

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24510225

研究課題名(和文) 分布型光ファイバひずみ計測の高性能化についての研究

研究課題名(英文) The performance enhancement of distributed fiber optic strain measurements using Brillouin scattering

研究代表者

成瀬 央 (NARUSE, HIROSHI)

三重大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60402690

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：安全な社会に向けたモニタリングシステムへの応用が期待される、ブリルアン散乱現象を利用した分布型光ファイバひずみ計測の高性能化の研究を行った。まず、トンネルなどの円環構造物に設置された光ファイバで生じるブリルアンゲインスペクトル(BGS)の形状をモデル化し、モデルが観測されたBGSに一致する条件からひずみを計測する方法を開発した。次に、振動している構造物に生じる時間的不均一ひずみ下のBGSの形状を解析し、モデル化した。そして、このモデルを用いて時間的不均一ひずみの情報を得る方法を開発した。さらに、幅の異なるパルス光を照射し、それらで観測されたBGSの差分を解析することでシステムを高性能化した。

研究成果の概要(英文)：Fiber optic strain measurements using Brillouin scattering can be applied to infrastructure monitoring systems. In this study, we investigate three methods to enhance the performance of a fiber optic strain measurement system. In the first method, we constructed a model of a Brillouin gain spectrum (BGS) shape generated in a fiber installed on ring structures, such as tunnels. Ring circumferential strain is obtained under the condition that the modeled BGS agrees well with the observed BGS. Next, we constructed another model based on the BGS shape under temporally nonuniform strain produced in oscillating structures. This model, similar to the first model, is used for extracting information about the temporally nonuniform strain. Lastly, a BGS observation method was investigated to improve the performance of the fiber optic strain measurement system. Two pulses with different widths were launched into the fiber and the difference of two BGSs generated by the pulses were analyzed.

研究分野：光ファイバセンシング

キーワード：光ファイバセンサ 不均一ひずみ ブリルアンゲインスペクトル 形状解析 モデル 円環 パルス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、インフラ設備などの構造物の事故や災害が急増しており、これが大きな社会問題となっている。そのため、構造物に生じているひずみ（伸縮の程度）や構造物各部に生じている変位を計測し、構造物の変状や損傷を検出するためのモニタリング技術の重要性が高まっている。現在一般的に用いられている電気的なひずみ計測方法は、離散的に設置されたセンサ部分の局所的なひずみの計測であり、また光学的な変位計測方法は、装置設置の制約から常時計測が困難である。

それに対して光ファイバをセンサとして用いる光ファイバひずみ計測方法は、長距離にわたって分布的な（連続とみなせるほど短い間隔かつ多点での）ひずみ計測を実現している。この方法は、光ファイバ中で発生するブリルアン散乱光のスペクトルすなわちブリルアンゲインスペクトル（BGS）が、発生場所のひずみに比例して周波数シフトする現象に基づいている。この光ファイバひずみ計測を用いると、構造物の線あるいは面的なモニタリングと常時観測が可能であり、安全安心な社会を実現するための有望な技術の一つとして、構造物の安全モニタリングシステムへの応用が期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、上述の BGS 周波数シフトのひずみ依存性に基づく光ファイバひずみ計測方法を、インフラ設備などの構造モニタリングシステムに応用するために高性能化することである。

この光ファイバひずみ計測方法では、センサとして構造物などに設置された光ファイバの BGS が観測され、それよりひずみが求められる。BGS の観測には使用する装置に固有な、i) ひずみ計測位置を中心に、ある長さの空間的な BGS 観測区間と、ii) 計測時刻を中心に、ある長さの BGS 観測時間が必要である。これらの BGS 観測区間と観測時間内でひずみが均一な場合には、BGS の形状はローレンツ関数で与えられる。そのため、光ファイバ上のひずみ計測位置ごとに、そこで観測された BGS が最大になる周波数が解析され、その周波数に対応するひずみが求められる。しかしながらひずみが不均一な場合には BGS の形状は変化し、解析された周波数がひずみに対応しなくなる。この BGS の変形が、大きなひずみ計測誤差を生じさせる場合がある。

