

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7637395号  
(P7637395)

(45)発行日 令和7年2月28日(2025.2.28)

(24)登録日 令和7年2月19日(2025.2.19)

(51)国際特許分類 F I  
 G 0 1 B 11/16 (2006.01) G 0 1 B 11/16 Z  
 G 0 1 D 5/353(2006.01) G 0 1 D 5/353 B

請求項の数 8 (全13頁)

(21)出願番号	特願2023-569212(P2023-569212)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和4年11月29日(2022.11.29)	(73)特許権者	504137912 国立大学法人 東京大学 東京都文京区本郷七丁目3番1号
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/043879	(74)代理人	100119677 弁理士 岡田 賢治
(87)国際公開番号	WO2023/120055	(74)代理人	100160495 弁理士 畑 雅明
(87)国際公開日	令和5年6月29日(2023.6.29)	(74)代理人	100115794 弁理士 今下 勝博
審査請求日	令和6年3月13日(2024.3.13)	(72)発明者	半澤 信智 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(31)優先権主張番号	特願2021-210127(P2021-210127)		
(32)優先日	令和3年12月24日(2021.12.24)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 形状測定システム及び形状測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

断面の中心にはコアが配置されておらず、かつ断面の中心から所定距離の略同一円周上に4個以上のコアが略等間隔で配置されているマルチコア光ファイバと、  
前記マルチコア光ファイバの長手方向における各コアの歪分布を測定する歪分布測定装置と、

前記マルチコア光ファイバの歪分布を用いて、前記各コアにおける軸歪が互いに等しいことに基づく連立方程式を解くことで、前記マルチコア光ファイバの各地点での曲率および曲げ角度を求め、前記マルチコア光ファイバの形状を算出する解析装置と、  
を備える形状測定システム。

【請求項2】

前記歪分布測定装置は、前記マルチコア光ファイバが基準形状であるときの前記歪分布を予め測定し、

前記解析装置は、前記歪分布測定装置で測定された歪分布を前記基準形状であるときの歪分布と比較することで、前記基準形状から変化した前記マルチコア光ファイバの形状を算出する、

請求項1に記載の形状測定システム。

【請求項3】

前記解析装置は、

前記歪分布測定装置で測定された歪分布と前記基準形状であるときの歪分布を用いて、

差分歪を求め、

前記差分歪を用いて、前記歪分布測定装置で歪分布が測定された前記マルチコア光ファイバの各地点での前記曲率および曲げ角度を求め、

前記曲率および曲げ角度に対応する方向への前記差分歪に応じた大きさの位置ベクトルを用いて、3次元空間における前記マルチコア光ファイバの形状を算出する、

請求項2に記載の形状測定システム。

【請求項4】

前記マルチコア光ファイバは、既知の捻じりが与えられており、

前記解析装置は、前記既知の捻じりによる歪に基づいて、前記マルチコア光ファイバの形状の変化に起因する意図しない捻じりの歪を推定し、推定した前記意図しない捻じりによる歪を、前記マルチコア光ファイバの歪分布から除外すること、

を特徴とする請求項1に記載の形状測定システム。

【請求項5】

前記マルチコア光ファイバは、 $125\ \mu\text{m}$ のクラッド直径を有し、 $35\ \mu\text{m}$ 以上 $45\ \mu\text{m}$ 以下の間隔で正方格子上に配置されているコアを有すること、

を特徴とする請求項1に記載の形状測定システム。

【請求項6】

前記マルチコア光ファイバの中心軸が中空であることを特徴とする

請求項1に記載の形状測定システム。

【請求項7】

前記歪分布測定装置が、前記マルチコア光ファイバで発生した後方ブリルアン散乱光分布を計測することを特徴とする請求項1に記載の形状測定システム。

【請求項8】

歪分布測定装置が、断面の中心にはコアが配置されておらず、かつ断面の中心から所定距離の略同一円周上に4個以上のコアが略等間隔で配置されているマルチコア光ファイバを用いて、前記マルチコア光ファイバの長手方向における各コアの歪分布を測定し、

解析装置が、前記マルチコア光ファイバの歪分布を用いて、前記各コアにおける軸歪が互いに等しいことに基づく連立方程式を解くことで、前記マルチコア光ファイバの各地点での曲率および曲げ角度を求め、前記マルチコア光ファイバの形状を算出する、

形状測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、測定対象に沿って設置したマルチコア光ファイバの光の伝搬方向における歪分布の測定及び解析に基づいて、測定対象の3次元形状を導出する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

マルチコア光ファイバ(以下、MCF(Multi Core Fiber)と称する場合がある。)の各コアの周波数領域の反射スペクトルをOFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)で測定し、測定結果を解析することで、測定対象の3次元形状を導出することができる(例えば、非特許文献1及び2参照。)。しかし、OFDRを用いた3次元形状の同定では、数10mmオーダーの高分解能を実現できるが、測定距離が数10m程度に限定される。

