

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 2 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01286

研究課題名(和文) 光ファイバひずみ計測の普及に向けた計測の高精度化についての研究

研究課題名(英文) Research on measurement accuracy improvement for widely using distributed fiber optic strain measurement

研究代表者

成瀬 央 (NARUSE, HIROSHI)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：60402690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：空間的にも時間的にも不均一なひずみ下の光ファイバで観測されるブリルアンゲインスペクトル(BGS)の形状をモデル化し、実験によってこのモデルの妥当性を確認した。この研究で構築されたモデルを基に、求めるべきひずみがフーリエ級数で記述されたモデルを新たに構築し、それを、環状構造物に設置された光ファイバで観測されたBGSにあてはめる環状構造物の周方向ひずみ計測方法を開発した。環状構造物を微小梁の集合をみなし、各微小梁の内外周のひずみから断面各部の変位を計測する方法も開発した。シミュレーションと実験によって、断面形状や荷重の分布にかかわらず、これらの方法が高精度にひずみや変位を計測できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、インフラ設備など構造物の事故や災害が大きな社会問題になっており、構造物の安全性向上や効率的な維持管理のために、変状や損傷のモニタリング技術の必要性が高まっている。本研究の社会的意義はこのような状況において、構造物のモニタリングへの応用が期待されている、長距離にわたってひずみを分布的に計測可能な光ファイバひずみ計測の普及のために、ひずみや変位を高精度に計測できるとともに、適用領域を拡大できる技術を開発したことである。学術的意義は空間的かつ時間的不均一ひずみ下のBGS形状のモデルを構築したことであり、これは、光ファイバひずみ計測のためのBGS解析に共通した基礎となる。

研究成果の概要(英文)：The use of fiber optic sensing systems based on Brillouin scattering, which enable long-distance and distributed measurement, is a promising approach to maintaining structures safely and efficiently. In this study, we conducted some researches so that the systems become widely used.

Firstly, we constructed the model expressing the shape of the Brillouin gain spectrum (BGS) observed in an optical fiber in which nonuniform strains varying spatially and temporally are simultaneously produced. Secondly, we developed a method for measuring the circumferential strain in general ring-shaped structures. In this method, the model which has the unknown strain described by a Fourier series is fitted to the BGS observed in the optical fiber attached to the structures. In addition, we developed a method for measuring the displacement of each part of the structures. The structures are regarded as being composed of small beams and the displacement is calculated from strains in the beams.

研究分野：光ファイバセンシング

キーワード：光ファイバセンシング 構造物 モニタリング ブリルアンスペクトル モデル ひずみ 変位

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、インフラ設備など構造物の事故や災害が大きな社会問題になっており、安心安全な生活環境の実現に向けて、構造物の変状や損傷をモニタリングする技術の必要性が高まっている。変状や損傷の程度を表す指標として、ひずみ（構造物部材の伸縮の割合）や変位（構造物各部の変形）が一般的に用いられている。ひずみゲージの利用に代表されるひずみ計測では、それが設置された局所的な場所のひずみが得られるだけである。また、レーザなどを用いた光学的変位計測では、装置設置の制約から定常的なモニタリングが困難である。それに対して本研究で取り扱う、光ファイバ内で発生するブリルアン散乱光のスペクトル（以下、単に BGS と呼ぶ）の周波数がひずみに比例してシフトする現象を利用した光ファイバひずみ計測は、従来のセンサでは実現できなかった、長距離にわたるひずみの分布計測（光ファイバ全体に対して連続とみなせるほど短い間隔でのひずみの計測）が可能であるため、光ファイバをセンサとして構造物に設置し、光ファイバのひずみを計測することによって間接的に構造物全体の状態を常時モニタリングできる。この光ファイバひずみ計測は構造物のモニタリング技術としての利用が期待されており、計測精度の向上や適用領域の拡大など、普及に向けた技術の研究が重要になっている。

2. 研究の目的

光ファイバひずみ計測では、各ひずみ計測位置において BGS が観測される。このとき、ひずみ計測（BGS 観測）位置を中心とするある長さの光ファイバ区間で、またひずみ計測時刻を中心とするある長さの観測時間内で発生したすべての散乱光が同時に観測される。観測区間と観測時間内で、すなわち空間的にも時間的にもひずみが均一な場合、観測される BGS の形状は山型のローレンツ関数で近似されることから、BGS が最大となる周波数のシフトからひずみが求められる。一方ひずみが不均一な場合には、BGS の形状はローレンツ関数から変形し、これが計測誤差の原因となる。これまでの研究において、空間的、時間的それぞれの不均一ひずみ下の BGS の形状モデルを個別に構築するとともに、それらのモデルの妥当性を実験で明らかにしてきた。