本研究では光ファイバひずみ計測方法を、空間的不均一ひずみが生じるトンネルなどの円環構造物に応用するための、円環の円周方向ひずみ計測方法の開発と、振動を受けている構造物に応用するための、時間的不均一ひずみ下の BGS 形状解析方法の明確化を行う。BGS 観測区間を短くし、この区間内でのひずみ変化を小さくすることによっても、空間的不均一ひずみによる計測誤差を低減できる。現在実用化がもっとも進んでいるシステム

では、光ファイバにパルス光が入射され、それによって発生した BGS が観測される。BGS 観測区間を決めるパルス光の幅を短くすると BGS は広がり、ひずみに対応する周波数の決定精度が劣化する。そこで、従来の計測システムをそのまま用い、パルス光の入射方法を工夫することによる計測システムの高性能化を行う。上述した本研究の主な目的は、以下のようにまとめられる。

- (1) 円環の円周方向ひずみ計測方法の開発
- (2) 時間的不均一ひずみ下の BGS の形状解析方法の明確化
- (3) 計測システムの高性能化

### 3. 研究の方法

#### (1) 円環の円周方向ひずみ計測方法の開発

本方法では、円環断面の円周上に光ファイバが設置される。複数の円環外周上に光ファイバが設置され、それらが配線用の光ファイバで一筆書きに接続されている状態が図 1 であり、光ファイバが設置されている一つの断面が図 2 である。断面ごとに、設置された光ファイバ上の多数の位置で BGS が観測され、これらの位置で円周方向のひずみが計測される。この光ファイバに発生する BGS の形状を、i) ローレンツ関数で与えられるひずみがない状態での BGS の基本形状と、BGS 周波数シフトのひずみ依存性、ii) BGS の観測位置に対応する角度  $\varphi$  と観測区間  $\Delta\varphi$  などの BGS 観測条件、iii) 求めるべきひずみ  $\varepsilon(\varphi)$ 、にかかわるパラメータを用いてモデル化し、このモデルが実際に観測された BGS に最もよく一致する条件からひずみを求める方法を開発する。そして、この方法を評価する。