【0003】

センシング媒体の全長にFBG(Fiber Bragg Grating)を付与し、測定分解能を改善する手法が知られている(例えば、非特許文献1参照。)。しかし、センシング媒体の製造性や経済性が低下する問題がある。

【0004】

一方、FBGの付与など準分布測定を用いて、形状同定を行うこともできる(例えば、非特許文献2参照。)。しかし、この技術では、測定点数に制約があり、長距離にわたる

10

20

30

40

50

形状同定が困難である問題がある。

【0005】

また、MCFを用いた形状同定も提案されている（例えば、非特許文献3参照。）。非特許文献3では、数km～数10kmに亘る長距離の測定が可能なBOTDR（Brillouin Optical Time Domain Reflectometry）を用いている。しかし、非特許文献3では、MCFのクラッド中心にコアが必要であるため、通信用途で用いられているクラッド中心にコアがない4コアファイバを用いることはできない。

【0006】

さらに、非特許文献3では、小さい曲率の形状センシングのためには中心コアと外周コアの距離を大きくする必要がある。しかし、コア間隔を広げるためにクラッド直径を大きくすると、光ファイバの曲げによる破断が生じやすくなる問題が生じる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0007】

【文献】<https://doi.org/10.1117/12.720914> (High-accuracy fiber-optic shape sensing)

【文献】DOI: 10.1109/TMECH.2010.2080360 (Real-Time Estimation of 3-D Needle Shape and Deflection for MRI-Guided Interventions)

【文献】小林他、“BOTDRによるマルチコアファイバを用いた大型線状構造体の形状センシングの基礎検討” OFT2020-19, 2020.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

本開示は、クラッドの中心にコアを持たないマルチコア光ファイバを用いて長距離に亘る測定対象の形状同定を実現可能にすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

具体的には、本開示の形状測定システムは、  
断面の中心以外の部分に4個以上のコアが配置されているマルチコア光ファイバと、  
前記マルチコア光ファイバの長手方向における各コアの歪分布を計測する歪分布測定装置と、

前記マルチコア光ファイバの歪分布を用いて、前記マルチコア光ファイバの形状を算出する解析装置と、  
を備える。

【0010】

具体的には、本開示の形状測定方法は、  
歪分布測定装置が、断面の中心以外の部分に4個以上のコアが配置されているマルチコア光ファイバを用いて、前記マルチコア光ファイバの長手方向における各コアの歪分布を計測し、

解析装置が、前記マルチコア光ファイバの歪分布を用いて、前記マルチコア光ファイバの形状を算出する。

【発明の効果】

【0011】

本開示は、クラッドの中心にコアを持たないマルチコア光ファイバを用いて長距離に亘る測定対象の形状同定を実現可能にすることができる。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】本開示のシステム構成の一例を示す。

10

20

30

40

50

【図 2】本開示のシステムが実行するフローの一例を示す。

【図 3】本開示における曲率 の説明図である。

【図 4】本開示における距離  $r$ 、角度 及び曲げ角度 の説明図である。

【図 5 A】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 1 の抽出例を示す。

【図 5 B】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 1 の抽出例を示す。

【図 5 C】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 1 の抽出例を示す。

【図 6 A】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 2 の抽出例を示す。

【図 6 B】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 2 の抽出例を示す。

【図 6 C】本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の第 2 の抽出例を示す。

【図 7】距離  $r$  とコアに生じる歪量の一例を示す。

10

【図 8 A】充実型の光ファイバの断面構成例を示す。

【図 8 B】中空型の光ファイバの断面構成例を示す。

【図 8 C】クラッドの直径に対する断面係数の一例を示す。

【図 9】本開示の実施形態例において用いる M C F の一例を示す。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 3 】

以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。なお、本開示は、以下に示す実施形態に限定されるものではない。これらの実施の例は例示に過ぎず、本開示は当業者の知識に基づいて種々の変更、改良を施した形態で実施することができる。なお、本明細書及び図面において符号が同じ構成要素は、相互に同一のものを示すものとする。

20

【 0 0 1 4 】

(実施形態例 1)

図 1 に本開示のシステム構成の一例を示す。

本開示の形状同定法を実現するシステムは、測定対象 1 0 0 の形状変化の抽出に用いるマルチコア光ファイバ 9 1 と、前記マルチコア光ファイバ 9 1 の各コア 1 1 の伝搬方向における歪分布を検出する歪分布測定装置 9 2 と、前記歪分布測定装置 9 2 で取得された測定データを解析する解析装置 9 3 を備える。

【 0 0 1 5 】

前記マルチコア光ファイバ 9 1 は、測定対象 1 0 0 の長手方向に沿って設置される。前記マルチコア光ファイバ 9 1 は、クラッド 1 2 内に配置された計 4 個のコア 1 1 を有する。図では、実施形態の一例として、4 個のコア 1 1 は、クラッド 1 2 の断面中心以外の領域であって、クラッド 1 2 の断面中心から距離  $r$  の概ね同一円周上に概ね等間隔の正方形格子に配置されている例を示す。

