ひずみ 0 に対応する周波数

C は、ひずみと光周波数の関係を与える比例係数

$\varepsilon(\phi, p)$ は、フーリエ級数で与えられたひずみ

p は、フーリエ係数

である。

20

【請求項 3】

前記ひずみ計測ステップを行った後、前記ひずみ計測ステップで計測された前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出ステップを含む
請求項 1 または 2 に記載の変位計測方法。

30

【請求項 4】

前記変位算出ステップにおいて、前記環構造体を微小直線梁の集合とみなして前記環構造体の変位を算出する
請求項 3 に記載の変位計測方法。

【請求項 5】

環構造体のひずみを計測するひずみ計測ステップと、
前記ひずみ計測ステップで計測された前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出ステップとを含み、
前記変位算出ステップにおいて、前記環構造体を微小直線梁の集合とみなして前記環構造体の変位を算出する
変位計測方法。

40

【請求項 6】

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の変位計測方法をコンピュータに実行させるためのプログラム。

【請求項 7】

環構造体の周囲に配置される光ファイバと、
前記光ファイバにおける、前記環構造体のひずみに基づく散乱光のブリルアンゲインスペクトルを観測するスペクトル観測部と、

50

前記ひずみの観測モデルを構築し、観測した前記ブリルアンゲインスペクトルと前記ひずみの観測モデルを用いて前記ひずみを計測するひずみ計測部とを備え、
前記観測モデルにおいて、前記ひずみはフーリエ級数で与えられる
変位計測装置。

【請求項 8】

前記変位計測装置は、前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出部を備える

請求項 7 に記載の変位計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、構造体のひずみおよび変位を計測する変位計測方法および変位計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、構造体のひずみ計測システムとして、光ファイバに生じるブリルアンゲインスペクトル (B G S) の周波数が発生位置でのひずみに依存して周波数シフトする物理現象を利用した、分布型光ファイバセンシングシステムの一例が提案されている (例えば、特許文献 1 参照) 。

【0003】

20

また、例えば特許文献 2 には、特許文献 1 に記載された技術を用いて、円環状の断面を有する環構造体について、直径変化などの構造体の変位を計測する技術が開示されている (特許文献 2 参照) 。特許文献 2 に記載の技術では、環構造体に対する力学的解析に基づいて B G S の形状がモデル化されている。詳細には、B G S の形状が非ローレンツ関数で与えられている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献 1】特開 2001 - 165808 号公報

【特許文献 2】特開 2012 - 047699 号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかし、特許文献 2 に記載の技術では、上述した解析を行う際に外力の作用点の位置の情報が必要であるため、計測対象物である環構造体が例えばトンネル等であり、それらの情報を得ることができない場合、例えば環構造体の内部に適当な数の支持点で支持された別の環状の構造物をセンサとして設置する。そのため、得られるひずみや変位は、環状の構造物の支持点におけるものみに限られていた。したがって、計測対象の環構造体の内部における環状の構造物の支持点についてはひずみや変位を直接得ることはできるが、支持点以外の部分のひずみや変位を直接得ることはできず、支持点のひずみや変位から間接的に支持点以外の部分のひずみや変位を得る程度で、支持点以外では、重大なひずみや変位が起こったとしてもそれらを直接検出することができなかつた。また、従来の方法では、支持点のような特定の位置のみのひずみや変位の取得しかできなかつたため、計測対象物の例えば周方向におけるひずみや変位をとともに分布的に取得することができなかつた。

40

【0006】

上記課題に鑑み、本発明は、計測対象物のあらゆる位置においてひずみおよび変位を計測することができる変位計測方法および変位計測装置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】

【0007】

上記の課題を解決するため、本発明にかかる変位計測方法は、環構造体の周囲に配置さ

50

れた光ファイバから、前記環構造体のひずみに基づく散乱光のブリルアンゲインスペクトルを観測するスペクトル観測ステップと、前記ひずみの観測モデルを構築し、観測した前記ブリルアンゲインスペクトルと前記観測モデルを用いて前記ひずみを計測するひずみ計測ステップとを含み、前記観測モデルにおいて、前記ひずみをフーリエ級数で与える。

【0008】

この構成によれば、計測対象の環構造体におけるひずみを分布的に検出することができる。したがって、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、ひずみを計測することができる。

【0009】

また、前記観測モデルは、後に詳述する(式5)で表されてもよい。

10

【0010】

この構成によれば、観測モデルである式Aは、パラメータとしてフーリエ級数で表されるひずみを含むので、周期的に繰り返し観測される、環構造体のひずみを精度よく計測することができる。また、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、ひずみを計測することができる。

【0011】

また、前記ひずみ計測ステップを行った後、前記ひずみ計測ステップで計測された前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出ステップを含んでもよい。

【0012】

この構成によれば、計測したひずみに基づいて環構造体の変位を算出するので、計測対象の環構造体における変位を分布的に算出することができる。したがって、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、変位を算出することができる。

20

【0013】

また、前記変位算出ステップにおいては、前記環構造体を微小直線梁の集合とみなして前記環構造体の変位を算出してもよい。

【0014】

この構成によれば、計測対象の環構造体における変位を分布的に算出することができる。したがって、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、変位を算出することができる。

【0015】

また、上記の課題を解決するため、本発明にかかる変位計測方法は、環構造体のひずみを計測するひずみ計測ステップと、前記ひずみ計測ステップで計測された前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出ステップとを含み、前記変位算出ステップにおいて、前記環構造体を微小直線梁の集合とみなして前記環構造体の変位を算出する。

30

【0016】

この構成によれば、環構造体の変位の計測精度を向上することができる。

【0017】

また、上記の課題を解決するため、本発明にかかるプログラムは、上述した特徴を有する変位計測方法をコンピュータに実行させる。

【0018】

また、上記の課題を解決するため、本発明にかかる変位計測装置は、環構造体の周囲に配置される光ファイバと、前記光ファイバにおける、前記環構造体のひずみに基づく散乱光のブリルアンゲインスペクトルを観測するスペクトル観測部と、前記ひずみの観測モデルを構築し、観測した前記ブリルアンゲインスペクトルと前記ひずみの観測モデルを用いて前記ひずみを計測するひずみ計測部とを備え、前記観測モデルにおいて、前記ひずみはフーリエ級数で与えられる。

40

【0019】

この構成によれば、計測対象の環構造体におけるひずみを分布的に直接得ることができる。したがって、計測対象物のあらゆる位置において、ひずみを計測することができる。

【0020】

50

また、前記変位計測装置は、前記ひずみに基づいて前記環構造体の変位を算出する変位算出部を備えてもよい。

【0021】

この構成によれば、計測したひずみに基づいて環構造体の変位を算出するので、計測対象の環構造体における変位を分布的に算出することができる。したがって、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、変位を算出することができる。

【発明の効果】

【0022】

本発明により、計測対象物のあらゆる位置においてひずみおよび変位を計測することができる変位計測方法および変位計測装置を提供することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0023】

【図1】実施の形態にかかる変位計測装置の構成を示す概略図

【図2】実施の形態にかかる変位計測装置について、環構造体へ光ファイバを設置した一例を示す概略図

【図3】実施の形態にかかる変位計測装置について、環構造体へ光ファイバを設置した一例を示す概略図

【図4】実施の形態にかかる変位計測方法の手順を示すフローチャート

【図5】実施の形態にかかる変位計測方法における環構造体の観測モデルを、環構造体の長手方向に見た図

20

【図6】実施の形態にかかるひずみ計測の手順を示すフローチャート

【図7】実施の形態にかかるひずみ計測について、評価関数Eの計算を模式的に示した図

【図8】実施の形態にかかる変位計測方法において環構造体の変位を算出するための観測モデルの図

【図9】微小直線梁を用いた直線梁の観測モデルの図

【図10】微小直線梁におけるたわみ角の微小変化量について説明するための図

【図11】実施の形態にかかる変位計測方法における変形前の環構造体の観測モデルを、環構造体の長手方向に見た図

【図12】微小直線梁を用いた環構造体の観測モデルの図

【図13】実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の外周のひずみのシミュレーション結果を示す図