本研究の目的は、これまでの研究をさらに発展させ、光ファイバひずみ計測の普及に向けた高精度化にとって解決すべき、学術的にも実用的にも重要な2つ技術課題、(1) 空間的・時間的同時不均一ひずみがひずみ計測に与える影響の明確化、(2-1) 環状構造物の高精度ひずみ計測方法の開発、(2-2) ひずみからの構造物断面各部の変位計測方法の開発に取り組み、構造物のモニタリング技術に新しい展開をもたらすことである。

3. 研究の方法

(1) 空間的・時間的同時不均一ひずみがひずみ計測に与える影響の明確化

地震の際などでは、構造物には空間的に変化する不均一なひずみと時間的に変化する不均一なひずみが同時に生じる場合がある。光ファイバひずみ計測を構造物のモニタリングに利用するためには、このような空間的・時間的同時不均一ひずみが計測に与える影響を調べるのが実用的観点からも重要である。これまで個別に研究を進めてきた空間的、時間的不均一ひずみ下の BGS の形状解析を統合することによって、両不均一ひずみが同時に生じている場合の BGS 形状のモデルを構築し、その妥当性を実験によって調べた。構築したモデルを用いて求められる BGS を解析することによって、不均一なひずみに対しても計測誤差を見積もることが可能となる。

(2-1) 環状構造物の高精度ひずみ計測方法の開発

光ファイバひずみ計測の適用対象構造物を広げるために、これまでに開発した円環構造物のひずみ計測を、より一般的な断面形状をもつ環状構造物のひずみ計測に発展させた。円環構造物のひずみ計測に用いていたモデルに断面形状を与えるパラメータを追加するとともに、光ファイバに沿った長さで環状構造物上のひずみ計測位置を記述することによって、新たに環状構造物ひずみ計測用のモデルを構築した。そして、数値シミュレーションや実験によって本方法の有効性を明らかにするとともに、環状構造物断面の形状や作用する荷重の分布、また、BGS 観測条件が計測誤差に与える影響を調べた。

(2-2) ひずみからの構造物断面各部の変位計測方法の開発

まず、円環構造物について、円環の内周と外周上で計測されたひずみから、円環断面各部の変位を計測する方法を開発した。この方法では、円環を微小な真直梁の集合とみなし、微小梁の変位の累積として各部の変位を算出している。さらに、微小真直梁の向きを考慮することによって、円環の変位計測方法を環状構造物の変位計測方法に拡張した。これらの変位計測方法の有効性を、数値シミュレーションと実験によって調べた。

4. 研究成果

(1) 空間的・時間的同時不均一ひずみがひずみ計測に与える影響の明確化

空間的・時間的不均一ひずみが同時に生じている光ファイバで観測される BGS の形状 $G_{zt}(v)$ を、以下の式でモデル化した。

$$G_{zt}(v) = \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \frac{h_{zt}(w/2)^2}{[v - v_B(\varepsilon(z,t))]^2 + (w/2)^2} dz dt$$

このモデルは、光ファイバ上の位置 z 、時刻 t におけるひずみ $\varepsilon(z,t)$ に対応する周波数 $v_B(\varepsilon(z,t))$ を

