

平成18年度 学術創成研究費 研究進捗状況報告書 (中間評価用)

平成18年3月31日現在

ふりがな	ほたて かずお		所属研究機関・ 部局・職	東京大学・大学院工学系研究科・教授				
研究代表者 氏名	保立 和夫							
研究課題名 (英訳名)	安全・安心の為のファイバセンサフォトンクス - 光ファイバ神経網技術の極限性能追求 - (Fiber Sensor Photonics for Safety and Security - Realization of ultimate performance in fiber optic nerve systems -)							
研究経費 (千円未満切捨) <small>平成16,17年度使用内訳は支出額、平成18年度以降の交付額は内約額、使用内訳は支出予定額を記入</small>	年度	研究経費(千円)		使用内訳(千円) <平成18年度以降は支出予定額>				
		交付額	支出額	設備備品費	消耗品費	旅費	謝金等	その他
	平成16年度	56,800	56,800	37,144	14,896	3,477	656	627
	平成17年度	54,600	54,600	18,327	23,605	4,471	6,933	1,264
	平成18年度	52,900	-	25,900	15,000	4,000	7,000	1,000
	平成19年度	51,400	-	24,400	15,000	4,000	7,000	1,000
	平成20年度	49,000	-	23,000	14,000	4,000	7,000	1,000
	総計	264,700						
研究組織 (研究代表者及び研究分担者)								
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担 (研究実施計画に対する分担事項)					
保立 和夫	東京大学・大学院工学系研究科・教授	フォトリソグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> 研究全体の統括 誘導ブリルアン散乱の局在発生技術による完全分布型高空間分解能高速光ファイバ歪センシング技術 光ファイバ振動分布センシング技術 センシング用光ファイバの構造解析 痛みの分かる材料・構造の実証研究 					
山下 真司	東京大学・大学院工学系研究科・助教授	光エレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> 光波コヒーレンス関数の合成法による同一波長FBG多重化技術 光ファイバレーザによる多点型センシング技術 					
何 祖源	東京大学・大学院工学系研究科・研究拠点形成特任助教授	フォトリソグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバ加入者網診断システム 側圧分布センシング技術 痛みの分かる材料・構造の実証研究 					
岸 真人	東京大学・大学院工学系研究科・助手	光エレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> 誘導ブリルアン散乱の局在発生技術による光ファイバ歪センシング技術の実証的研究 痛みの分かる材料・構造の実証研究 					
計 4名								

当初の研究目的 (交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。)

申請者らは、科研費「特別推進研究(01～03 年度)」を得て、独自技術「連続光波の相関特性の制御・合成技術;コヒーレンス関数の合成法」を活用し、光ファイバ中で生じる誘導ブリルアン散乱(歪を感じる)、偏波モード結合(側圧を感じる)、後方散乱・反射光(異常点を感じる)の分布を、従来技術を2桁凌ぐcmオーダの空間分解能と4桁も凌ぐ速度で測定でき、ランダムアクセス等ユニークな機能も具備した光ファイバ分布量センシング技術を開発した。本特別推進研究の事後評価では、A+のご判定を頂戴した。この研究過程で、これら技術の性能限界はさらに高く、その実現には性能制限要因の詳細な理論的評価が不可欠なことが分かった。新たなセンシング技術も考案し、基礎実験に成功して、応用開拓が可能なることも示した。

本研究では、これら技術の性能限界を明示する理論構築を行い、これに則って mm オーダ空間分解能、数 kHz サンプリング速度等の極限性能を実現する。同一光ファイバグレーティング歪センサの多重化技術や振動分布センシング等、最近考案した独自技術も深化させる。これらは、防災・安全管理等に向けて土木・建設・航空・宇宙等の広範な分野で近年重要視されている「痛みの分かる材料・構造」を実現する画期的な「光ファイバ神経網技術」として、世界的に注目され、複数の賞を受け、招待論文・講演の機会も多く頂いている。本研究では、本技術に強い関心を寄せている関連企業との連携により、上記の独自「光ファイバ神経網技術」を材料・構造に実装する技術開発も進め、高機能な「痛みの分かる材料・構造」を提供する。