30

【 0 0 1 6 】

本開示の実施形態例では、前記 4 個のコア 1 1 は概ね同等の屈折率分布および光学特性を有する例について説明する。ただし、M C F 9 1 に備わるコア 1 1 は、各コアの屈折率分布や光学特性が意図的に異なるように配置される構造でも構わない。また、本開示の実施形態例ではコア 1 1 の数が 4 である例を示すが、コア 1 1 の数が 4 以上であれば良い。また、M C F 9 1 のコア 1 1 同士の間隔は、等間隔でなく配置されていても良いが、M C F 9 1 の断面においてある程度均等にコア 1 1 が配置されていた方が好ましい。例えば、4 つのコアの場合には、直交座標における 4 象限のそれぞれにコアが配置されていてもよい。

40

【 0 0 1 7 】

本開示の実施形態例の M C F 9 1 では、クラッド外径が  $125 \mu\text{m}$ 、コア間のクロストーク低減のためにコア間隔が  $35 \mu\text{m} \sim 45 \mu\text{m}$  に設定されている M C F を用い、M C F 9 1 の延伸状態の変化を検出した。また、歪分布測定装置 9 2 には、後方プリルアン散乱光分布を計測する B O T D R 装置を用いることとした。図 2 に本開示の形状同定法の実施フローの一例を示す。

【 0 0 1 8 】

50

始めに、測定対象 100 に MCF91 を敷設し、歪分布測定装置 92 を用いて、定常状態における各コア 11 の歪分布特性を取得する（ステップ S1）。これにより、解析装置 93 は、基準形状であるときの歪分布を取得する。

次に、測定対象 100 の 3 次元形状が変化した状態で、歪分布測定装置 92 を用いて、改めて各コア 11 の歪分布特性を取得する（ステップ S2）。これにより、解析装置 93 は、未知形状であるときの歪分布を取得する。

次に、ステップ S1 で取得したデータと、ステップ S2 で取得したデータを用い、歪分布測定装置 92 が歪を計測する MCF91 の各地点における、ステップ S2 におけるステップ S1 に対する差分歪を導出する（ステップ S3）。このステップ S3 で算出した差分歪  $\delta_i$  は、MCF91 の曲げによる歪  $\delta_b$  と、MCF91 の長手方向の軸歪  $\delta_a$  の和である

10

#### 【0019】

図 3 に示すように MCF91 を曲げた場合、各コア  $C_i$  ( $i = 1 \sim 4$ ) における、曲げ歪  $\delta_{b,i}$  と曲率  $\kappa$  と曲げ角度  $\theta_i$  は関係式 (1) により表される。

$$\delta_{b,i} = r \cdot \kappa \cdot \cos(\theta_i) \quad (1)$$

尚、 $r$  はクラッド 12 の中心軸  $C_c$  からコア 11 までの距離、 $\theta_i$  はコア 11 の MCF91 の断面内における角度を表す。

#### 【0020】

図 4 に、距離  $r$ 、角度  $\theta_i$  及び曲げ角度  $\theta_i$  の具体例を示す。角度  $\theta_1$  は、コア  $C_1$  と MCF91 の中心軸  $C_c$  を結ぶ線とコア  $C_1$  に隣接するコア  $C_4$  と MCF91 の中心軸  $C_c$  を結ぶ線とのなす角度である。本実施形態では、コア  $C_1 \sim C_4$  が同心円上に概ね等間隔で配置されているため、角度  $\theta_1 \sim \theta_4$  は 90 度である。

20

#### 【0021】

ここで、軸歪  $\delta_a$  は、MCF91 の断面に対して一様に発生するため、コア番号  $i$  によらず一定となる。したがって、ステップ S3 で算出したコア番号  $i$  における差分歪  $\delta_i$  は式 (2) で表される。

$$\delta_i = \delta_a + \delta_{b,i} \quad (2)$$

#### 【0022】

本実施形態では、コア 11 が 4 つあるので、4 元連立方程式が得られる。また、軸歪  $\delta_a$ 、曲げ歪における曲率  $\kappa$ 、曲げ角度  $\theta_i$  はいずれのコア 11 においても等しい。そこで、最小二乗法などを用いて、各コア 11 の差分歪  $\delta_i$  を求める。（ステップ S3）

30

#### 【0023】

最後に、フレネ・セレの積分公式を用い、歪を計測した距離  $z$  の各地点における曲率  $\kappa$  と曲げ角度  $\theta_i$  に対応する方向への、差分歪  $\delta_i$  に応じた大きさの位置ベクトルを決定する（ステップ S4）。これにより、マルチコア光ファイバ 91 の距離  $z$  の各地点においてどの方向にどの程度変形しているかを求めることができるため、定常状態から変形後のマルチコア光ファイバ 91 の形状を測定することができる。

#### 【0024】

尚、マルチコア光ファイバ 91 の距離  $z$  における被測定区間の始点と終点を補正することにより、位置精度を向上することができる。また、本実施形態例では歪分布測定に BOTDR を用いたが、OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) などの光ファイバの歪を計測可能な任意の手段を使用しても良い。