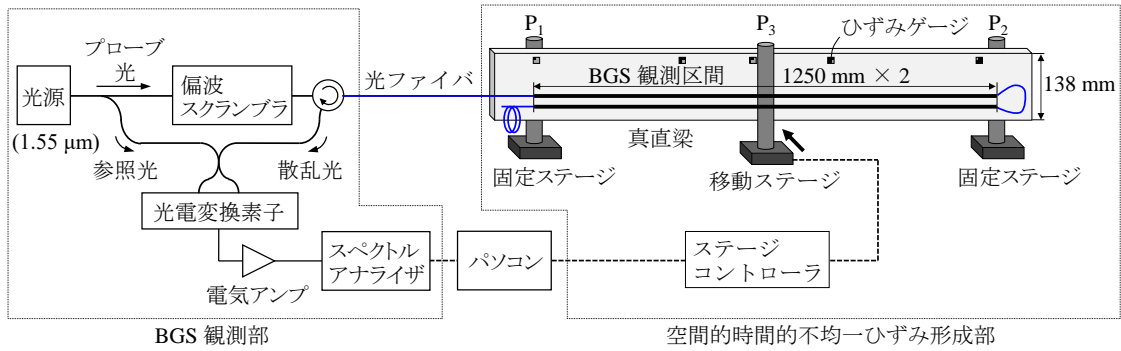


図1 空間的・時間的同時不均一ひずみ下のBGS観測システム

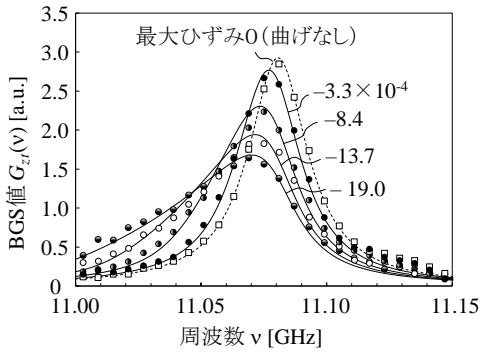


図2 空間的線形・時間的線形ひずみ下のBGS

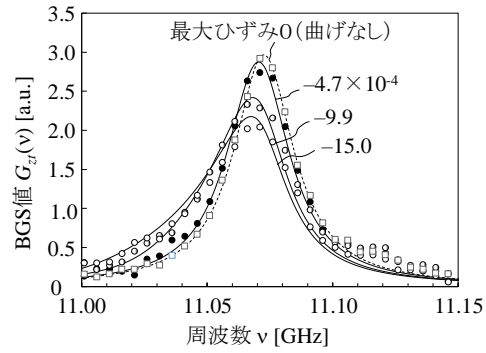


図3 空間的線形・時間的放物線ひずみ下のBGS

中心周波数にもつローレンツ関数で与えられる BGS が、観測位置 z と時刻 t を中心とする観測区間 Δz と時間 Δt について積分されたものになっている。

実験では図 1 に示すように、空間的・時間的不均一ひずみ形成部の真直梁中央位置 (P_2) を、梁の長さ方向と直交する方向に速度を制御しながら移動させることによって、空間的にも時間的にも線形に、空間的には線形で時間的には放物線に変化する 2 種類の空間的・時間的不均一ひずみを梁に形成し、これらのひずみ下の BGS を観測した。それぞれの BGS 観測結果を図 2 と図 3 に示す。○などで示されている観測された BGS と、実線などで示されているモデルから算出された BGS とはよく一致しており、モデルの妥当性が実証された。想定されるひずみを $\varepsilon(z, t)$ に代入して得られた BGS を解析することによって、空間的・時間的不均一ひずみがひずみ計測に与える影響を明確化する、例えばひずみ計測誤差を見積もることができる。

(2-1) 環状構造物の高精度ひずみ計測方法の開発

外周上に光ファイバが設置された、外周長 L の環状構造物の断面の一部を図 4 に示す。周方向のひずみ計測に用いるための、以下の式で与えられる BGS のモデルを考案した。

$$G_{\text{mod}}(z_i, v_j, h, \mathbf{p}) = \int_{z_i - \Delta z/2}^{z_i + \Delta z/2} \frac{h(w/2)^2}{\{v_j - v_B(0) - C\varepsilon(z, \mathbf{p})\}^2 + (w/2)^2} dz,$$

$$\varepsilon(z, \mathbf{p}) = a_0/2 + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(2\pi n z/L) + b_n \sin(2\pi n z/L))$$

このモデルにおいて z_i は基準点 A から i 番目のひずみ計測位置 P_i までの光ファイバにそった距離であり、外周長 L を周期とするひずみが N 次のフーリエ級数で記述されている。また、 C はひずみをそれに対応する周波数に変換するための比例定数、 h は BGS の最大値、 \mathbf{p} はフーリエ係数をまとめたベクトルである。光ファイバで観測された BGS 値と、モデルから算出された BGS 値との差の 2 乗和を最小化する h と \mathbf{p} を求め、求められた \mathbf{p} よりひずみを算出する。 L を内周長とすることによって、内周のひずみを計測することができる。

断面が曲線だけからなる楕円環と、曲線と直線からなる四角環それぞれに、図 5 に示すように集中荷重と分布荷重の 2 種類の荷重が作用している場合について、開発した環状構造物の周方向ひずみ計測方法の有効性を調べるための模擬実験を行った。この模