第1サブテーマは「連続光波の相関制御法による光ファイバ神経網技術の極限性能の明確化と新システム・新機能の提案・実現:理論的研究と実証研究の同時展開」であり、第2サブテーマは「痛みの分かる材料・構造の実証研究:使える技術の提供」である。本申請は、我が国の独自技術を拡充し、21 世紀社会のキーワード「安全・安心」を実現するために、学術研究に裏打ちされた使える技術の提供を目指したものであり、また、申請者がリーダーを務める東大電気系の21 世紀 COE プログラムのキーテーマのひとつでもある。

これまでの研究経過

1. 本研究は、学術創成研究費の趣旨の3つの観点のうち、どの観点に主眼を置いて研究を行っているかについてお書きください。
2. 研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、研究組織内の連携状況を含め、具体的に記入してください。

本研究では、学術創成研究の趣旨の3つの観点のうち、「創造的・革新的・学際的学問領域を創成する研究」に主眼を置いて研究を進めている。「連続光波の相関制御法」という当グループの独自技術を中核にして、従来技術を遙かに凌ぐ性能・機能を有する創造的で革新的な技術を、理論的検討と実証実験とにより実現するとともに、土木建設や航空宇宙等のユーザ技術領域との融合研究も展開する。以下に、過去2年間の交付申請書に記載した研究計画に沿って、研究成果と経過を示す。

サブテーマ1:「連続光波の相関制御法による光ファイバ神経網技術」

[1-1] ブリルアン光相関領域解析法(BOCDA 法)の極限性能実現[保立・何で主に担当]

① BOCDA 基本システムの極限性能の実現: BOCDA 法は、被測定光ファイバ中を対向伝搬するポンプ光とプローブ光の相関を光源周波数変調により制御して、光ファイバに沿う1点(相関位置)でのみ誘導ブリルアン散乱を発生させる独自技術である。その位置を掃引することで、従来の光パルス法を数桁凌ぐ空間分解能と測定速度を有する歪分布センシングを実現してきた。本学術創成研究では、システム内での各種雑音要因の性質を盛り込んだシミュレーション手法の構築を進めた。まず、測定点以外の光ファイバ部分で発生するブリルアン散乱が雑音としてスペクトル上に拡散することによる性能劣化を把握するために、従来の周波数領域に代わり時間領域でのシミュレーション手法を開発した。これにより、空間分解能と測定可能な光ファイバ長(測定レンジ)との関連が評価できるようになった(項で詳述)。

平行して、実験系に新たな発明を加えた。誘導散乱発生に必要なブリルアン周波数シフト相当の周波数差をポンプ・プローブ光間に与える方法として、新たに単一側波帯光周波数変調法(SSB 変調)を導入した[14,41]。また、不要な反射光雑音を信号から完全に分離する新方法として、ロックイン検出を2段階で行う方法も発明した[14,41]。光源への周波数変調に同期して強度をも変調することで、相関位置以外で生じる誘導散乱スペクトルを平坦化でき、さらなる雑音低減が可能であることも見出した[18,43]。これらを統合した新システムを図1に示す[18]。これらにより、空間分解能と測定レンジ(繰り返し現れる相関ピーク間隔)の比率を約15倍改善できた。空間分解能28cmで1kmの測定レンジを達成した結果を図2に示す[18]。同システムにより、1.6mmの分解能で約6mの測定レンジも実現した。これら実験状況を上記シミュレーションにより検討し、性能向上の機構を把握した。これら技術の独創性と有用性については、 項で詳述する。土木建設分野からの要求(約10cmの分解能で500mの測定レンジ)や航空機分野からの要求(重要部分ではmmの空間分解能)をほぼ満たす実験データを得ることに既に成功している。ポンプ・プローブ光の相対的な偏波状態の変動によるデータゆらぎを除去する手法として、偏波ダイバーシティ法も提案して実現した[29]。