#### (2) 時間的不均一ひずみ下の BGS の形状解析方法の明確化

時間的に変化するひずみ、すなわち時間的不均一ひずみを受けている光ファイバに生じ

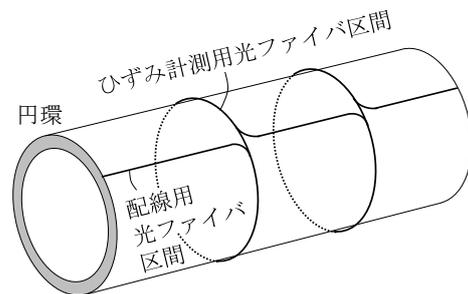


図1 円環への光ファイバの設置（外周設置の場合）

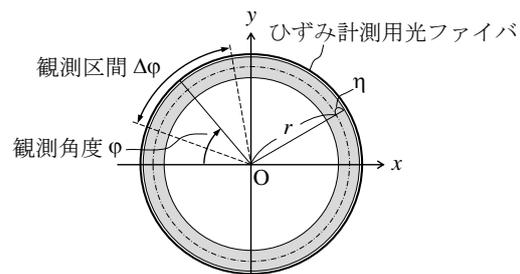


図2 光ファイバが設置された円環断面

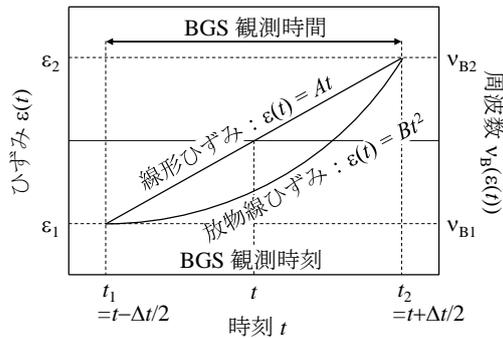


図3 時間的不均一ひずみ

る BGS の形状を、空間的不均一ひずみ下の光ファイバの BGS 形状に対する解析と同様に解析する。時間的不均一ひずみの典型例として、図 3 に示す時間とともに線形に変化する時間的線形ひずみと、放物線状に変化する時間的放物線ひずみを取り上げ、それらのひずみ下での BGS の形状を与えるモデルを構築する。これらのモデルから得られる BGS と実際に観測される BGS とが一致することを確認し、時間的不均一ひずみ下の BGS のモデルの妥当性を明らかにする。また、このモデルを用いて、時間的不均一ひずみの情報を抽出する方法を開発するとともに、BGS の形状変化に起因するひずみ計測誤差の特性を明らかにする。

### (3) 計測システムの高性能化

これまでの研究（基盤研究(C)：分布型光ファイバひずみ計測システムの高性能化とモニタリングへの応用についての研究）で構築したシステムを、ひずみの分布計測ができるように、BGS を時間的に分解して観測するシステムに発展させる。具体的には図 4 に示すように、光源からの連続光を任意の幅をもつパルス光に変換するためのパルス化装置と、光ファイバにそって分布的に BGS を観測するための電気信号発生器や増幅器、さらにデジタル化装置などを付加する。パルス化装置で、連続光を異なる幅  $\tau_1$  と  $\tau_2$  をもつパルス光に変換し、これらを別々に光ファイバに入射する。そして、それぞれのパルス光で観測された BGS の差分（差分 BGS）からひずみを求める。実験によって、差分 BGS と、幅  $\tau_1$ - $\tau_2$  の単一パルス光による BGS とを比較し、本システムによる性能向上効果を調べる。