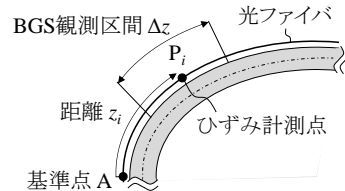


図4 光ファイバが設置された環状構造物断面

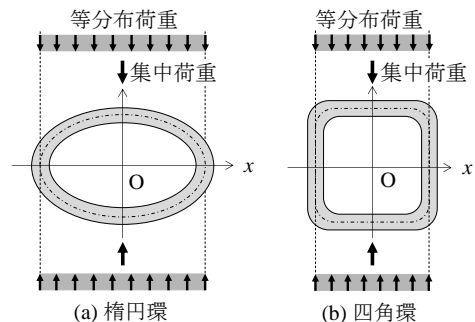


図5 環状構造物の断面形状と作用する荷重の分布

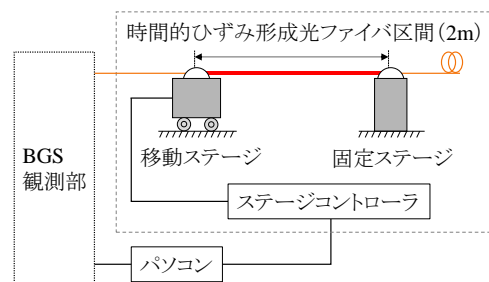


図6 環状構造物のひずみ形成部

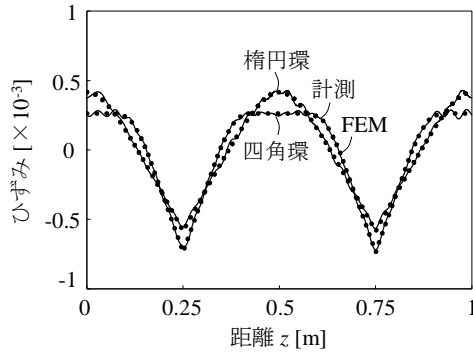


図7 集中荷重下のひずみ計測結果

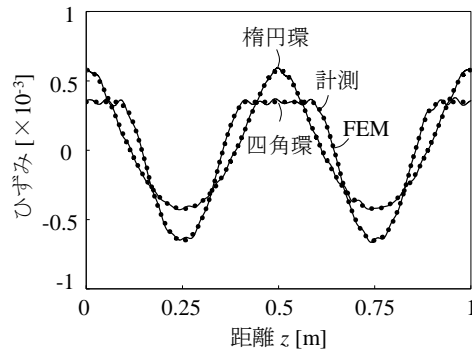


図8 等分布荷重下のひずみ計測結果

擬実験では、図 1 の空間的・時間的不均一ひずみ形成部を図 6 に示す構成に変更することによって、環状構造物で観測される BGS と同じ形状を与える時間的不均一ひずみを、長さ 2m の時間的ひずみ形成光ファイバ区間に生じさせ、この BGS を観測した。開発方法によって得られたひずみと有限要素法 (FEM) 解析によって得られたひずみを、それぞれ実線と点線で図 7 と図 8 に示す。ひずみの分布幅 (最大引張りと圧縮ひずみの差) に対する、計測されたひずみの相対誤差は最大でも 1.4% であった。この結果は、本方法が、環状構造物の断面形状や作用する荷重の分布にかかわらず、高精度に周方向のひずみを計測できることを実証している。また、ひずみ計測位置や BGS 観測周波数間隔などの BGS 観測条件と計測誤差との関係を数値シミュレーションによって調べたところ、ノイズが 5% 程度の場合には計測誤差のばらつきはこれらの間隔の 0.3 から 0.4 乗に比例していたが、2.5% 程度の場合にはあまり依存していないことがわかった。

(2-2) ひずみからの構造物断面各部の変位計測方法の開発

開発した断面各部の変位計測方法では、中心線の長さ L_c の環状構造物を M 個の微小真直梁の集合とみなし、各部すなわち各微小真直梁のひずみから変位を計測する。図 9 に示す m 番目の微小真直梁 B_m の微小たわみ角 $d\omega_m$ は、 B_m の外周と内周のひずみ $\varepsilon_{out,m}$ 、 $\varepsilon_{in,m}$ から幾何学的条件に基づいて

$$d\omega_m = \frac{\varepsilon_{in,m} - \varepsilon_{out,m}}{2\eta} \frac{L_c}{M}$$

と求められ、さらにたわみ角 ω_m は ω_{m-1} と $d\omega_m$ の和となるので次式で算出される。

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

本方法では、 B_m の x と y 軸方向の微小変位 dx_m と dy_m を、 B_m の向きである中心線と直交する方向 θ_m と、 ω_m より以下の式で求める。