30

【図14】実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の内周のひずみのシミュレーション結果を示す図

【図15】環構造体の変形前後の状態を示す概略図

【図16】実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の変位のシミュレーション結果を示す図

【発明を実施するための形態】

【0024】

以下、図面を用いて、本発明にかかる実施の形態について説明する。なお、図面において、同一の符号が付された構成要素は、同一または同種の構成要素を示す。

40

【0025】

また、以下で説明する実施の形態は、本発明の好ましい一具体例を示す。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置、接続形態、ステップおよびステップの順序等は、一例であり、本発明を限定する主旨ではない。また、以下の実施の形態における構成要素のうち、本発明の最上位概念を示す独立請求項に記載されていない構成要素については、より望ましい形態を構成する任意の構成要素として説明される。

【0026】

(実施の形態)

本実施の形態にかかる変位計測方法および変位計測装置について説明する。本実施の形

50

態にかかる変位計測方法は、変位計測装置に含まれる光ファイバをトンネルなどの環構造体の円環の中立軸以外の位置に配置し、光ファイバに発生するブリルアン散乱光を利用することにより、環構造体のひずみを計測する方法および計測されたひずみから変位を計測する方法からなっている。後者のひずみから変位を計測するにあたっては、前者の方法に限定されず、例えばひずみゲージなど別の計測方法によって得られたひずみを用いてもよい。

【0027】

光ファイバに光が入射されると、光の散乱現象によって光ファイバ内のあらゆる位置でレーリー散乱光、ラマン散乱光、ブリルアン散乱光などの散乱光が発生する。ブリルアン散乱光とは、光が物質中で音波と相互作用して発生した光であり、その周波数は、入射光の周波数よりわずかにずれている。ブリルアン散乱光のスペクトルであるブリルアンゲインスペクトル(BGS)は、光ファイバの長手方向に生じるひずみに比例して周波数シフトするという性質を持つ。そこで、BGSの周波数変化を利用して、環構造体のひずみを計測する。また、計測した環構造体のひずみから環構造体の変位を算出する。以下、BGSを利用した、本実施の形態にかかる変位計測方法および変位計測装置について説明する。

10

【0028】

[1. 変位計測装置の構成]

はじめに、本実施の形態にかかる変位計測装置の構成について、図1～図3を用いて説明する。図1は、本実施の形態にかかる変位計測装置の構成を示す概略図である。図2および図3は、本実施の形態にかかる変位計測装置について、環構造体へ光ファイバを設置した一例を示す概略図である。

20

【0029】

図1に示すように、本実施の形態にかかる変位計測装置100は、環状の計測対象物(環構造体)10の外周および内周にそれぞれ配置される光ファイバ20aおよび20bと、スペクトル観測部30と、ひずみ計測部40と、変位算出部50とを備えている。

【0030】

環構造体10は、例えばトンネルであり、図2および図3に示すように、円柱状の構造物の内部に長手方向に沿った空洞を有している。図3の(a)に示すように、環構造体10を長手方向と直交する平面で切断したときの断面は、環状、例えば円環となるように形成されている。

30

【0031】

また、図2および図3の(b)に示すように、光ファイバ20aは、環構造体10の外周に配置され、光ファイバ20bは環構造体10の内周に配置される。

【0032】

光ファイバ20aおよび20bは、環構造体10のひずみを測定するためのセンシング用光ファイバである。光ファイバ20aは、光ファイバ20aおよび20bが巻き付けられた環構造体10の外周を含む断面の円環が、環構造体10の長手方向の軸にほぼ直交するように固定される。光ファイバ20bは、光ファイバ20aが巻き付けられた環構造体10の外周と同一の位置の内周に固定される。光ファイバ20a、20bの設置は、外周、内周に限られるものではなく、円環の中立軸以外の内部であってもよい。ただし、設置場所にかかわらず、これらの光ファイバ20aおよび20bには、固定位置のひずみと同じひずみが生じているものとする。

40

【0033】

なお、光ファイバ20aおよび20bは、環構造体10のひずみに代えて変位を算出することとしてもよい。環構造体10のひずみの算出方法については、後に詳述する。また、光ファイバ20aおよび20bが環構造体10に固定される位置は一箇所の断面に限らず、複数箇所であってもよい。この場合、環構造体10の複数の箇所に固定された光ファイバ20aは、一本の光ファイバが一筆書きになるように接続された構成であってもよい。また、光ファイバ20bについても同様である。

50

【 0 0 3 4 】

また、光ファイバ 2 0 a および 2 0 b の一端は、スペクトル観測部 3 0 に接続されている。

【 0 0 3 5 】

スペクトル観測部 3 0 は、光ファイバ 2 0 a および 2 0 b に所定の周波数の光を入射し、光ファイバ 2 0 a および 2 0 b の内部で散乱した B G S をそれぞれ観測する。スペクトル観測部 3 0 は、観測した B G S をひずみ計測部 4 0 に出力する。

【 0 0 3 6 】

ひずみ計測部 4 0 は、上述したスペクトル観測部 3 0 で観測された B G S から環構造体 1 0 で発生するひずみを計測するものである。

【 0 0 3 7 】

変位算出部 5 0 は、ひずみ計測部 4 0 で計測された環構造体 1 0 のひずみに基づいて変位を算出するものである。ただし、前述したように、変位算出部 5 0 に入力されるひずみは、スペクトル観測部 3 0 とひずみ計測部 4 0 より得られたひずみだけではなく、例えばひずみゲージなど別な方法によって得られたものであってもよい。算出方法については後に詳述する。

【 0 0 3 8 】

なお、スペクトル観測部 3 0、ひずみ計測部 4 0 および変位算出部 5 0 は、例えばコンピュータで構成されている。また、コンピュータは、以下に説明する変位計測方法を実行するためのプログラムを備え、当該プログラムにより変位計測方法を行ってもよい。

【 0 0 3 9 】

[2 . 変位計測方法]

次に、上述した変位計測装置 1 0 0 を用いた変位計測方法について説明する。図 4 は、変位計測方法の手順を示すフローチャートである。

【 0 0 4 0 】

図 4 に示すように、変位計測方法においては、はじめに、スペクトル観測部 3 0 により、環構造体 1 0 に設置された光ファイバ 2 0 a および 2 0 b (図 3 の (a) 参照) の B G S を観測する (ステップ S 1 1) 。これにより、図 3 の (a) に示した環構造体 1 0 の外周と内周における B G S が得られる。なお、ステップ S 1 1 は、本発明におけるスペクトル観測ステップに相当する。

【 0 0 4 1 】

次に、ひずみ計測部 4 0 において、予め構築されていた観測モデル (式) が、観測した B G S に近づくようにあてはめを行う。これにより、環構造体 1 0 の外周および内周のひずみを計測する (ステップ S 1 2) 。なお、ステップ S 1 2 は、本発明におけるひずみ計測ステップに相当する。ステップ S 1 1 およびステップ S 1 2 の代わりに、別な方法によって、環構造体の外周および内周のひずみを計測するステップを入れてもよい。

【 0 0 4 2 】

さらに、変位算出部 5 0 において、計測された環構造体 1 0 の外周および内周のひずみから、環構造体 1 0 の各位置における変位を算出する (ステップ S 1 3) 。なお、ステップ S 1 3 は、本発明における変位算出ステップに相当する。

【 0 0 4 3 】

以下、各ステップについて詳細に説明する。

【 0 0 4 4 】

[2 - 1 . 環構造体のひずみ計測の原理]

はじめに、ひずみ計測の原理について説明する。図 5 は、本実施の形態にかかる変位計測方法における環構造体 1 0 の観測モデルを、環構造体 1 0 の長手方向に見た図である。