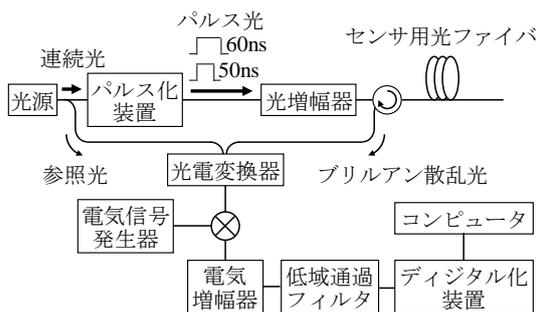


図4 計測システム

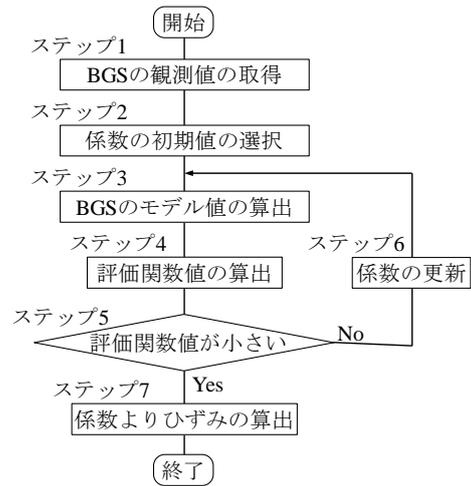


図5 円環の円周方向ひずみ計測方法の流れ

## 4. 研究成果

### (1) 円環の円周方向ひずみ計測方法の開発

実際に観測された BGS と、モデルから得られた BGS との差の 2 乗和を評価関数に用い、評価関数が最小になる条件、すなわちモデルが観測値にもっともよく一致する条件からひずみを求めるモデルフィット型のひずみ計測方法を開発した。円環周上のひずみは周期  $2\pi$  の関数となることから、ひずみをフーリエ級数に展開し、その係数を求めることとした。開発した円環の円周方向ひずみ計測方法の流れを、図 5 に示す。ステップ 1 では、円環周上に設置された光ファイバの BGS を観測する。本方法では、評価関数を最小化するフーリエ係数を解析的に得ることができないため、以下のように繰り返し計算によって求める。ステップ 2 では、繰り返し計算に用いるフーリエ係数の初期値を選択する。ステップ 3 ではモデルから BGS 値を算出し、続くステップ 4 では全観測角度と周波数について評価関数である BGS の差の 2 乗和を算出する。ステップ 5 では評価関数値が十分小さいか判定し、小さければ繰り返し計算を終了する。そして、ステップ 7 でそのときのフーリエ係数からひずみを求める。そうでない場合には、ステップ 6 でフーリエ係数を更新し、ステップ 3 から 5 を繰り返す。

円環の直径方向に対向する荷重を作用した場合の、ひずみ計測シミュレーション結果を図 6 に示す。力学的解析で求められたひずみと、フーリエ係数の最大次数を 10 として本

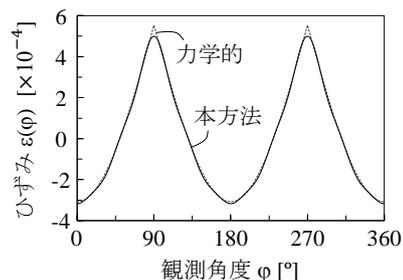


図6 ひずみ計測結果

方法で求められたひずみを、それぞれ図6に破線と実線で示す。図6は、両者が明確に区別できないほどよく一致していることを示している。前者と後者の差が最大になる  $90^\circ$  でのひずみはそれぞれ、 $5.53$ 、 $5.00 \times 10^{-4}$  であった。最大次数が20の場合には  $5.18 \times 10^{-4}$  と、最大次数の増加とともに誤差が減少することも確認された。

## (2) 時間的不均一ひずみ下のBGSの形状解析方法の明確化

時間的不均一ひずみの典型例である時間的線形ひずみと時間的放物線ひずみについて、空間的不均一ひずみ下のBGS形状の解析と同様にしてこれらのひずみ下のBGS形状を理論的に求め、モデル化した。また、これまでの研究(基盤研究(C):分布型光ファイバひずみ計測システムの高性能化とモニタリングへの応用についての研究)で構築したBGS観測部と、本研究で構築した時間的不均一ひずみ発生部とを組み合わせたシステムを構築した。そのシステムを図7に示す。図7のBGS観測用光ファイバ区間がモータ駆動移動ステージを用いて引っ張られ、この区間に時間的不均一ひずみが形成される。理論的、実験的に得られた、時間的線形ひずみ下のBGSを図8に示す。図8より、両BGSはよく一致していることがわかる。図示はしていないが、時間的放物線ひずみについても両BGSはよく一致していた。これらの結果は、本解析方法とモデルの妥当性を示している。空間的不均一ひずみの場合と同様、このBGSのモデルを、観測されたBGSにあてはめることによって、時間的不均一ひずみの情報を得ることができることも明らかにした。また、時間的線形ひずみと空間的線形ひずみのよ