40

#### 【0025】

図 5A ~ 図 5C に、本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の抽出例を示す。本開示の実施形態例では、センシング用の MCF91 を直線状に延伸した状態で、前記図 2 のステップ S1 における基準形状であるときの歪分布データを取得した。次に、図 5A のように MCF91 の中央付近に配置された測定対象 100 の周囲を反時計回りに一定曲率で  $xy$  平面上で 1 巻し、ステップ S2 を実行した。これにより、図 5B の未知形状であるときの歪分布データを取得した。図 5B 中の  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  の実線は、それぞれコ

50

ア番号 i の違いを表す。図 5 C は、ステップ S 1 及び S 2 の歪分布データをもとに、基準形状から変化した MCF 9 1 形状を算出し、形状同定した結果を示している。本結果から測定対象 1 0 0 の中央付近における曲げの曲率が精度良く検出できていることが分かる。

【 0 0 2 6 】

図 6 A ~ 図 6 C に、本開示の実施形態例における 3 次元形状変化の抽出例を示す。図 5 A ~ 図 5 C の場合と同様に、センシング用の MCF 9 1 を直線状に延伸した状態で、前記図 2 のステップ S 1 における基準形状であるときの歪分布データを取得した。次に、図 6 A のように MCF 9 1 の終端から、x y 平面上で渦を巻くような測定対象 1 0 0 に沿って変形させ、ステップ S 2 を実行した。これにより、図 6 B の未知形状であるときの歪分布データを取得した。図 6 B 中の C 1、C 2、C 3、C 4 の実線は、それぞれコア番号 i の

10

【 0 0 2 7 】

(実施形態例 2)

図 7 は距離 r に対するコア 1 1 に生じる歪量の一例を示している。図 7 中の線種の違いは曲率の違いを示しており、コア 1 1 がクラッド 1 2 の中心軸 C<sub>c</sub> から距離 r が遠くなるほど、歪量が大きくなり、微小な変化を抽出しやすくなることが分かる。MCF 9 1 において、クラッド 1 2 の中心軸 C<sub>c</sub> とコア 1 1 の中心との距離 r を広くするためには、クラッド 1 2 の直径を大きくする必要がある。クラッド直径を大きくしていくと、光ファイバの剛性が高くなり、光ファイバ自身が曲がりにくく、破断の可能性も高くなる。この光ファイバの剛性については、光ファイバの断面形状に依存しており、図 8 A に示すような光ファイバ全体がガラスである充実型の光ファイバの場合、断面係数は式 ( 3 ) で表される。

20

【数 3】

$$\frac{\pi}{32} R^3 \quad (3)$$

【 0 0 2 8 】

一方、本開示を用いた場合には、クラッド中心軸 C<sub>c</sub> にコア 1 1 が不要となることから、図 8 B に示すようなクラッド 1 2 の中心軸 C<sub>c</sub> を中空にした中空型の光ファイバにすることが可能になる。その場合の断面係数は式 ( 4 ) で表される。

30

【数 4】

$$\frac{\pi}{32} \frac{R^4 - R_a^4}{R} \quad (4)$$

【 0 0 2 9 】

式 ( 3 ) 及び式 ( 4 ) を用いて算出したクラッド 1 2 の直径に対する断面係数を図 8 C に示す。非特許文献 3 には、クラッド 1 2 の直径が 3 7 5 μm の MCF では破断することなく形状同定を行うことが可能であることが示されている。中空の面積を 8 0 % にすれば、クラッド 1 2 の直径が 4 3 0 μm であっても、クラッド 1 2 の直径が 3 7 5 μm と同程度の剛性に留めることができることがわかる。本開示は、中空の MCF を利用することが可能であるため、図 8 A に示す充実型と比較してクラッド中心軸 C<sub>c</sub> からコア 1 1 の距離 r を大きくすることができる。したがって、本開示は、微小な歪量を検出することが可能になる。

40

【 0 0 3 0 】

(実施形態例 3)

MCF 9 1 を用いて 3 次元の形状変化を抽出する際に、意図しない捩じりが生じ、計測結果に誤差が生じる可能性がある。そこで、本実施形態では、図 9 に示すように、形状同

50

定に用いる MCF を作製する際に、意図的に単位長さあたりに一定の回数の捺じりを加える。ここで、図では、理解が容易になるよう、コア数が 3 の場合を示している。これにより、本実施形態の MCF 91 は、予め加えられている捺じり回数以下の意図しない捺じりが与えられた場合に、後から与えられた意図しない捺じりを推定することができる。このため、意図しない捺じりによる歪を排除することが可能になり、形状同定の精度を向上させることができる。

#### 【0031】

本実施形態の形状測定システムのシステム構成は図 1 で説明した構成に対し、MCF 91 に既知の捺じれが付与されていることに加え、これに伴う解析装置 93 の解析手順が相違する。具体的には、本実施形態の形状測定方法は、図 2 に示したステップ S3 及び S4 の解析が異なる。