【 0 0 4 5 】

ひずみ計測では、上述したように、予め B G S のモデル (モデル B G S) を構築しておき、B G S を観測して、予め構築されていたモデル B G S が観測した B G S に近づくようにあてはめを行うものである。また、B G S の観測は、環構造体 1 0 の断面ごとに行うも

10

20

30

40

50

のとする。

【0046】

まず、計測対象の環構造体10のモデルBGSについて説明する。ここでは、環構造体10として、環構造体10の長手方向と垂直な方向の断面が円環である環構造体を観測モデルとする。なお、環構造体10の断面は円環に限らず、非線形の連続する構造であれば、どのようなものであってもよい。例えば、断面が楕円形の環構造体であってもよい。

【0047】

図5に示すように、環構造体10の長手方向(方向)の軸に垂直な面において、環構造体10の断面である円環の中心を原点O、原点Oを通る一方向にx軸、原点Oを通りx軸方向に垂直な他の方向にy軸をとる。さらに、x軸の負方向から右回りの角度をとする。

10

【0048】

ここで、環構造体10の周囲に設置された光ファイバ20aおよび20b上(図5には示されていない)での、第i番目のBGS観測点に対応する角度を ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, I$ 、IはBGSの観測点の数)、 ϕ_i を中心としたBGSの観測区間を $\Delta\phi_i$ とし、BGSを観測する周波数については、第j番目の観測周波数を ν_j ($j = 1, 2, \dots, J$ 、Jは観測周波数の数)とする。また、観測角度 ϕ_i 、観測周波数 ν_j で観測されたBGSの値を $G_{obs}(\nu_j, \phi_i)$ 、モデルBGSより求められたBGSの値を $G_{mod}(\nu_j, \phi_i, q)$ とする。そして、このモデルBGSが観測されたBGSに最も良く一致する条件から、求めるべきパラメータqを得る。具体的には、全観測角度、全観測周波数について、観測BGSとモデルBGSの差の二乗和を評価関数Eとして次の(式1)で与え、評価関数Eが最小となる時のパラメータqを非線形最小二乗法を用いて求める。なお、パラメータqは、フーリエ係数で表されるパラメータpを含むパラメータである。なお、パラメータp、qはベクトルであり、以下に示す式中では太字で示している。パラメータpおよびqについては後に詳述する。

20

【0049】

【数1】

$$E = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \{G_{obs}(\nu_j, \phi_i) - G_{mod}(\nu_j, \phi_i, \mathbf{q})\}^2$$

30

..... (式1)

【0050】

環構造体10の断面における円環の円周上の観測角度 ϕ_i におけるひずみ $\varepsilon(\phi_i)$ は $\varepsilon(\phi_i + 2\pi)$ に等しく、 $\varepsilon(\phi_i)$ は周期 2π をもつ周期関数となっている。そこで、環構造体10に生じるひずみを、周期 2π のフーリエ級数として次の(式2)で与える。

【0051】

【数2】

$$\varepsilon(\phi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\phi + b_n \sin n\phi)$$

40

..... (式2)

【0052】

ここで、(式2)のフーリエ係数をまとめて以下の(式3)のように表す。

【0053】

【数3】

$$\mathbf{p} = [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_N \quad b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_N]$$

..... (式3)

【0054】

ここで、Nはフーリエ係数の最高次数である。

50

【 0 0 5 5 】

これらのパラメータを明示的に示す場合にはひずみを (, p) と書くことにする。
(, p) に対応する周波数は、次の (式 4) で表される。

【 0 0 5 6 】

【 数 4 】

$$v_B(\varepsilon(\phi, p)) = v_B(0) + C \cdot \varepsilon(\phi, p) \dots\dots\dots(式 4)$$

ここで、

$v_B(\varepsilon(\phi, p))$ は、ひずみ $\varepsilon(\phi, p)$ に対応した周波数

$v_B(0)$ は、ひずみ 0 に対応する周波数

C は、ひずみと光周波数の関係を与える比例係数である。

10

【 0 0 5 7 】

環構造体 1 0 の断面の円環の半径を 1 に規格化すると、 i 、 j におけるモデル B G S は次の (式 5) で表される。

【 0 0 5 8 】

【 数 5 】

$$G_{\text{mod}}(v_j, \phi_i, p) = \int_{\phi_i - \Delta\phi/2}^{\phi_i + \Delta\phi/2} \frac{h(w/2)^2}{\{v_j - v_B(\varepsilon(\phi, p))\}^2 + (w/2)^2} d\phi$$
$$= \int_{\phi_i - \Delta\phi/2}^{\phi_i + \Delta\phi/2} \frac{h(w/2)^2}{\{v_j - v_B(0) - C\varepsilon(\phi, p)\}^2 + (w/2)^2} d\phi \dots\dots\dots(式 5)$$

20

ここで、

$\phi_i (i = 1, 2, \dots, I)$ は、 i 番目の観測点に対応する角度

$v_j (j = 1, 2, \dots, I)$ は、 j 番目の観測周波数

$\Delta\phi$ は、 ϕ を中心とした BGS 観測区間

h は、非積分関数であるローレンツ関数の最大値

w は、被積分関数であるローレンツ関数の半値全幅

$v_B(0)$ は、ひずみ 0 に対応する周波数

C は、ひずみと光周波数の関係を与える比例係数

$\varepsilon(\phi, p)$ は、フーリエ級数で与えられたひずみ

p は、フーリエ係数

である。

30

【 0 0 5 9 】

なお、 (式 5) は、本発明における (式 A) に相当する。 $v_B(0)$ はひずみ 0 に対応する周波数、 C はひずみと光周波数の関係を与える比例係数である。

40

【 0 0 6 0 】

(式 5) において、 p は求めるべきひずみを与えるパラメータであり、 h、 w、 $v_B(0)$ 、 C は BGS の基本特性についてのパラメータである。

【 0 0 6 1 】

上述したように、環構造体 1 0 の断面ごとに BGS が観測され、ひとつの断面に設置された光ファイバ 2 0 a および 2 0 b の長さは光損失が十分小さく無視できる程度であると考えられることから、環構造体 1 0 の断面ごとの光ファイバ 2 0 a および 2 0 b では h は一定であると仮定することができる。しかし、環構造体 1 0 の断面間ではその距離が長いこと、および、環構造体 1 0 の断面間に光ファイバ 2 0 a および 2 0 b の接続点がある場合があるなどの理由により、断面間では光ファイバ 2 0 a および 2 0 b に生じる散乱光の

50

パワーが異なることが考えられる。そのため、hについても環構造体10の断面ごとに観測されたBGSから推定する必要がある。したがって、フーリエ係数で表されるパラメータpと各断面の環構造体10におけるhの両方を求めることとする。以下では、両パラメータを合わせて $q=[p \quad h]$ と表す。

【0062】

[2-2. ひずみの計測]

次に、上述したひずみ計測方法により、具体的に環構造体10のひずみの計測を行う。図6は、本実施の形態にかかるひずみ計測の手順を示すフローチャートである。図7は、本実施の形態にかかるひずみ計測について、評価関数Eの計算を模式的に示した図である。

10

【0063】

はじめに、上述したようにBSGの観測を行う。BGSの観測では、まず、図6に示すように、BGSの観測条件を設定する(ステップS21)。観測条件として、観測点と、観測周波数とを定める。

【0064】

BGSを利用したひずみ計測では、ひずみは環構造体10上の位置の関数として得られる。そこで、環構造体10の長手方向である、例えば 方向において、環構造体10の第k番目の断面である円環の円周上のBGS観測点の位置を、環構造体10に設置されている光ファイバ20aおよび20bの半径を用いて、その位置に対応する角度 ϕ_i に変換する。

20

【0065】

以下では、簡単化のためBGS観測点の位置が等間隔である場合について考える。また、どの断面についても同様であることから、断面の番号については省略する。観測開始角度を ϕ_1 、全観測点の数をI、観測点の間隔を $\delta\phi$ で表すと、 ϕ_i は次の(式6)で表される。