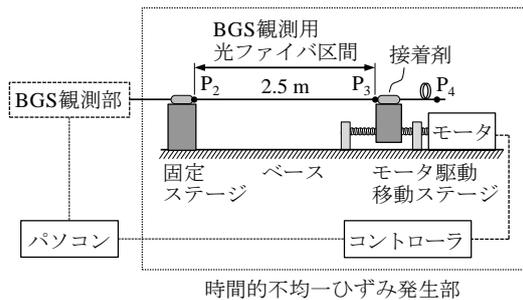


図7 時間的不均一ひずみ下のBGSの観測システム

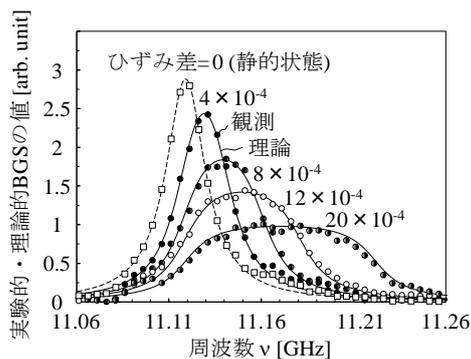
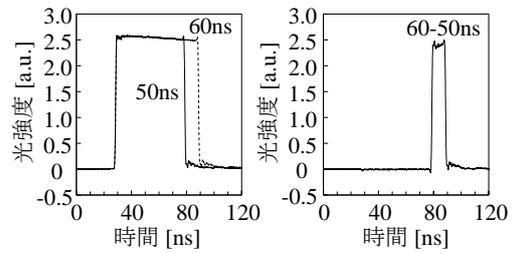


図8 実験的・理論的に得られたBGS



(a) 異なる幅のパルス光 (b) 差分パルス光  
図9 光ファイバへの入射パルス光

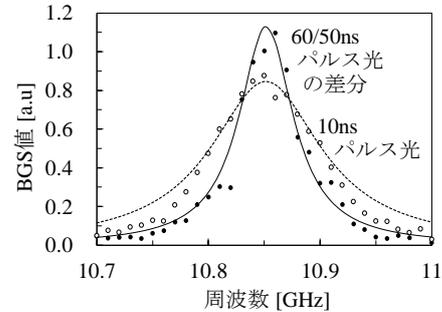


図10 BGS観測結果

うにひずみ変化が同様である場合には、時間的・空間的不均一ひずみはBGSに同じ形状変化を与え、その結果として、ひずみ計測誤差の特性も同じになることも明らかにした。

## (3) 計測システムの高性能化

センサ用の光ファイバに、幅60nsのパルス光を入射してBGSを観測し、次に幅50nsのパルス光でBGSを観測した。これらのBGSの差分は、幅10nsのパルス光を入射した場合のBGSに相当する。光ファイバに入射された幅60nsと50nsのパルス光を図9(a)に、それらの差分を図9(b)に示す。幅60nsと50nsのパルス光で観測されたBGSの差分BGSと、幅10nsの一つのパルス光で観測されたBGSを図10に示す。図中の実線は、観測値の○や●にローレンツ関数をあてはめた結果である。前者のBGSの最大値と半値全幅は、それぞれ後者の約1.3倍、2倍であった。ひずみを与える周波数の決定誤差は半値全幅に比例し、信号対雑音比の1/4に逆比例することから、この実験結果は本方法によって計測精度の向上が見込めることを示している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 19 件)

- ① 成瀬 央, 小川武志, 西野隆典, ブリルアンゲインスペクトル形状モデルに基づく円環の円周方向ひずみ計測, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 2016年2月19日, 沖縄大学(沖縄県・那覇市)