10

#### 【0032】

図 2 のステップ S3 では、未知形状の各コア 11 の歪分布と基準形状の各コア 11 の歪分布との差分をとることにより得られる差分歪  $\varepsilon_i$  は曲げ歪  $b_{,i}$  と軸歪  $a$  の和で表されている。本実施形態では、MCF 91 に捺じりを加えられているため、差分歪  $\varepsilon_i$  は、曲げ歪  $b_{,i}$  と軸歪  $a$  と捺じり歪  $t$  の和になる。また、式 (1) の曲げ歪  $b_{,i}$  は式 (5) で表され、各係数は (6) から (9) で表される。

#### 【数 5】

$$\varepsilon_{b,i} = k_1 \cdot r \cdot \kappa \cdot \cos(\omega_i - \beta) \quad (5)$$

20

$$k_1 = (1 - \nu (2\pi p r)^2) / (1 + (2\pi p r)^2) \quad (6)$$

$$\omega_i = a_i + \int_0^s (2\pi p + \phi(t)) dt \quad (7)$$

$$\phi = \varepsilon_t / (k_2 r) \quad (8)$$

$$k_2 = 2\pi p r / \{(2\pi p r)^2 + 1\} \quad (9)$$

#### 【0033】

30

$k_1$ 、 $k_2$  は捺じりの補正係数であり、 $\omega_i$  はコア番号  $i$  の位置を表す角度、 $\beta$  はポアソン比、 $p$  は円周上のコア 11 のスピンレート、 $\phi$  は比捺じり角を示す。ここで、スピンレートは、MCF 91 に加えた捺じり回数 [回/m] である。

#### 【0034】

コア 11 同士の相対的な位置関係は変化しないので、 $b_{,i}$  の総和はゼロになる。したがって、差分歪  $\varepsilon_i$  の総和は式 (10) になる。

#### 【数 10】

$$\sum_{i=1}^i \varepsilon_i = i \times \varepsilon_t + i \times \varepsilon_a \quad (10)$$

40

#### 【0035】

式 (5) 及び式 (10) を満たす曲率  $\kappa$ 、曲げ角度  $\beta$ 、軸歪  $a$ 、捺じり歪  $t$  を最小二乗法などにより決定する (ステップ S4)。最後にフレネ・セレの積分公式を用い、歪を計測した距離  $z$  の各地点における曲率  $\kappa$  と曲げ角度  $\beta$  に対応する方向への、マルチコア光ファイバ差分歪  $\varepsilon_i$  に応じた大きさの位置ベクトルを決定する。これにより、マルチコア光ファイバ 91 の距離  $z$  の各地点においてどの方向にどの程度変形しているかを求めることができるため、定常状態から変形後のマルチコア光ファイバ 91 の形状を測定することができる。

#### 【0036】

50

(本開示の効果)

本開示によれば、形状変化の検出に用いるマルチコア光ファイバの中心にコアがないコア配置の構造を用いて形状同定を可能にする。また、OFDRでは数十mだったものが、数kmか数10kmの形状同定が可能になる。さらに、本開示によれば、MCF91に中空型の光ファイバを用いることができるため、MCFの外径を太くしてクラッド中心とコア中心間距離を拡大することにより、歪を大きくして微小な形状を測定可能な測定感度を向上することができる。

