

機関番号：14101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20510156

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Research on improvement of distributed fiber optic strain measurement system and the application to monitoring

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、ブリルアン散乱現象を利用した光ファイバひずみ計測の高性能化と構造モニタリングへの応用について検討し、(i) 不均一ひずみ分布下の光ファイバから生じるブリルアンスペクトルの形状変形に対する理論的解析方法の明確化と、実験による解析方法の妥当性検証、(ii) 成果(i)を利用した円環の直径変化計測方法の開発、(iii) 信号処理を用いた、散乱光観測区間短縮によるひずみ計測誤差低減方法の開発、(iv) 2次元変位センサの開発、などを行った。

研究成果の概要（英文）：Fundamental research was conducted to improve the performance of a fiber optic strain measurement system based on Brillouin scattering and apply it to structure monitoring. The following achievements were made; (i) clarification of a method to theoretically analyze the deformation shape of the Brillouin gain spectrum produced from an optical fiber under a non-uniform strain distribution, and experimental validation of the theoretical analysis, (ii) development of a method to measure the change in a circular ring diameter using the results obtained in (i), (iii) development of a signal processing method to decrease the strain measurement error by improvement of the spatial resolution, and (iv) development of a two-dimensional displacement sensor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	100,000	30,000	130,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：光ファイバセンシング

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：光ファイバ、ブリルアン散乱、スペクトル形状、ひずみ計測、不均一ひずみ分布、モニタリング、変位センサ、円環

## 1. 研究開始当初の背景

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システムでは、センサである光ファイバに計測用の光を入射すると、それによって光ファイバ内に生じるブリルアン散乱光のスペクトルが、ひずみに比例して

周波数シフトする現象を利用してひずみを計測している。そして光ファイバの長さ方向に非常に狭い間隔で、すなわち光ファイバ上の連続した位置でスペクトルを観測することによって、ひずみの分布計測を実現している。このシステムはひずみの分布計測という

他のシステムにはない、モニタリングに適した特長を持つことから、インフラ設備や自然環境のモニタリングへの応用が期待され、国内外で研究開発が進められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、安心安全な社会の実現に役立つことが期待される、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システムについて、その性能向上やモニタリング応用のための基礎研究と開発を行う。

ブリルアン散乱現象を利用した光ファイバひずみ計測では、散乱光観測位置を中心にして、観測区間内で発生した全散乱光が観測される。散乱光観測区間でひずみが均一な場合には、観測されるブリルアンゲインスペクトルの形状はローレンツ関数で与えられ、最大パワーを与える周波数（以下ではピーク周波数と呼ぶ）のシフトからひずみが求められる。しかしながらひずみ分布が不均一な場合には、ブリルアンゲインスペクトル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っていた。この不均一ひずみ分布に起因するスペクトルの変形とそのひずみ計測への影響が、本ひずみ計測方法の重要な技術課題となっている。

本研究の第一目的はこの問題の解決のために、不均一ひずみ分布下の光ファイバから生じるブリルアンスペクトルの変形形状を理論的に解析する方法を明らかにするとともに、実験システムを構築し、それを用いて解析方法の妥当性を検証することである。また、トンネルなどの円環構造物の変状モニタリングに重要な円環直径変化計測に、その成果を応用する方法を考案することである。

本計測システムでは、ひずみが増加する部分で計測誤差が大きくなるため、これがひずみ分布を計測する際の精度低下の一因となっている。この低減には、散乱光観測区間内のひずみ変化を小さくすることも有効な方法である。本研究の第二の目的は、一つの散乱光観測区間に複数のスペクトル観測位置がある、別な言い方をすると、観測区間より観測位置の間隔が狭いことに着目した、信号処理による散乱光観測区間短縮方法を確立することである。

さらに、本センサの構造モニタリング応用のための2次元変位センサの開発を第三の目的とする。

## 3. 研究の方法

不均一ひずみ分布として、梁表面に生じる線形ひずみ分布と、円環円周に生じる三角関数ひずみ分布を取り上げ、それらのひずみ分布下のブリルアンスペクトルの変形形状を理論的に解析する。線形ひずみ分布については、散乱光観測区間長とその両端におけるひ