【0066】

【数6】

$$\phi_i = \phi_1 + (i-1) \cdot \delta\phi \quad (i=1,2,\dots,I)$$

..... (式6)

30

【0067】

これにより、BGSの観測点の位置が角度 ϕ_i で定められる。

【0068】

また、観測開始周波数を ν_1 、全観測周波数の数をJとし、周波数についても等間隔で観測するものとする、観測周波数 ν_j は次の(式7)で表される。

【0069】

【数7】

$$\nu_j = \nu_1 + (j-1) \cdot \delta\nu \quad (j=1,2,\dots,J)$$

..... (式7)

40

【0070】

次に、上述した観測条件の下でBGSを観測し、観測周波数と角度をパラメータとした $G_{obs}(\nu_j, \phi_i)$ ($i=1, 2, \dots, I$) ($j=1, 2, \dots, J$)を得る(ステップS22)。 $G_{obs}(\nu_j, \phi_i)$ は、観測周波数 ν_j 、角度 ϕ_i において観測されたBGSの値である。

【0071】

次に、すべての ϕ_i および ν_j についてモデルBGSの値 $G_{mod}(\nu_j, \phi_i, q)$ を算出する(ステップS23)。ここで、 $G_{mod}(\nu_j, \phi_i, q)$ の値は、(式5)の数学的な積分、または、数値積分によって求める。また、評価関数Eを最小化するqを効率的に得るために、例えば、滑降シンプレックス法を用いる。滑降シンプレックス法は

50

、求めるべき解 $q = [p \quad h]$ の候補群を、求めるべきパラメータの個数より 1 個以上多く用意し、各解候補に対応する評価値が小さくなるように解候補群を更新していくことで最適解を得るという繰り返し計算方法である。

【0072】

次に、算出したモデル BGS と観測された BGS を用いて (式 1) の評価関数 E を算出する。図 7 は、上述した (式 1) における評価関数 E の計算を模式的に示した図であり、(a) は観測された BGS である $G_{obs}(j, i)$ 、(b) はモデルより求められた BGS である $G_{mod}(j, i, q)$ である。図 7 に示すように、モデルより求められた BGS の値 $G_{mod}(j, i, q)$ (図 7 の (b)) を、観測された BGS の値 $G_{obs}(j, i)$ (図 7 の (a)) に近づける。より具体的には、滑降シンプレックス法を用いてパラメータ q を更新しながら、モデル BGS と観測された BGS との差を成分としてもつ評価関数 E を最小化するためのパラメータ q を求める (ステップ S24)。そして、求められたパラメータ q のうちのひずみにかかわる p を (式 2) に代入することによって、環構造体 10 の外周側のひずみ δ_{out} 、および、内周側のひずみ δ_{in} が得られる。

10

【0073】

なお、ひずみの計測方法は、上述した BGS を利用した方法に限らず、他の方法であってもよい。他の方法の場合でも、ひずみの観測モデルを構築し、構築した観測モデルを用いて環構造体のひずみを計測すればよい。例えば、BGS 観測点に相当する位置にひずみゲージなどを設置し、それを用いてひずみを計測し、それらのひずみを δ_{out} および δ_{in} としてもよい。

20

【0074】

[2-3. 変位の算出]

次に、環構造体 10 の変位の算出を行う手順について説明する。

【0075】

図 8 は、本実施の形態にかかる変位計測方法において環構造体 10 の変位を算出するための観測モデルの図であり、(a) は観測モデルを模式的に示した図、(b) は変位前後の観測位置の関係を示す図である。

【0076】

環構造体 10 の解析は複雑であるため、環構造体 10 を後に詳述する微小直線梁 (微小片) の集合とみなして環構造体 10 の変位を算出する。詳細には、図 8 の (a) に示すように、環構造体 10 は微小片 60 の集合体であるとみなす。そして、図 8 の (b) に示すように、環構造体 10 の変形前の点 Q に配置されていた微小片 60 が、環構造体 10 の変形に伴い点 Q' に移動したものと、環構造体 10 の変位を算出する。

30

【0077】

ここでは、簡単化のために、図 8 の (b) に示すように、環構造体 10 の円環の中立軸は円環の中心線に一致しており、その半径を r とする。また、この中心線から外周と内周までの距離は等しく、その距離を h とする。図 8 の (b) では、図を見やすくするために外周と内周の一部のみが示されている。これにより、内周の半径は $(r - h)$ 、外周の半径は $(r + h)$ と表される。また、点 Q の位置は、環構造体 10 の外周と内周との中間を通る円環と x 軸の負方向との交点である基準点 P から時計回りに角度 θ_m 回転させた位置とする。このとき、点 Q から点 Q' への x 軸方向の変位は x_m 、y 軸方向の変位は y_m と表す。なお、角度 θ_m は、環構造体 10 における第 m 番目の変位算出角度とし、m を変更することにより環構造体 10 上の各位置の変位を得ることができる。

40

【0078】

以下、上述した、円環のひずみから環構造体 10 の変位を算出する方法について説明する。

【0079】

はじめに、理解を容易にするために、微小片 (微小直線梁) が直線状に配置された直線梁を観測モデルとした従来の変位算出方法について説明する。図 9 は、微小直線梁を用い

50

た直線梁の観測モデルの図である。

【 0 0 8 0 】

図 9 に示す観測モデルは、複数の微小直線梁の集合体である直線梁 6 1 である。直線梁 6 1 において、左端から第 1 番目の微小直線梁を微小直線梁 6 0 a、第 2 番目の微小直線梁を微小直線梁 6 0 b、第 m 番目の微小直線梁を微小直線梁 6 0 c と表している。図 9 は、直線梁 6 1 の左端を固定し、右端に変位を与えたときの変形後の微小直線梁 6 0 a、微小直線梁 6 0 b および微小直線梁 6 0 c の状態を示している。変形前の直線梁 6 1 の長手方向に u 軸、変形前の直線梁 6 1 の長手方向と直交する方向に 軸をとり、微小直線梁 6 0 a、微小直線梁 6 0 b および微小直線梁 6 0 c のそれぞれの長さを d u としている。この長さは変形前後で変わらない。

10

【 0 0 8 1 】

ここで、微小直線梁 6 0 c のたわみ角、すなわち、微小直線梁 6 0 c と u 軸とのなす角度を ω_m 、第 m - 1 番目の微小直線梁に対する微小直線梁 6 0 c のたわみ角の微小変化量を $d \omega_m$ 、微小直線梁 6 0 c の 軸方向の全変位を v_m 、第 m - 1 番目の微小直線梁に対する微小直線梁 6 0 c の変位を $d v_m$ とし、これらの関係を求める。

【 0 0 8 2 】

m = 1 すなわち第 1 番目の微小直線梁 6 0 a では、図 9 に示すように、たわみ角 ω_1 はその微小変化量 $d \omega_1$ となっている。また、その変位 $d v_1$ も全変位 v_1 に等しい。したがって、第 1 番目の微小直線梁 6 0 a の 軸方向の全変位 v_1 は、次の (式 8) のように表される。

20

【 0 0 8 3 】

【数 8】

$$v_1 = \omega_1 du = d\omega_1 du = dv_1 \dots \dots \dots (式 8)$$

【 0 0 8 4 】

また、微小直線梁 6 0 b のたわみ角 ω_2 は、微小直線梁 6 0 a と微小直線梁 6 0 b に生じた微小変化量 $d \omega_1$ と $d \omega_2$ の和であり、全変位 v_2 もそれぞれの変位 $d v_1$ と $d v_2$ の和となっている。したがって、第 2 番目の微小直線梁 6 0 b の変位 $d v_2$ は、次の (式 9) のように表される。