【産業上の利用可能性】

【0037】

本開示は測定対象の3次元形状を導出することによるインフラの老朽化対策に利用することができる。

10

【符号の説明】

【0038】

11：コア

12：クラッド

91：マルチコア光ファイバ

92：歪分布測定装置

93：解析装置

100：測定対象

20

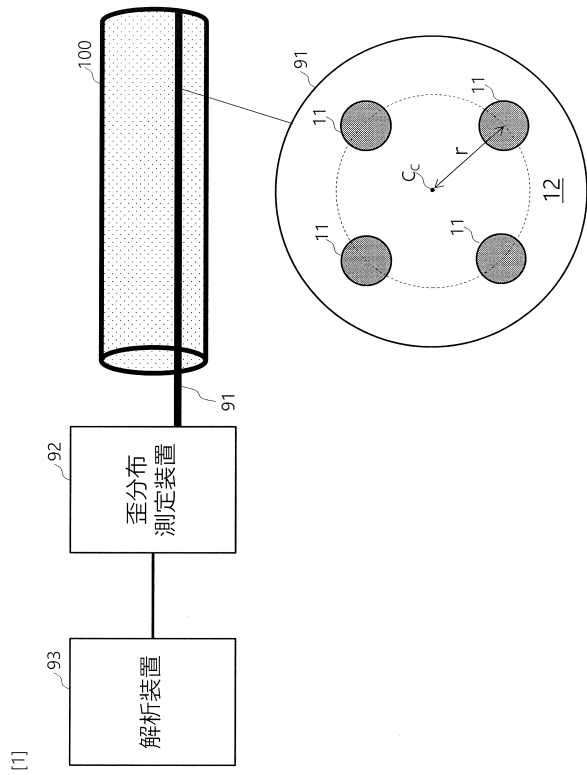
30

40

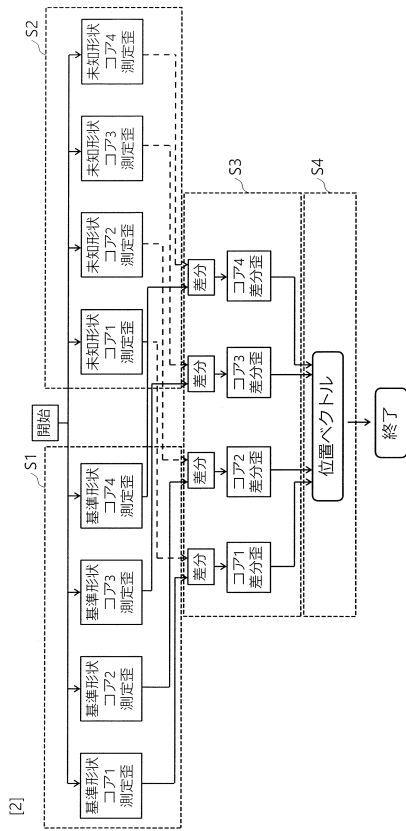
50

【図面】

【図 1】



【図 2】

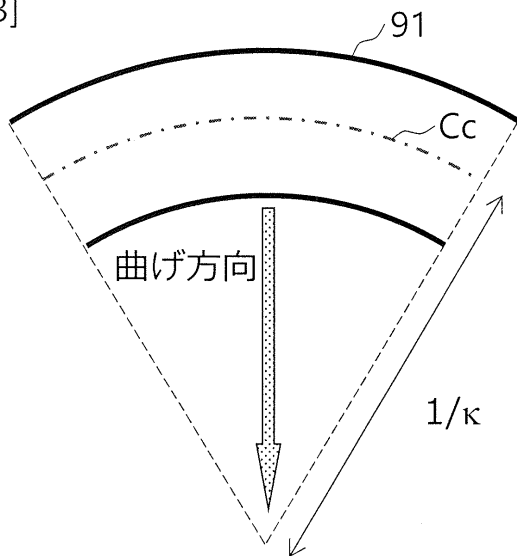


10

20

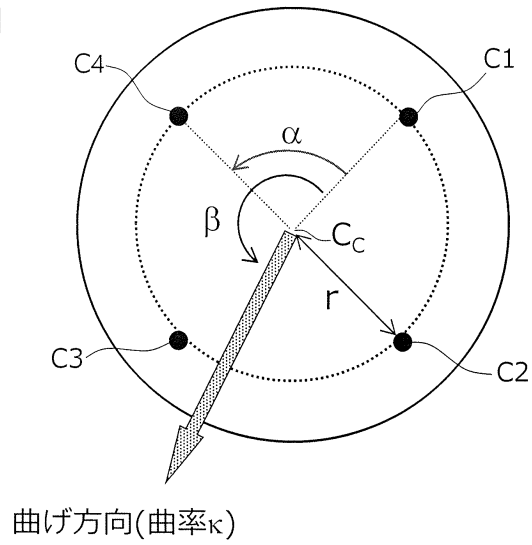
【図 3】

[3]



【図 4】

[4]



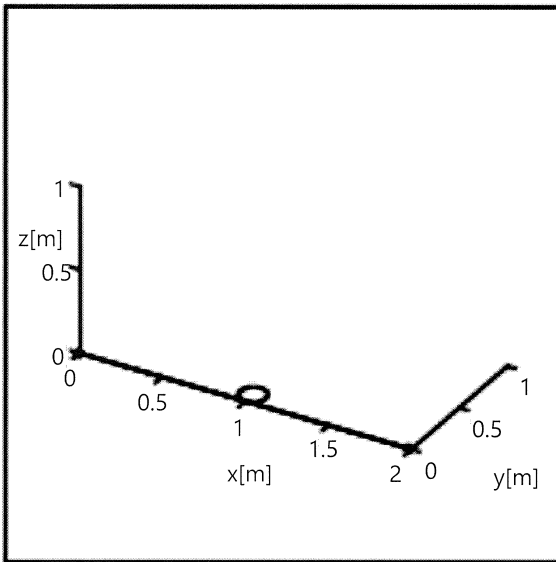
30

40

50

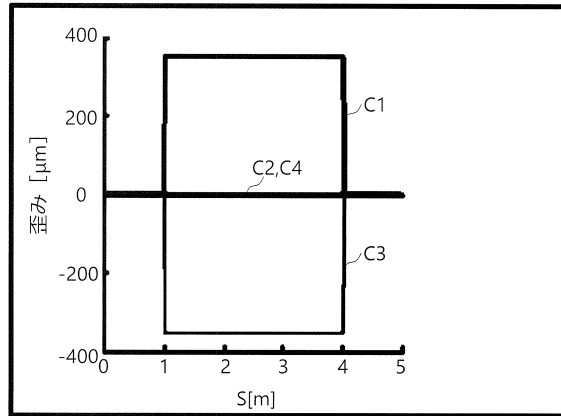
【図 5 A】

[5A]