ずみで与えられたひずみ分布に、一方、三角関数ひずみ分布については、曲り梁の弾性解析に基づいて円環各部寸法や断面形状、外力の大きさから求めた、円環の直径変化とひずみ分布との関係に、ブリルアンゲインスペクトル周波数シフトのひずみ依存性と、スペクトルの観測条件を加えて、変形したスペクトルの形状をモデル関数として定式化する。また、実験システムを構築し、実際にスペクトルを観測することによって、この解析によって得られたスペクトルの形状を検証する。さらに、観測されたスペクトルに、求めるべき直径変化をパラメータに含むモデル関数をあてはめ、円環の直径変化を求める方法を確立し、実験によって有効性を評価する。

散乱光観測区間短縮によるひずみ計測誤差低減方法については、まず発生しているブリルアンゲインスペクトルと観測されるスペクトルとの関係を、観測に用いるシステムの特長（以下では装置関数と呼ぶ）を考慮してモデル化する。次に、光ファイバの長さ方向に観測されたパワーと一致するように、観測位置の間隔に短縮された区間でのパワーを推定する。本方法ではこの推定に、ウィナーフィルタを用いる。シミュレーションによって、ひずみ変化部分でのひずみ計測誤差の評価を行う。

2次元変位センサによる変位計測方法を考案する。このセンサはX字状に交差する一対の光ファイバで構成される。実験によって計測誤差を調べるとともに、計測されたひずみに含まれる誤差が、求められた変位に与える影響について解析する。

## 4. 研究成果

(1) 不均一ひずみ分布に起因するブリルアンゲインスペクトルの形状変形解析と実験による検証

### ①理論的解析

はじめに、線形ひずみ分布下の光ファイバで観測されるブリルアンスペクトルの形状を理論的に導出した。ここでは、散乱光観測区間の長さとして区間両端でのひずみに対応するピーク周波数を用いて観測区間内のピーク周波数を求め、それに、均一ひずみ分布から生じるブリルアンゲインスペクトル（ローレンツ関数で与えられる）の半値全幅と最大値、スペクトルの周波数シフトなどをパラメータに用いて、スペクトルの変形形状をモデル関数として定式化した。その結果、線形ひずみ分布の傾き、すなわち観測区間両端でのピーク周波数差が大きくなると、ブリルアンスペクトルはローレンツ関数形状から変形し、最大値が減少しながら平坦化していくことがわかった。また、変形スペクトルは、観測区間中央でのひずみに対応する周波数を中心に対称形となることがわかった。

次に、三角関数ひずみ分布下のブリルアンゲインスペクトルの形状変形について解析した。円環に曲り梁の弾性解析を適用し、中心線直径などの円環各部の寸法や断面形状、作用する荷重の大きさなどをパラメータに用いて、円環表面に生じるひずみ分布を求めた。そして線形ひずみ分布の場合と同様に、ブリルアンゲインスペクトルの特性を考慮して、円環表面でのひずみに対応するピーク周波数を求めた。それに、円環上での観測位置と観測区間をパラメータに加えて、三角関数ひずみ分布下の光ファイバから生じるブリルアンゲインスペクトル形状をモデル関数として定式化した。このモデル関数を調べた結果、作用する荷重が増加するにつれて、ブリルアンゲインスペクトルは周波数に関して非対称性を増す。また、散乱光観測位置、観測区間長に応じて、単峰/双峰性、非対称性を示すなど、さまざまな形に変形することが明らかになった。

## ②実験による検証

線形ひずみ分布と三角関数ひずみ分布から生じるブリルアンゲインスペクトルを観測するために、図1に示す実験システムを構築した。この実験システムは、不均一ひずみ分布発生部と、そこに設置された光ファイバのブリルアンゲインスペクトルを観測するためのスペクトル観測部からなっている。