【 0 0 8 5 】

30

【数 9】

$$dv_2 = \omega_2 du = (d\omega_1 + d\omega_2) du \dots \dots \dots (式 9)$$

【 0 0 8 6 】

したがって、第 2 番目の微小直線梁 6 0 b の 軸方向の全変位 v_2 は、次の (式 10) のように表すことができる。

【 0 0 8 7 】

【数 10】

$$v_2 = dv_1 + dv_2 = d\omega_1 du + (d\omega_1 + d\omega_2) du = \sum_{m'=1}^2 \sum_{m''=1}^{m'} d\omega_{m''} \cdot du \dots \dots \dots (式 10)$$

40

【 0 0 8 8 】

以下、同様に考えて、第 2 番目を第 m 番目に置き換えると、第 m 番目の微小直線梁 6 0 c のたわみ角 ω_m 、 軸方向の全変位 v_m 、第 m - 1 番目の微小直線梁に対する微小直線梁 6 0 c の変位 $d v_m$ 、 軸方向の全変位を v_m は、

【数 1 1】

$$\omega_m = \sum_{m'=1}^m d\omega_{m'}$$

..... (式 1 1)

【数 1 2】

$$v_m = \sum_{m'=1}^m dv_{m'}$$

..... (式 1 2)

10

【数 1 3】

$$dv_m = \omega_m du = \sum_{m'=1}^m d\omega_{m'} \cdot du$$

..... (式 1 3)

【数 1 4】

$$v_m = \sum_{m'=1}^m \sum_{m''=1}^{m'} d\omega_{m''} \cdot du$$

..... (式 1 4)

20

と表すことができる。

【0089】

次に、上述した直線梁 6 1 の観測モデルにおいて、計測されたひずみから微小片（微小直線梁）6 0 のたわみ角の微小変化量 d を求める。図 1 0 は、微小片 6 0 におけるたわみ角の微小変化量 d について説明するための図である。

【0090】

図 1 0 では、A、B、C、D を頂点とする微小直線梁 6 0 d を示している。微小直線梁 6 0 d の厚み、すなわち、図 1 0 に示す辺 AD および辺 BC の長さを 2 とする。また、外周側の辺 AD および内周側の辺 BC に生じているひずみをそれぞれ ϵ_{out} 、 ϵ_{in} とする。また、微小直線梁 6 0 d は、頂点 A、B、C、D がそれぞれ頂点 A'、B'、C、D の位置となるように変形するものとする。微小直線梁 6 0 d において、たわみ角の微小変化量 d が生じたとすると、 $A'D = (1 + \epsilon_{out}) du$ 、 $B'C = (1 + \epsilon_{in}) du$ となるので、たわみ角の微小変化量 d は次の（式 1 5）で求められる。

30

【0091】

【数 1 5】

$$-d\omega = \frac{A'D - B'C}{2\eta} = \frac{\epsilon_{out} - \epsilon_{in}}{2\eta} du$$

..... (式 1 5)

40

【0092】

なお、（式 1 5）の左辺において d に負の符号がついているのは、図 1 0 では右回りの角度を正にとっているため、左回りのたわみ角の微小変化量 d は負で示されるためである。

【0093】

（式 1 4）と（式 1 5）より、軸方向の全変位 v_m は、次の（式 1 6）のように書き換えられる。

【0094】

【数 1 6】

$$v_m = \sum_{m'=1}^m \sum_{m''=1}^{m'} \frac{\varepsilon_{in,m''} - \varepsilon_{out,m''}}{2\eta} (du)^2$$

..... (式 1 6)

【0 0 9 5】

次に、上述した直線梁 6 1 の観測モデルにおける変位計測方法を環構造体 1 0 に応用した、微小直線梁を用いた環構造体 1 0 の観測モデルについて説明する。

【0 0 9 6】

図 1 1 は、本実施の形態にかかる変位計測方法における変形前の環構造体 1 0 の観測モデルを、環構造体 1 0 の長手方向に見た図である。図 1 2 は、微小直線梁を用いた環構造体 1 0 の観測モデルの図である。

10

【0 0 9 7】

図 1 1 に示すように、変形前の環構造体 1 0 の断面の円環において、頂点を A、B、C、D とする微小片 7 0 を考える。この微小片 7 0 に対応する微小中心角を とする。また、図 8 の (b) と同様、環構造体 1 0 の円環の中立軸は円環の中心線に一致しており、その半径を r とする。また、この中心線から外周と内周までの距離を、いずれも とする。このとき、環構造体 1 0 の外周における弧 A D と内周における弧 B C の長さは、それぞれ (r +) 、 (r -) となる。

20

【0 0 9 8】

ここで、r とすると、両者はいずれも r と近似することができるので、この微小片 7 0 を微小直線梁とみなすことができる。そこで、図 1 2 に示すように、環構造体 1 0 を微小片 7 0 の集合として考える。図 1 2 に示す一点鎖線は、変形前の環構造体 1 0 の外周と内周との中央を通る円環の中心線である。変位算出に用いる角度 を、と同じように x 軸負方向から右回りにとる。

【0 0 9 9】

図 1 2 において、環構造体 1 0 は、第 1 番目の微小片 7 0 a、第 2 番目の微小片 7 0 b、・・・、第 m 番目の微小片 (図示せず) を有している。環構造体 1 0 が M 個の微小片で構成されている場合、第 M 番目の微小片と第 1 番目の微小片 7 0 a とは接続している。

【0 1 0 0】

ここで、第 m 番目の微小片の 軸と x 軸とのなす角を θ_m 、x 軸方向および y 軸方向の全変位をそれぞれ x_m および y_m 、第 m - 1 番目の微小片に対する第 m 番目の微小片の変位を dx_m 、 dy_m とし、これらの関係を求める。上述した直線梁 6 1 の観測モデルと同様に、m = 1 すなわち第 1 番目の微小片 7 0 a から m = 2 すなわち第 2 番目の微小片 7 0 b について順に求め、第 2 番目を第 m 番目に置き換えると、第 m 番目の微小片の x 軸方向の全変位 x_m および y 軸方向の全変位 y_m は、それぞれ以下の (式 1 7)、(式 1 8) のように表される。

30

【0 1 0 1】

【数 1 7】

$$\Delta x_m = \sum_{m'=1}^m dx_{m'} = \sum_{m'=1}^m dv_{m'} \cdot \cos \theta_{m'}$$

40

..... (式 1 7)

【0 1 0 2】

【数 1 8】

$$\Delta y_m = \sum_{m'=1}^m dy_{m'} = \sum_{m'=1}^m dv_{m'} \cdot \sin \theta_{m'}$$

..... (式 1 8)

【0 1 0 3】

50

円環の場合には $du = r \cdot d\theta$ であり、また上述した微小直線梁 $60c$ で得られている結果、すなわち、(式13)を上式に代入すると、 x_m および y_m は以下の(式19)および(式20)のように表される。

【0104】

【数19】

$$\begin{aligned} \Delta x_m &= \sum_{m'=1}^m \left(\sum_{m''=1}^{m'} d\omega_{m''} \cdot du \right) \cos \theta_{m'} \\ &= \sum_{m'=1}^m \left\{ \sum_{m''=1}^{m'} \frac{\varepsilon_{m,m''} - \varepsilon_{out,m''}}{2\eta} (r\Delta\theta)^2 \right\} \cos \theta_{m'} \\ &= \sum_{m'=1}^m \left(\sum_{m''=1}^{m'} \frac{\varepsilon_{m,m''} - \varepsilon_{out,M''}}{2\eta} \right) (r\Delta\theta)^2 \cdot \cos \theta_{m'} \end{aligned}$$

10

..... (式19)

【0105】

【数20】

$$\begin{aligned} \Delta y_m &= \sum_{m'=1}^m \left(\sum_{m''=1}^{m'} d\omega_{m''} \cdot du \right) \sin \theta_{m'} \\ &= \sum_{m'=1}^m \left(\sum_{m''=1}^{m'} \frac{\varepsilon_{m,m''} - \varepsilon_{out,m''}}{2\eta} \right) (r\Delta\theta)^2 \cdot \sin \theta_{m'} \end{aligned}$$