【図 5 B】

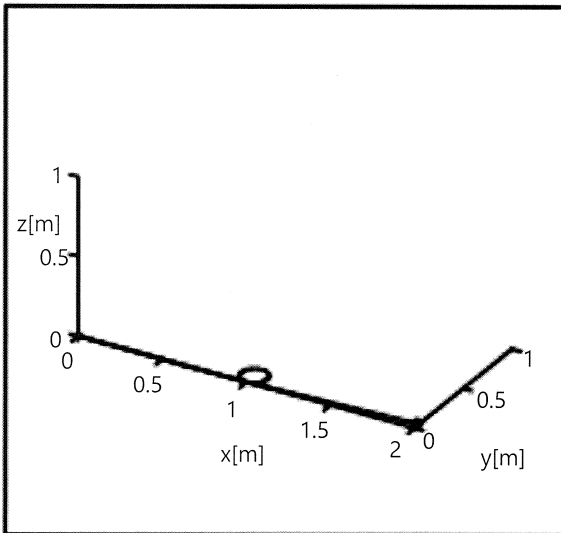
[5B]



10

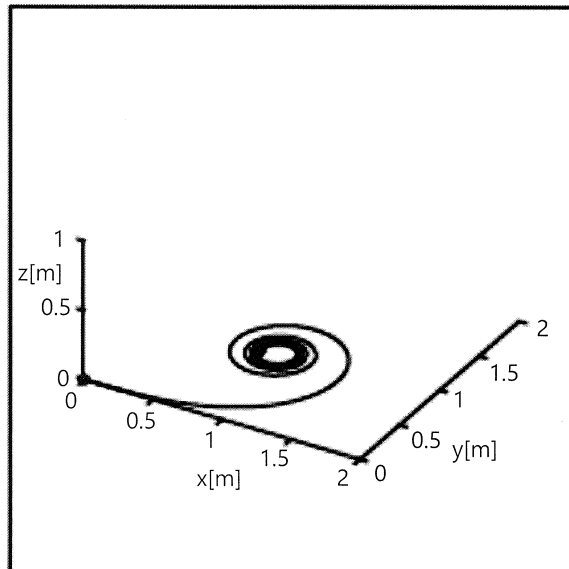
【図 5 C】

[5C]



【図 6 A】

[6A]



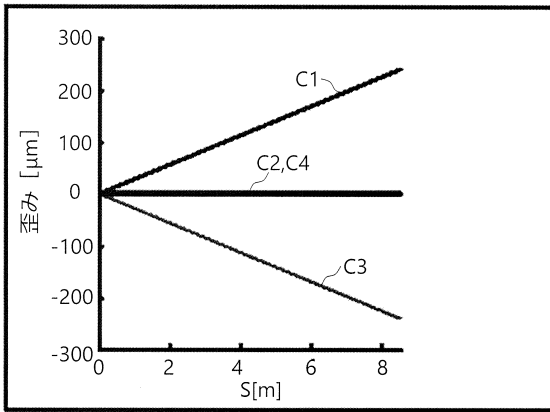
30

40

50

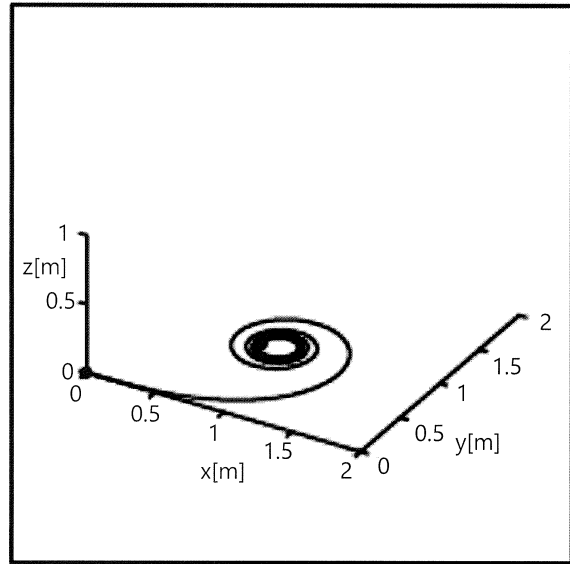
【 図 6 B 】

[6B]