炭素繊維強化プラスチックとアルミハニカムの複合材料を用いて真直梁を製作し、その梁の一端を固定、もう一端に集中荷重を作用することによって真直梁に線形ひずみ分布を形成した。この固定点と荷重点の間に、長さ2mのスペクトル観測用の光ファイバを接着し、この区間のスペクトルを観測した。一方、真直梁と同様の複合材料を用いて円環を製作し、その円環に直径方向から荷重を作用することによって、三角関数ひずみ分布を円環表面に形成した。円環外側表面に中心角が120°の範囲の光ファイバを接着し、この部分のスペクトルを観測した。

不均一ひずみ分布発生部の光ファイバで生じた散乱光はスペクトル観測部に導かれ、そのスペクトルが観測される。この観測部では、光源からの連続光が信号光と参照光に分けられ、信号光は偏波スクランブラを介してフ

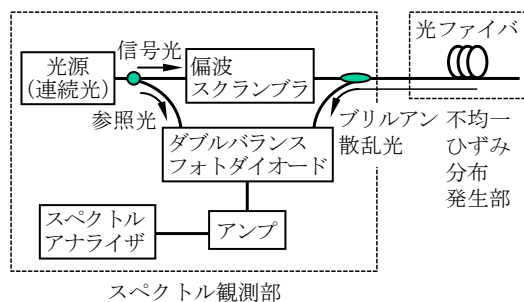


図1 構築した実験システム

ァイバに入射される。この入射光によって発生したブリルアン散乱光は光ファイバをもどり、ダブルバランスフォトダイオードに導かれる。そこで参照光を用いてコヒーレント検波され、同時に電気信号に変換される。そして、その電気信号がスペクトルアナライザで観測される。交付された科学研究費補助金を用いて真直梁と円環の製作、偏波スクランブラの購入を行い、実験システム構築した。

まず、線形ひずみ分布から生じるブリルアンゲインスペクトル観測実験結果について述べる。観測されたブリルアンゲインスペクトルを図2に示す。図2の●などは観測結果であり、実線はモデル関数から求められたスペクトルである。図2より、両者はよく一致し、ひずみ変化が大きくなるにつれてスペクトルが平坦化していくことが確認された。

次に図3に、円環の外側表面に取り付けられた、三角関数ひずみ分布が生じている光ファイバで観測されたブリルアンゲインスペクトルを示す。図3は、荷重方向と90°ずれた観測位置での結果であり、実線や破線は理論から求められたスペクトル、○などは観測結果である。図3より、解析結果は観測結果によく一致することが確認される。観測スペクトルにローレンツ関数をあてはめてひずみを求める従来の方法と、本研究の方法によ

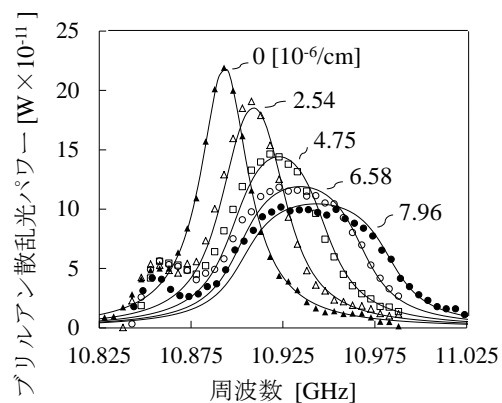


図2 線形ひずみ分布のスペクトル

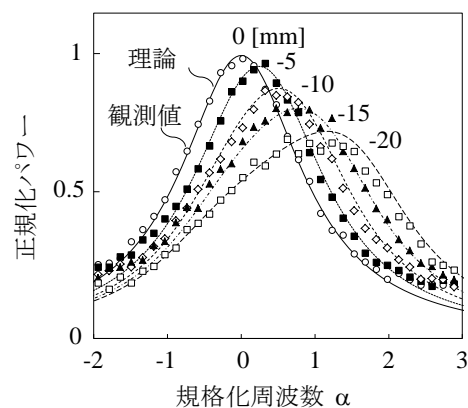


図3 三角関数ひずみ分布のスペクトル

表1 ひずみ計測結果と誤差 (×10<sup>-4</sup>)