20

..... (式20)

【0106】

なお、 $\varepsilon_{out,m}$ 、 $\varepsilon_{in,m}$ は、それぞれ第 m 番目の微小片の外周および内周に生じているひずみである。

【0107】

上述したように、適当な角度の間隔で外周側の辺 AD および内周側の辺 BC におけるひずみ ε_{in} 、 ε_{out} を求め、(式19)および(式20)に代入することによって、環構造体10の任意の位置の変位を得ることができる。

30

【0108】

以上の式を用いることにより、ひずみ ε_{in} 、 ε_{out} から環構造体10の x 軸方向の変位 x_m および y 軸方向の変位 y_m を得ることができる。

【0109】

[3. 効果等]

以下、上述した変位計測方法の有効性を確かめるために行ったシミュレーションの結果について説明する。図13は、実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の外周のひずみのシミュレーション結果を示す図である。図14は、実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の内周のひずみのシミュレーション結果を示す図である。図15は、環構造体の変形前後の状態を説明するための概略図である。図16は、本実施の形態にかかる変位計測方法による環構造体の変位のシミュレーション結果を示す図である。

40

【0110】

はじめに、ひずみ計測のシミュレーション結果について説明する。ひずみ計測のシミュレーションでは、以下のようにして観測 BGS である $G_{obs}(j, i)$ を生成する。生成した $G_{obs}(j, i)$ によりひずみを求めるシミュレーションを行った。

【0111】

ここで、環構造体10の半径を r 、環構造体10の中立軸から環構造体10の外周までの距離を ρ 、断面積を A 、断面係数を Z 、力学的パラメータであるヤング率を E_y とし、後に説明する図15の(a)に示すように、環構造体10の y 軸に一对の荷重が作用している場合を考えると、環構造体10の円周上に生じるひずみ $\varepsilon(\theta)$ は以下の(式21)

50

で近似される。

【 0 1 1 2 】

【 数 2 1 】

$$\varepsilon(\phi) = \frac{P}{\kappa E_y A} \cdot \frac{\eta/r}{\left(1 + \eta/r\right)} \left\{ \frac{1}{\pi} \left(\frac{\eta/r}{3} + 1 \right) - \frac{\left| \sin\left(\phi - \pi/2\right) \right|}{2} \right\}$$

..... (式 2 1)

【 0 1 1 3 】

(式 2 1) に示したひずみ () を用い、設定された BGS 観測角度 θ_i 、観測周波数 ω_j について算出された BGS を観測 BGS $G_{obs}(\omega_j, \theta_i)$ とした。シミュレーションでは、(式 2 1) における r 、 η 、 $E_y A$ の値を、 971.4 [mm]、 23.6 [mm]、 5361×10^9 [N・mm³] とした。BGS の基本特性である $h_b(0)$ 、 w 、 C の値は、 5.10×10^{-9} [W]、 10.82 [GHz]、 0.03 [GHz]、 50.0 [GHz] とした。これらの値は、観測に用いる環構造体 10 の一例であり、光ファイバの典型的な値である。なお、 $h_b(0)$ はひずみ 0 に対応する周波数、 C はひずみと光周波数の関係を与える比例係数である。さらに、BGS の観測条件にかかわる θ_1 、 I_1 、 ω_1 、 J はそれぞれ、 0 [°]、 130 、 10.82 [GHz]、 0.002 [GHz]、 161 である。また、 θ_{out} および θ_{in} は、環構造体 10 の内外周で異なっており、外周に対する θ_{out} および θ_{in} は、それぞれ 2.9 [°] および 57.6 [°]、内周に対する θ_{out} および θ_{in} は、それぞれ 3.0 [°] および 60.5 [°] とした。

【 0 1 1 4 】

ここでは、 P を 70 [N]、フーリエ級数の最大次数 N を 10 としてひずみ () を求めた。求められた環構造体 10 の外周と内周のひずみをそれぞれ図 1 3 および図 1 4 に示す。実線は上述した本実施の形態におけるひずみ計測方法によって計測されたひずみ、細線は(式 2 1) で算出された理論的に求められたひずみであり、破線は BGS をローレンツ関数にあてはめる従来の方法で得られたひずみである。外周および内周のいずれのひずみも、本実施の形態におけるひずみ計測方法により求められたひずみのほうが、従来方法により求められたひずみよりも、理論的に求められたひずみに近いことがわかる。

【 0 1 1 5 】

90 [°] において、理論的ひずみ、従来の方法で得られた外周のひずみ、および、本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周のひずみはそれぞれ 9.94×10^{-5} 、 6.20×10^{-5} 、 9.05×10^{-5} であり、理論的ひずみと従来の方法で得られた外周のひずみの誤差、および、理論的ひずみと本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周のひずみの誤差は、それぞれ -37.4×10^{-6} 、 -8.9×10^{-6} であった。また、 180 [°] においては、理論的ひずみ、従来の方法で得られた外周のひずみ、および、本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周のひずみはそれぞれ -5.55×10^{-5} 、 -5.00×10^{-5} 、 -5.67×10^{-5} であり、理論的ひずみと従来の方法で得られた外周のひずみの誤差、および、理論的ひずみと本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周のひずみの誤差は、それぞれ 5.5×10^{-6} 、 -1.2×10^{-6} であった。

【 0 1 1 6 】

また、同様に、 90 [°] において、理論的ひずみ、従来の方法で得られた外周のひずみ、および、本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周のひずみはそれぞれ -10.27×10^{-5} 、 -6.00×10^{-5} 、 -9.35×10^{-5} であり、理論的ひずみと従来方法で得られた内周のひずみの誤差、および、理論的ひずみと本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた内周のひずみの誤差は、それぞれ 42.7×10^{-6} 、 9.2×10^{-6} であった。また、 180 [°] においては、理論的ひずみ、従来の方法で得られた外周のひずみ、および、本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた外周

のひずみはそれぞれ 5.99×10^{-5} 、 5.20×10^{-5} 、 6.10×10^{-5} であり、理論的ひずみと従来方法で得られた内周のひずみの誤差、および、理論的ひずみと本実施の形態におけるひずみ計測方法で得られた内周のひずみの誤差は、それぞれ -7.9×10^{-6} 、 1.1×10^{-6} であった。

【0117】

以上より、本実施の形態におけるひずみ計測方法では、誤差が数分の一に低減されていることがわかった。このように、本実施の形態におけるひずみ計測方法では、計測精度が向上していることが確認できた。

【0118】

次に、変位計測のシミュレーション結果について説明する。

10

【0119】

上述した環構造体10の変位計測方法の有効性を確認するために、環構造体10の変位計測シミュレーションを行った。ここでは、上述した本実施の形態におけるひずみ計測方法と同じ条件の下、環構造体10の内周のひずみを与えるフーリエ係数 p_{in} と外周のひずみを与えるフーリエ係数 p_{out} とが得られているものとする。ひずみの計算角度間隔を $0.1 [^\circ]$ として、得られているフーリエ係数 p_{in} および p_{out} を(式2)に代入して円環の内周と外周のひずみを算出し、変位を求めた。

【0120】

まず、図15の(b)に示すように、y軸とx軸に関して対象に変位が発生することから、環構造体10を長手方向の軸(中心O)で固定したときの任意の位置における変位を求める。ここで、破線、実線の円はそれぞれ変形前、変形後の円環の中心線、破線円から実線円に伸びている矢印は変位である(各位置から円の外側方向の変位を正としている)。

20

【0121】

求められた環構造体10の変位を図16に示す。図16における実線は、観測されたBGSから環構造体10の内周のひずみおよび外周のひずみを求めて変位を計測する本実施の形態における変位計測方法によって求めた変位、破線は(式21)から理論的ひずみを求め、(式19)および(式20)により求めた変位である。ここで、x、y軸方向の直径変化 D_x 、 D_y は力学的解析によって次の(式22)で与えられる。