$$dx_m = (L_c/M) \omega_m \cos \theta_m$$

$$dy_m = (L_c/M) \omega_m \sin \theta_m$$

$$\theta_m = \tan^{-1}(-1/(dx/dy))$$

そして以下に示すように、 B_m の変位 Dx_m と Dy_m を、 B_{m-1} の変位に B_m の微小変位を加えて求める。

$$Dx_m = Dx_{m-1} + dx_m$$

$$Dy_m = Dy_{m-1} + dy_m$$

上記(2-1)で行った実験と同様にして、楕円環と四角環それぞれについて、集中荷重と等分布荷重下の内外周のひずみを計測し、それより各部の変位を計測した。集中荷重下で計測された楕円環と四角環それぞれの内外周のひずみと、これらのひずみから求められた両環状構造物各部の変位をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。点線は FEM 解析によって、また実線は本方法によって得られた変位である。これらの変位の相対誤差は 1~3% であり、等分布荷重の場合もほぼ同様であった。これらの結果は、開発した方法によって、環状構造物の断面形状や作用する荷重の分布によらず、変位を精度よく計測できることを示している。

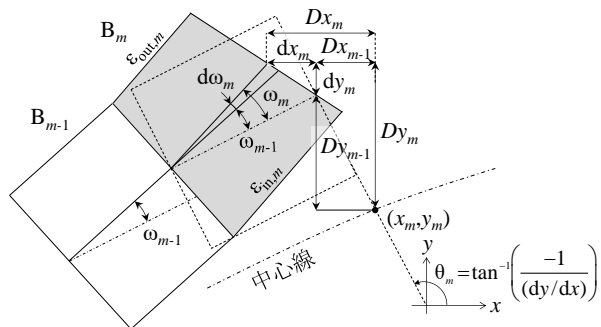
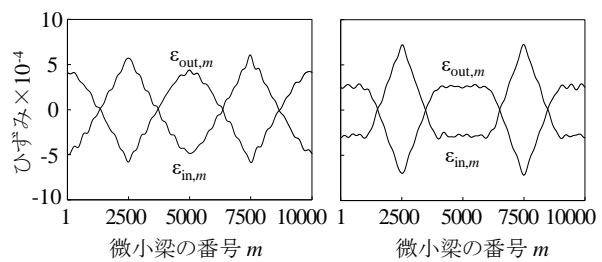


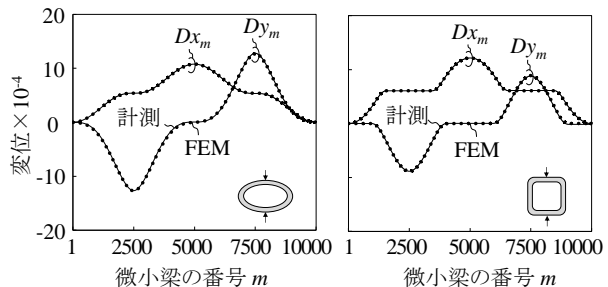
図9 環状構造物各部の変位計測モデル



(a) 楕円環

(b) 四角環

図10 計測された内外周のひずみ



(a) 楕円環

(b) 四角環

図11 変位計測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計32件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 北村祥太, 成枝秀介, 成瀬央
2. 発表標題 環状構造物周方向ひずみ計測方法の模擬実験による有効性検証
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Naruse, Shusuke Narieda, Kento Nishimura
2. 発表標題 Availability verification of the Brillouin-gain-spectrum-model-fitting ring circumferential strain measurement via simulation experiments
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Kitamura, Shusuke Narieda, Hiroshi Naruse
2. 発表標題 Expanded circumferential-strain-measurement method for general ring-shaped structures
3. 学会等名 8th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村祥太, 成枝秀介, 成瀬央
2. 発表標題 ブリルアンゲインスペクトルモデルあてはめによる円環の周方向ひずみ計測の環状構造物への拡張
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村研人, 成枝秀介, 成瀬央
2. 発表標題 実観測ブリルアンゲインスペクトルからの円環円周方向ひずみの計測
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村研人, 成枝秀介, 成瀬央
2. 発表標題 分布荷重がBGS に基づく円環の円周方向ひずみ計測に与える影響
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Naruse, Ayako Komatsu
2. 発表標題 Deformation of the Brillouin gain spectrum under spatially and temporally nonuniform strain
3. 学会等名 26th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kento Nishimura, Hiroshi Naruse
2. 発表標題 Analysis of BGS observation condition dependence of ring circumferential strain measurement error
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村研人, 成瀬央
2. 発表標題 BGSに基づく円環円周方向ひずみ計測におけるBGS観測条件と計測誤差の関係
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Naruse, Takeshi Ogawa, Takanori Nishino
2. 発表標題 Ring circumferential strain measurement based on a model of Brillouin gain spectrum shape
3. 学会等名 6th Asia Pacific Optical Sensors Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	三島 直生 (MISHIMA NAOKI) (30335145)	国立研究開発法人建築研究所・材料研究グループ・主任研究員 (82113)	