与えたひずみ	求められたひずみ		ひずみ計測誤差	
	本方法	従来法	本方法	従来法
1.38	1.57	0.77	0.20	0.61
2.75	2.92	1.46	0.17	1.30
4.13	4.07	2.13	0.06	2.00
5.51	5.59	2.95	0.08	2.56

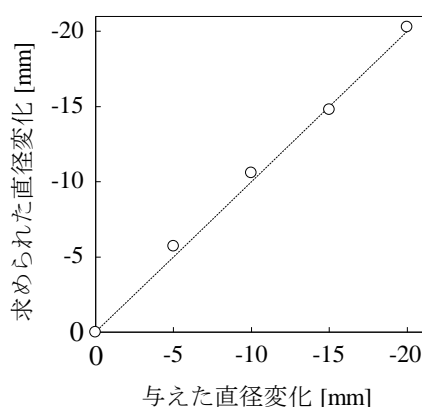


図4 円環直径変化計測結果

って求められたひずみの比較を表 1 に示す。従来の方法では、求められたひずみは与えたひずみの半分程度であり、誤差はひずみの増加とともに増えている。それに対して本方法では、ひずみが  $4 \times 10^{-4}$  を超えると従来方法の誤差の約 30 分の 1 に減少できている。

上述したように本方法によって、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システムに対する学術的かつ実用上重要な研究課題の一つであった、不均一ひずみ分布によるブリルアンスペクトル形状変化の理論解析方法を明らかにするとともに、その解析結果の妥当性を実験的に示すことができた。

#### (2) 円環直径変化計測方法の開発

上述の(1)の成果を利用して理論的に導出されたスペクトルと、観測されたスペクトルとの差の 2 乗を評価関数として用い、それを最小化する条件から直径変化を求める方法を開発した。本方法による直径変化計測実験結果を図 4 に示す。円環直径 2m の 1% すなわち 20mm の変位に対し、計測誤差は最大でも 0.7mm であった。トンネルの直径変化は直径の 1% を超えると急激に進行するのでこれを基準に考えれば、本結果はその 30 分の 1 の誤差で計測できていることを示しており、本方法の有効性が確認された。

#### (3) 散乱光観測区間短縮によるひずみ計測誤差低減方法の開発

本方法では、光ファイバ上での散乱光観測位置の間隔が散乱光観測区間より短く、光フ

ァイバの微小区間が複数の散乱光観測区間に含まれていることを前提にしている。ファイバの長さ方向の観測特性を装置関数とし、この装置関数と各観測位置でのパワーとの畳み込み積分として、光ファイバの長さ方向のパワーの分布をモデル化する。そして、ウィナーフィルタを用いて、具体的には、観測時に加わるノイズをも考慮して定式化された、発生パワーと観測パワーとの関係式を周波数領域に変換し、そこで観測結果にもっともよく一致するモデルを求め、その結果を逆変換することによって、散乱光観測区間を観測位置の間隔に短縮したパワー分布を推定する方法を開発した。

シミュレーションによって本方法の評価を行った。ステップ状に変化するひずみ変化部分で、本方法は従来の方法に比べ 3.8 倍の立ち上がりを示しており、ひずみ変化に対する追従性が向上できていることが確認された。散乱光観測区間内での観測位置の数が増えると追従性はより向上するが、得られるひずみのばらつきが大きくなることも明らかになった。このように、従来の計測装置で得られた結果に信号処理を施すことによって観測区間を短縮し、ひずみ計測精度を向上できることを確認した。

#### (4) 2次元変位センサの開発

本研究で開発した 2 次元変位センサは、平行な 2 枚のプレートと、そのプレートに X 字状に固定された 2 本の光ファイバとで構成されている。このセンサでは、プレート間の相対変位によって 2 本の光ファイバに生じるひずみを計測することによって、2 本の光ファイバがつくる平面内での 2 次元変位を計測する。センサ各部の寸法をパラメータとして変位計測誤差の特性を調べることによって、光ファイバのプレート上での固定点間隔と 2 枚のプレート間隔が等しい場合に、誤差が最小になることを明らかにした。この誤差解析は、設置するセンサの計測誤差の特性を与え、センサの設計指針として重要である。