30

【0122】

【数22】

$$D_x = -\frac{Pr}{\kappa EA} \left\{ \frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \right\}, \quad D_y = \frac{Pr}{\kappa EA} \left\{ \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right\}$$

..... (式22)

【0123】

90、180°における求めた円環の変位は、それぞれ $D_y / 2$ 、 $D_x / 2$ の値に対応する。まず、(式22)より求められた90[°]における $D_y / 2$ と理論的ひずみから求めた変位はそれぞれ $9.436 \times 10^{-1} [mm]$ 、 $9.462 \times 10^{-1} [mm]$ であり、その誤差は $2.6 \times 10^{-3} [mm]$ 、180[°]における $D_x / 2$ と理論的ひずみから求めた変位はそれぞれ $-8.665 \times 10^{-1} [mm]$ 、 $-8.635 \times 10^{-1} [mm]$ であり、その誤差は $3.0 \times 10^{-3} [mm]$ であることから、誤差は元の変位の1%より小さくなっていることがわかった。したがって、円環の内外周のひずみから変位を計測する方法の有効性が確認できた。

40

【0124】

次に、90[°]における本方法で得られた変位は $9.453 \times 10^{-1} [mm]$ であり、上述の $D_y / 2$ との誤差は $1.7 \times 10^{-3} [mm]$ 、180[°]において本方法で得られた変位は $-8.643 \times 10^{-1} [mm]$ であり、 $D_x / 2$ との誤差は $2.2 \times 10^{-3} [mm]$ であった。このように、本実施の形態における変位計測方法による変位の誤差は、理論的ひずみから求めた変位の誤差と同程度小さくなり、計測精度が向上して

50

いることがわかった。したがって、本実施の形態における環構造体 10 の変位計測方法の有効性が確認できた。

【0125】

以上、本実施の形態にかかる変位計測装置によると、観測モデルにおいてひずみをフーリエ級数で与えており、計測した BGS から、観測モデルを用いてひずみを計測するので、環構造体においてセンサである環状の構造物を支持している点に限らず、支持している点以外の部分においてもひずみを直接得ることができる。また、計測したひずみに基づいて環構造体の変位を算出するので、環構造体における変位を分布的に算出することができる。したがって、計測対象物である環構造体のあらゆる位置において、ひずみおよび変位を算出することができる。

10

【0126】

これにより、計測対象物のあらゆる位置においてひずみおよび変位を計測することができる。

【0127】

なお、上述した実施の形態では、スペクトル観測ステップの後、ひずみ計測を行い、計測で得られたひずみに基づいて変位を算出する構成であったが、ひずみ計測を行わず、スペクトル観測ステップの後ひずみ計測を行わず、観測した BGS に基づいて変位を算出する構成であってもよい。

【0128】

以上、本発明にかかる変位計測方法および変位計測装置について、実施の形態に基づいて説明したが、本発明は実施の形態に限定されるものではない。実施の形態に対して当業者が思いつく変形を施して得られる形態、および、複数の実施の形態における構成要素を任意に組み合わせて実現される別の形態も本発明に含まれる。

20

【0129】

例えば、上述した実施の形態では、環構造体の断面形状を円形としているが、環構造体の断面形状はこれに限らず非線形の連続する形状であればよい。例えば、環構造体の断面形状は楕円形であってもよい。

【0130】

また、上述した実施の形態では、計測対象物の複数箇所に光ケーブルが配置される構成としたが、光ケーブルを配置する位置は一箇所であってもよいし、複数箇所であってもよい。また、光ケーブルを環構造体の周囲の複数箇所に配置する場合には、これらの光ケーブルは 1 本の光ケーブルで一筆書きとなるように環構造体の周囲に配置されていてもよい。

30

【0131】

また、上述した実施の形態では、計測対象物の環構造体の外周および内周に光ケーブルが配置される構成としたが、計測対象物のひずみのみを計測する場合には、外周のみに光ケーブルが配置される構成としてもよい。

【0132】

また、上述した実施の形態では、スペクトル観測部 30、ひずみ計測部 40 および変位算出部 50 は、一台のコンピュータで一体に構成されていてもよいし、複数のコンピュータまたは機器でそれぞれ構成されていてもよい。

40

【0133】

また、上述した実施の形態では、評価関数 E を最小化する q を得るための方法として滑降シンプレックス法を用いることとしたが、滑降シンプレックス法に限らず他の方法を用いてもよい。

【産業上の利用可能性】

【0134】

本発明にかかる変位計測方法および変位計測装置は、トンネル、パイプライン、ガスタンク、航空機など断面が環状の構造物のひずみおよび変位の計測に有用である。

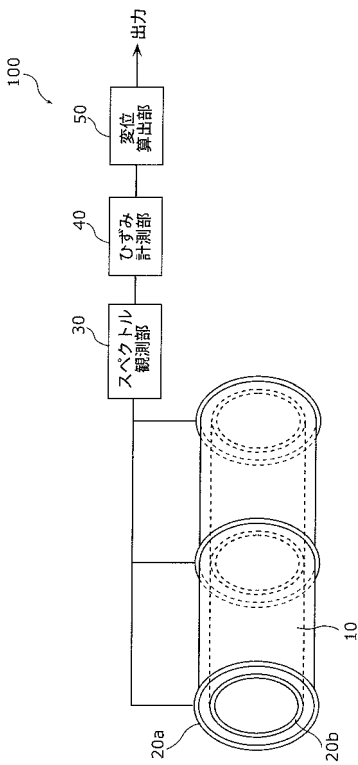
【符号の説明】

50

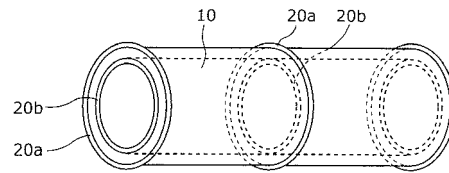
【 0 1 3 5 】

- 1 0 環構造体
- 2 0 a、2 0 b 光ファイバ
- 3 0 スペクトル観測部
- 4 0 ひずみ計測部
- 5 0 変位算出部
- 6 0、7 0、7 0 a、7 0 b 微小片（微小直線梁）
- 6 0 a、6 0 b、6 0 c 微小直線梁
- 6 1 直線梁
- 1 0 0 変位計測装置