- ② Hiroshi Naruse, Ayako Komatsu, Mitsuhiro Tateda, Deformation of Brillouin gain spectrum shape caused by strain varying linearly with respect to time, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, 2015年9月30日, Curitiba (Brazil)  
査読有, Proc. SPIE 9634, 96344W-1-96344W-4,  
DOI: 10.1117/12.2194258
- ③ 小松綾子, 西野隆典, 成瀬史, 時間的放物線ひずみ下のブリルアンゲインスペクトルの形状, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2015年9月28日, 名古屋工業大学 (愛知県・名古屋市)
- ④ 小川武志, 西野隆典, 成瀬史, ブリルアンゲインスペクトルモデルに基づく円環のひずみ計測, 平成27年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2015年9月28日, 名古屋工業大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑤ 成瀬史, 小松綾子, 立田光廣, 時間的線形ひずみ下のブリルアンゲインスペクトルの形状変形, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 2015年5月21日, 金沢勤労者プラザ (石川県・金沢市)
- ⑥ 加藤大介, 西野隆典, 成瀬史, 一端固定・他端自由支持半円曲り梁による変位計測, 平成26年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2014年9月9日, 中京大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑦ 榊原弘紀, 西野隆典, 成瀬史, 李哲賢, 異なる幅をもつパルス光の入射によるBOTDRの性能向上, 平成26年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2014年9月9日, 中京大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑧ 小松綾子, 西野隆典, 成瀬史, 線形動ひずみ下のブリルアンゲインスペクトルの形状, 平成26年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2014年9月9日, 中京大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑨ 成瀬史, 早瀬義喜, ブリルアンゲインスペクトルモデルを用いた正弦的動ひずみの振幅と中心の計測, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 2014年5月30日, 山形大学 (山形県・米沢市)
- ⑩ 早瀬義喜, 成瀬史, ブリルアンゲインスペクトルモデルに基づく動的ひずみ計測, 2014年電子情報通信学会総合大会, 2014年3月19日, 新潟大学 (新潟県・新潟市)
- ⑪ 早瀬義喜, 成瀬史, 分布観測されたBGSを用いた一方向荷重下の円環の直径変化計測, 平成25年度電気関係学会東海支部連合大会, 2013年9月24日, 静岡大学 (静岡県・浜松市)
- ⑫ 早瀬義喜, 成瀬史, 一方向荷重下の円環の直径変化計測に対するBGS観測条件の影響, 2013年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013年9月17日, 福岡工業大学 (福岡県・福岡市)
- ⑬ 早瀬義喜, 成瀬史, BGSモデルを用いた一方向荷重下円環の直径変化計測, 電子情報通信学会総合大会, 2013年3月21日, 岐阜大学 (岐阜県・岐阜市)
- ⑭ 早瀬義喜, 成瀬史, 正弦波状ひずみ分布によるブリルアンゲインスペクトルの変形, 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 2012年10月25日, 海峡メッセ下関, 海峡メッセ下関 (山口県・下関市)
- ⑮ 早瀬義喜, 成瀬史, 正弦波状ひずみ分布下のブリルアンゲインスペクトルの形状, 電子情報通信学会, 2012年9月13日, 富山大学 (富山県・富山市)
- ⑯ 柴田恭一郎, 成瀬史, 三島直生, 畑中重光, 鉄筋コンクリート構造物の損傷度迅速判定のための光ファイバセンサを用いたひずみ検出用デバイスの開発, 日本建築学会, 2012年9月12日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑰ Yoshiki Hayase, Hiroshi Naruse, Measurement of diameter changes in tunnels using fiber-optic sensing, Fifth International Workshop on Regional Innovation Studies (IWRIS2013), 2013年10月17日, 三重大学 (三重県・津市)  
査読有, Proc. IWRIS2013, 44-47,
- ⑱ Yoshiki Hayase, Hiroshi Naruse, Shape variation of Brillouin gain spectrum caused by sinusoidal-like strain distribution, 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2013年7月3日, 京都国際会議場 (京都府・京都市)  
査読有, Proc. CLEO-PR 2013, WPF-19,  
DOI: 10.1109/CLEOPR.2013.6600583
- ⑲ Hiroshi Naruse, Shinya Furukawa, Takanori Nishino, Measurement of tunnel-ceiling and side-wall displacements using arc-shaped beam and fiber Bragg grating sensors, 22nd International Conference on optical Fibre Sensors, 2012年10月16日, Beijing (China)  
査読有, Proc. SPIE 8421, 842133-1-842133-4,  
DOI: 10.1117/12.974833

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：変位計測方法および変位計測装置

発明者：成瀬 央

権利者：国立大学法人三重大学

種類：特許

番号：(出願番号) 2015-184512

出願年月日：平成 27 年 9 月 17 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

成瀬 央 (NARUSE HIROSHI)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60402690

### (2) 研究分担者

立田 光廣 (TATEDA MITSUHIRO)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：30282445

三島 直樹 (NAOKI MISHIMA)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30335145

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究者協力者

岸田 欣増 (KINZO KISHIDA)

ニューブレクス株式会社・代表取締役

李 哲賢 (LI CHE HSIEN)

ニューブレクス株式会社・取締役