② BOCDA 簡素化システムの高機能化: 基本システムでは、ポンプ・プローブ光間の周波数差の形成にマイクロ波掃引発振器と光強度変調器が必要であり、価格低減を阻害する。そこで半導体レーザ光源の直接周波数変調特性を使い、11GHzの周波数差を有するポンプ光とプローブ光を精緻に時分割発生させる手法を考案してきた。本研究では、分解能、測定レンジ、測定速度、歪精度を改善する。まず、ポンプ・プローブ時分割発生法での測定レンジ拡大を図った[30]。BOCDA法では相関位置は光ファイバに沿って繰り返し現れるので、基本系では測定レンジは相関ピーク間隔より広くできない。これを解決する方法として、相関

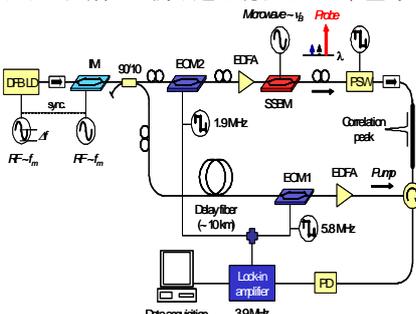


図1 SSB変調・ビートロックイン・光強度変調を導入したBOCDA系[18]

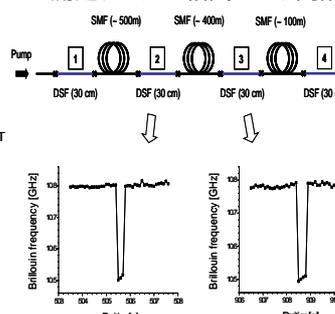


図2 空間分解能28cmと測定レンジ1010mの実現[43]

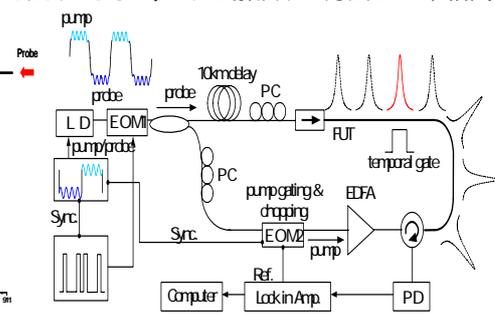


図3 ポンプ・プローブ時分割発生法と時間ゲート法による測定レンジ延伸BOCDA簡素化系[30]

これまでの研究経過 つづき

ピーク間隔相当の比較的長い光パルスを併用し、受光器出力も時間ゲートでタイミングを取って取得する方法(時間ゲート法)を考案・融合させた[30]。この結果、空間分解能 8cm で測定レンジ 250m を達成した。本実験では、基本測定レンジ(相関ピーク間隔)は 20m であり、高分解能を保ったままでレンジを約 12 倍に拡大できた。図 3 に本システム構成を、図 4 に測定レンジの拡大結果を示す[30]。本システムには、今後、述べた基本測定レンジの延伸法も融合させる計画である。

[1-2] 同一波長ファイバグレーティング多重化技術[保立・山下・何]: デルタ関数形状の光波コヒーレンス関数を合成して、複数の同一波長 FBG(反射率%)による反射光の中からひとつのみを選択し、そのスペクトル中心を測定して歪情報を得る独自の干渉計構成による FBG 多重化技術を考案・検討してきた。本学術創成研究では、駆動速度向上、測定レンジ拡大等を進めている。高速測定時には、FBG 反射スペクトル形状を測定するための光源中心周波数掃引が高速となり、合成されるコヒーレンス関数形状が変形することを見出した。この現象を解析して、その解決法を発明した。測定されるヘテロダインビート周波数を被測定 FBG ごとに最適化する適応型方式である[36]。この方式を実装したシステムにより、測定速度を 100 倍高めて 10kHz サンプリングを実現した。図 5 がシステム構成、図 6 が 10kHz サンプリングによる多点・動的歪センシングである[36]。また、可干渉長を超える長尺ファイバに沿って配置された複数の FBG からの反射光でもコヒーレンス関数の合成法によってひとつを選択抽出できる方法を発明した[36]。これで、1km にわたって分散配置した複数の FBG による多点・動的歪センシングにも成功した(項で詳述)。