プレート間隔が 1275mm、光ファイバ固定点間隔が 255mm である 2 次元変位センサを試作し、変位計測実験を行った。プレートをその長さ方向とそれに直交する方向にそれぞれ 8mm 変位させたところ、それぞれの方向での最大誤差は 0.060、0.284mm であった。これは理論的に推定される誤差の標準偏差の 2.3 倍、1.9 倍であった。

#### 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)

[学会発表] (計 14 件)

①小黒雄輝、成瀬央、西野隆典、ブリルアンゲインスペクトル推定区間の細分化による

- ひずみ計測精度向上、電子情報通信学会総合大会、2011年3月16日、東京都市大学、東京
- ②服部智明、成瀬央、西野隆典、ブリルアンゲインスペクトル観測による円環の直径変化計測、電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会、2011年3月4日、機械振興会館、東京
- ③服部智明、成瀬央、西野隆典、ブリルアンゲインスペクトル形状解析に基づく内空変位計測、電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2010年9月16日、大阪府立大学、大阪
- ④水野佑哉、成瀬央、西野隆典、分布観測されたブリルアンゲインスペクトルデータの圧縮、電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2010年9月16日、大阪府立大学、大阪
- ⑤小黒雄輝、成瀬央、西野隆典、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化計算による光ファイバひずみ分布計測精度向上、電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2010年9月16日、大阪府立大学、大阪
- ⑥成瀬央、野沢和彦、光ファイバひずみセンシングによる地下鉱山変状モニタリングの検討、第12回建設ロボットシンポジウム論文集、2010年9月7日、早稲田大学、東京
- ⑦矢倉喬介、成瀬央、ウィナーフィルタを用いた散乱光パワー推定による分布型光ファイバひずみ計測の空間分解能向上、電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会、2009年11月27日、Jヴィレッジ、福島
- ⑧Kei Yasuda, Hiroshi Naruse, Li Che Hsien, Mitsuhiro Tateda, Deformation of Brillouin scattered light power spectrum shape by linear strain distributio, 20th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009年10月8日、英国 (エジンバラ)
- ⑨Hiroshi Naruse, Yoshinori Yoshikawa, Gabriel Arevalo, Juan P. Gonzalez, Alejandra Alvarez, Luis Mujica, Displacement measurement by sensor unit with a pair of crossed optical fibers, 20th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2009年10月7日、英国 (エジンバラ)
- ⑩矢倉喬介、成瀬央、分布型光ファイバひずみ計測システムのウィナーフィルタによる空間分解能向上、電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2009年9月17日、東北大学、宮城
- ⑪吉川佳典、成瀬央、X字型光ファイバ変位センサの計測誤差の特性、電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2009年9月17日、東北大学、宮城
- ⑫吉川佳典、成瀬央、X字型光ファイバ変位センサによる変位計測と変位計測誤差の解析、電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会、2009年5月29日、住友電気工業(株)南箱根セミナーハウス、静岡

- ⑬安田圭、成瀬央、李哲賢、立田光廣、線形ひずみ分布下のブリルアン散乱光スペクトル形状計測、電子情報通信学会2009年総合大会、2009年3月17日、愛媛大学、愛媛
- ⑭吉川佳典、成瀬央、分布型光ファイバひずみ計測システムを利用した変位センサ、電子情報通信学会2009年総合大会、2009年3月17日、愛媛大学、愛媛

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

- ①名称：光ファイバ構造物変位計測装置及びその計測方法

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) 2010-192583

出願年月日：平成22年8月30日

国内外の別：国内

- ②名称：分布型光ファイバセンシングシステムを用いた構造物変状モニタリング方法及び装置

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) 2008-147040

出願年月日：平成20年6月4日

国内外の別：国内

## 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 (MITSUHIRO TATEDA)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：30282445

児玉 哲司 (TETSUJI KODAMA)

名城大学・理工学部・電気電子工学科・教授

研究者番号：50262861

川口 淳 (JUN KAWAGUCHI)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50224746

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：

### (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