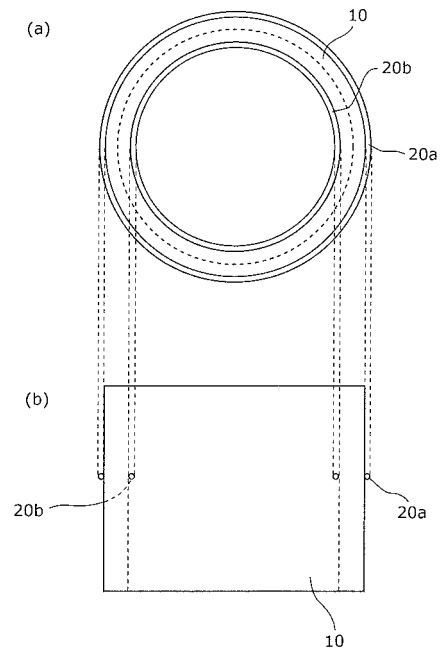
【 図 1 】



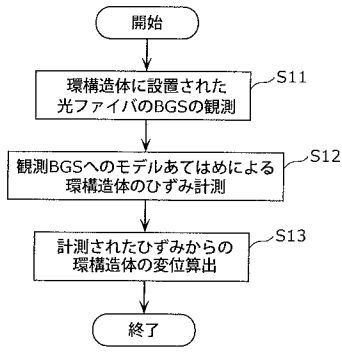
【 図 2 】



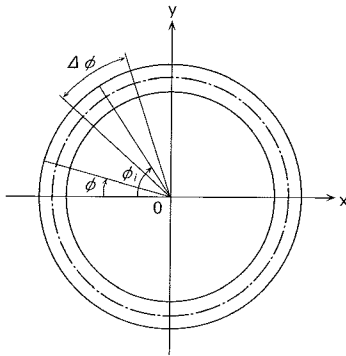
【 図 3 】



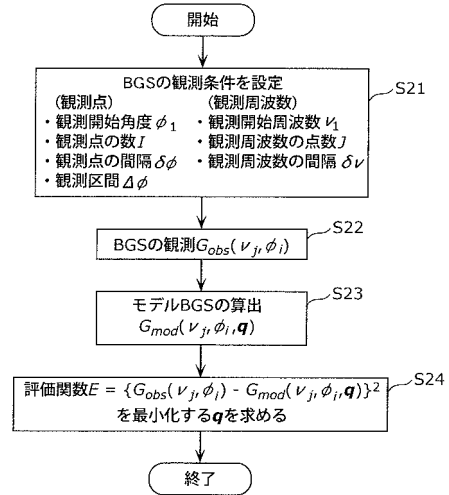
【図4】



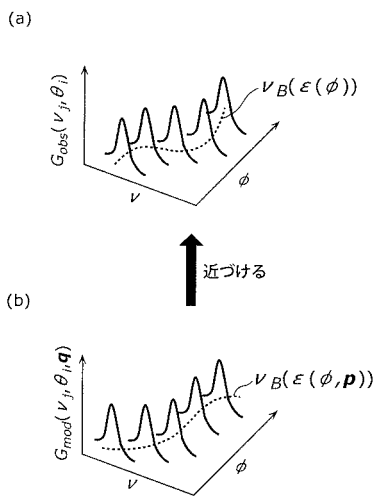
【図5】



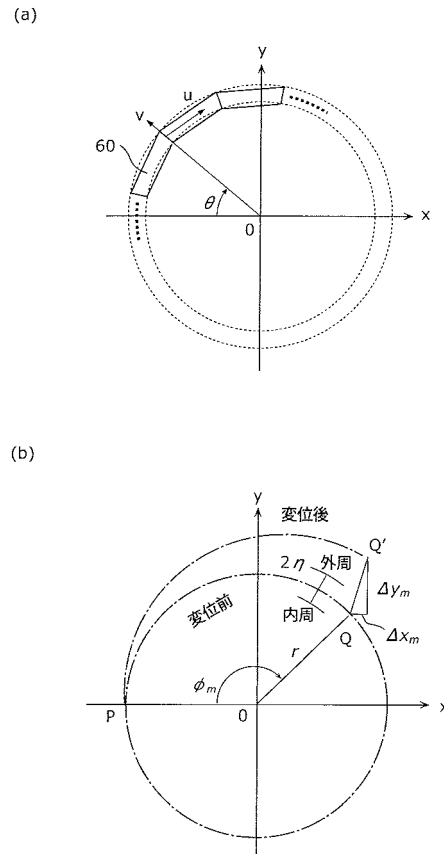
【図6】



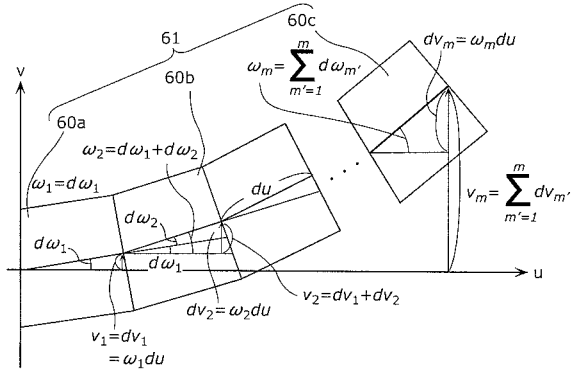
【図7】



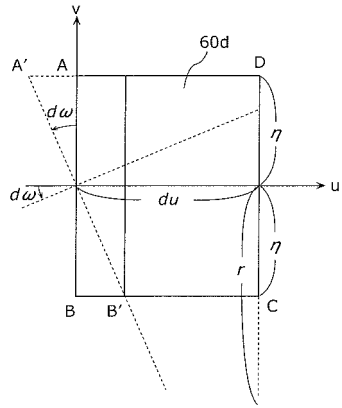
【図8】



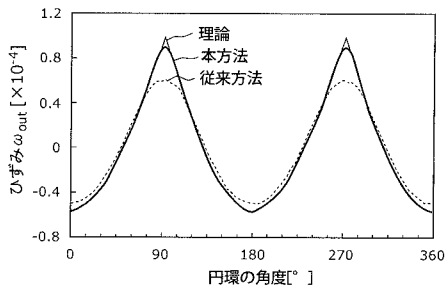
【 図 9 】



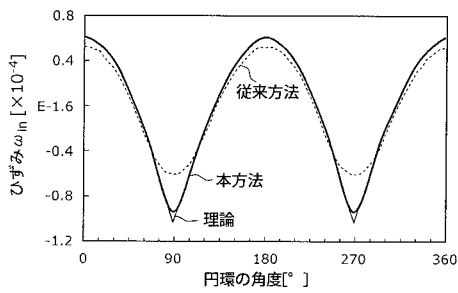
【 図 10 】



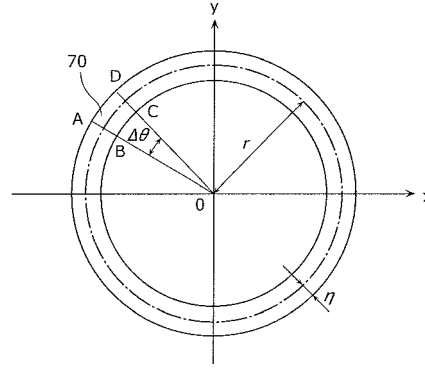
【 図 13 】



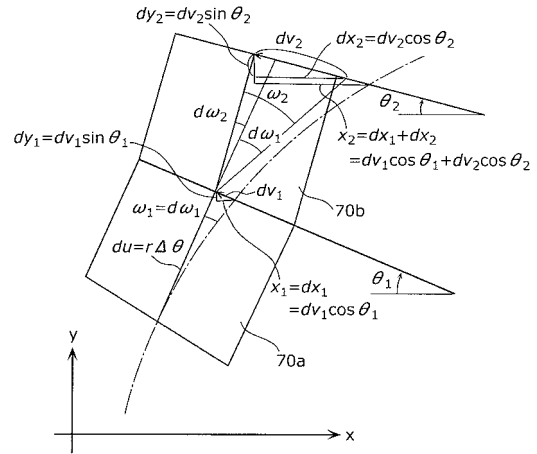
【 図 14 】



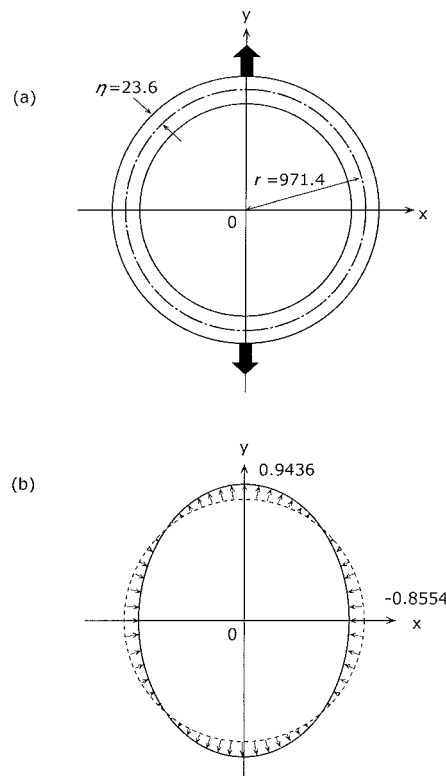
【 図 11 】



【 図 12 】



【 図 15 】



【 図 1 6 】