[1-3] 光ファイバ神経網技術のバリエーション拡大[保立・山下・何]: 光加入系系用遠方監視リフレクトメトリでは、光源の可干渉長を超える遠方からの反射光分布も光波コヒーレンス関数の合成法(SOCF 法)によって分布測定できることを理論的に見出し、また実験的にも実証した[28,32]。図 7 が実証実験結果である[28]。この知見が上述の FBG センサの測定レンジ拡大法の考案にも繋がった。さらに、SOCF 法において光源中心周波数を変化させつつ平均操作を実施することで、本リフレクトメトリでの反射率測定精度を格段に向上させる方法も発明・実証した[3,16]。励起された偏波維持エルビウムドープ光ファイバ(EDF ファイバ)の一方の偏波モードにて対向伝搬する 2 光波が作る定在波により、利得飽和現象を介して利得グレーティングが形成される。本研究では、このグレーティングの反射スペクトルを直交偏波で測定することにより歪や温度の分布センシングを実現する新技術も提案・実証した[5,13,44]。偏波維持光ファイバの直行 2 偏波モード間の伝搬定数差の歪・温度依存性がセンシング原理であり、コヒーレンス関数の合成法によって利得グレーティングの形成位置を局在・掃引できることが分布センシングの原理である。図 8 に、光ファイバに沿う局在ダイナミックグレーティングからの反射スペクトルの分布(歪の分布)測定結果を示す[44]。この他、偏波維持光ファイバの直行偏波モード間の側圧による結合と、コヒーレンス関数の合成によるその結合発生位置の同定機能を利用した側圧分布センシングシステムの簡素化にも成功し[17,38]、シンプルな振動分布センシングである独自の 2 モード光ファイバ方式では多重反射雑音を低減し、光ファイバレーザ中に FBG を組み込んだ能動型構成の性能も向上させ[2,4]、BOCDA 法における温度と歪の分離測定技術、低コヒーレンス干渉計による高空間分解能 BOCDA 技術も、提案・研究した。

[1-4] 光ファイバ構造提案・機能解析[保立・何・岸]: コア・クラッド屈折率差の比較的大きな光ファイバ中で生じる高次音響波モードによる高次ブリルアン散乱スペクトルと基底スペクトルの温度・歪依存性の違いを増大し、両スペクトルピークを測定して温度と歪を分離測定する研究を進めている。まず、音響波モードと光波モードを総合して 2 次元的に解析するシミュレーション手法を構築した。図 9 が本手法により偏波維持光ファイバのブリルアン散乱スペクトルをシミュレーションした結果である。同図には、実測結果も示した。両者は、良い一致を示している。温度・歪を高精度に分離検出するための光ファイバ構造を探索している。

サブテーマ 2:「痛みの分かる材料・構造の実証研究」[保立・何・岸]

[2-1] 高機能な痛みの分かる材料・構造の実現: 土木・建設会社との共同実験において、実物大のトンネル構造モデルに BOCDA システムを適用して、荷重時の歪分布センシングに成功した[37]。また、秋葉原の新開発地区にある最新構造の歩道橋に光ファイバを設置して BOCDA 系により歩道橋の振動状態等を計測することに成功し、複数の新聞に取り上げられた。航空機用複合材料に痛みの分かる機能を付与するために BOCDA 法を適用する共同研究も開始されている他、さらに他の企業との共同研究も計画している。

これら研究成果により、本研究開始以降の 2 年間で、研究代表者は電子情報通信学会のフェローになり、また、院生が合計 4 つの学会学術奨励賞を受けた。また、本研究に関して、12 件の国際会議招待講演を行っている[21,23,24,26,33-35,38,など]。

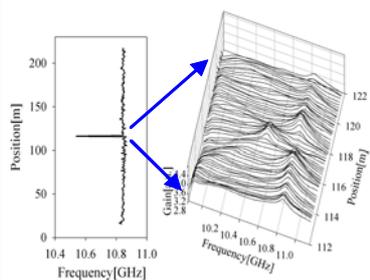


図4 空間分解能 8cm と測定レンジ 250m の実現[30]