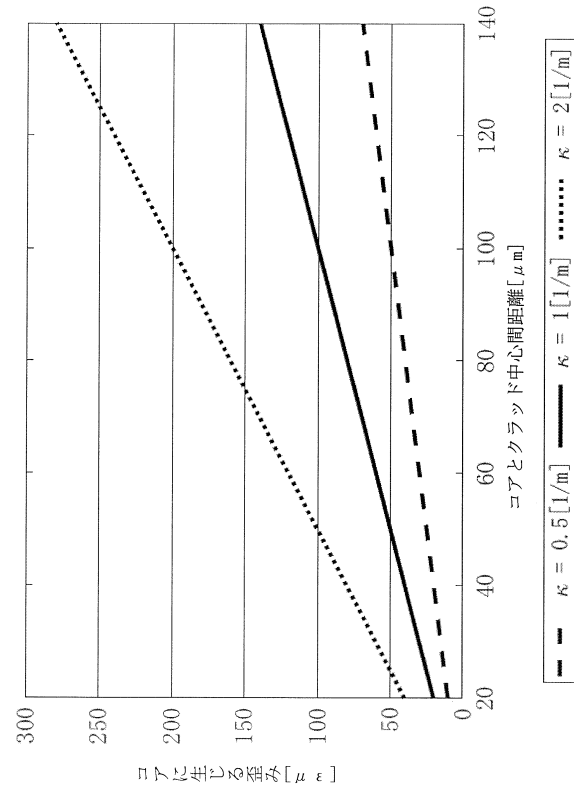


【 図 6 C 】

[6C]



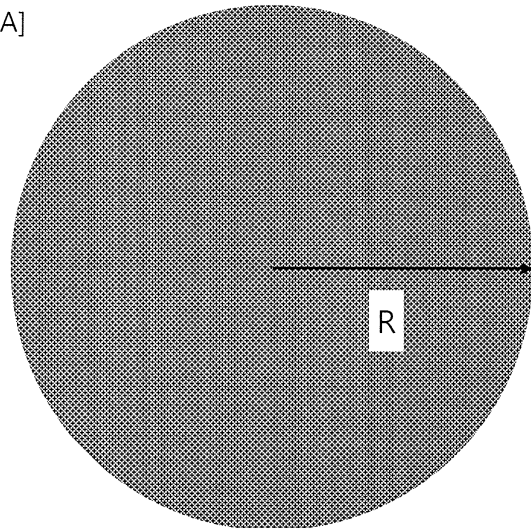
【 図 7 】



[7]

【 図 8 A 】

[8A]



10

20

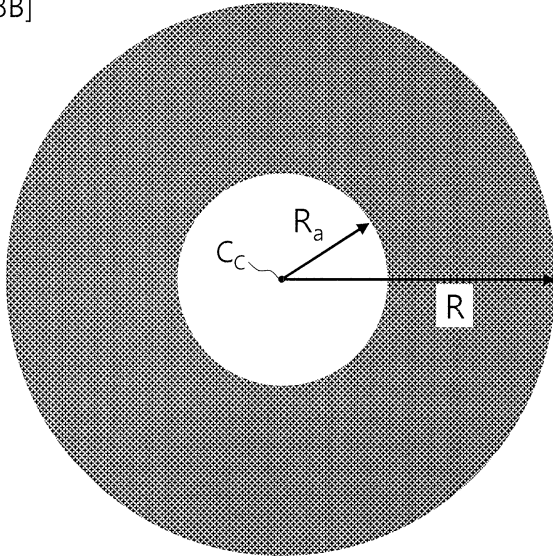
30

40

50

【図 8 B】

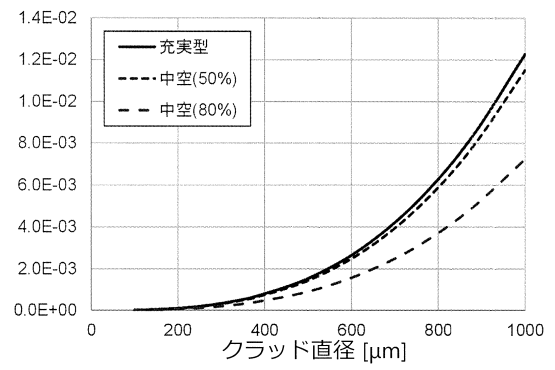
[8B]



【図 8 C】

[8C]

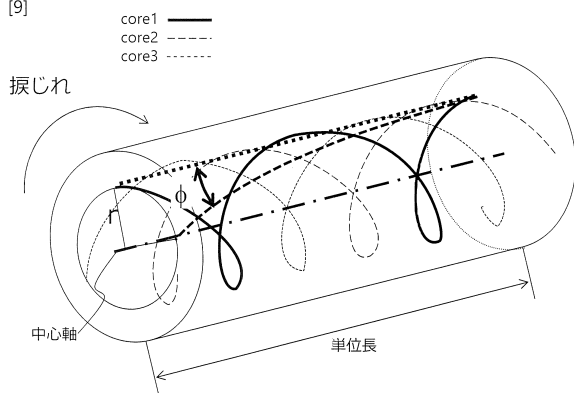
断面係数 [mm<sup>3</sup>]



10

【図 9】

[9]



20

30

40

50

## フロントページの続き

- (72)発明者 中島 和秀  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 松井 隆  
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 村山 英晶  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- (72)発明者 和田 良太  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- (72)発明者 小林 真輝人  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- 審査官 井亀 諭
- (56)参考文献 国際公開第2021/246497(WO, A1)  
特開2002-185063(JP, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G01B 11/16  
G01D 5/353