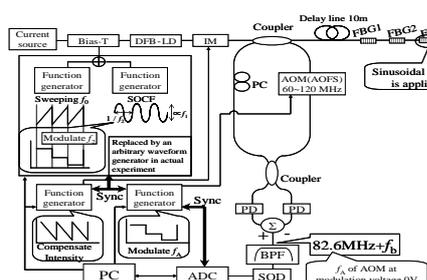


図5 ヘテロダイン周波数適応制御による高速同一波長 FBG センサ多重化系[36]

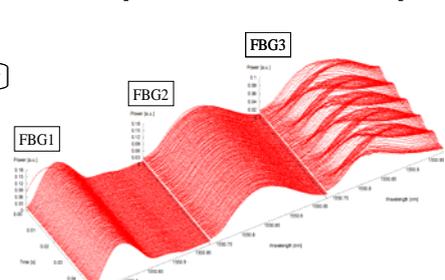


図6 10kHz サンプリングによる動的・多点 FBG 歪センシング

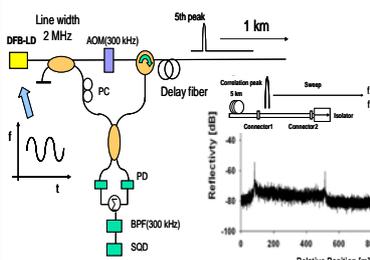


図7 超可干渉長領域での SOCF 法によるリフレクトメトリ[28]

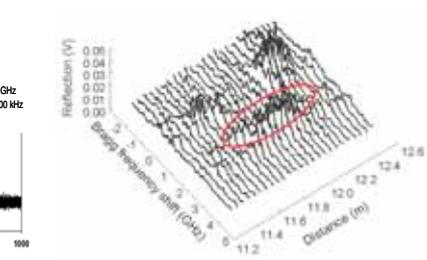


図8 偏波維持 EDF ダイナミックグレーティングの位置選択発生による分布型歪計測 [44]

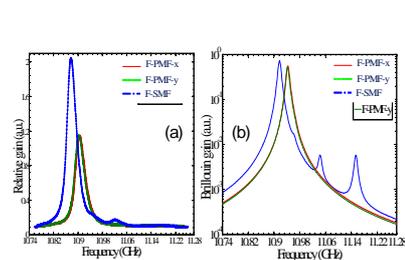


図9 2次元有限要素法によるブリルアン散乱スペクトル(b): (a)は実験結果

特記事項

これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入するとともに、推薦者の期待がどの程度達成されつつあるかについて記入してください。

項目で記載したように、本研究開始以来、多くの新たな成果をあげることができた。ここでは、その主な成果について詳述する。理論的検討と実験的検討を平行して進めるという研究手法により、これら成果は得られている。

BOCDA法の基本系では光源の周波数を正弦波で変調し、被測定光ファイバ中を対向伝搬させているポンプ・プローブ両光の相関を制御する。相関位置では約30MHz幅の本来のブリルアン散乱スペクトルが得られるのに対して、その他の位置では周波数軸上に広がったスペクトルとなる(図10)。光ファイバの一端からこれら全部のスペクトルを測定しても相関位置におけるブリルアンピーク周波数が分り、この位置での歪が検知される(図10右)。測定位置の掃引には変調周波数を変えればよい。ここで、相関位置は光ファイバ上に繰り返し現れるので、基本系では相関位置間隔が測定レンジとなる。測定レンジと空間分解能の比は変調周波数に反比例し、変調振幅に比例する。そこで、変調周波数を下げて測定レンジを広げ、変調振幅を拡大して空間分解能を高く維持したい。しかし、変調振幅を拡大すると、これまでマイクロ波光強度変調による下側帯波として生成してきたプローブ光と元の周波数であるポンプ光の後方反射・レイリー散乱成分が光周波数軸上で重なる。さらに、光強度変調の上側帯波も重なる。従来は、これら不要成分は光フィルタにより除去してきたが、光周波数軸での重なりが起きると光フィルタは機能しない。

そこで、空間分解能を高く維持しつつ測定レンジを拡大する方法として、図1に図示した複数の方法を発明した[43]。単一側帯光変調器の導入により上側帯波を大幅に減少させた。また、光フィルタは用いないこととし、それでもポンプ光の反射・後方散乱成分を信号成分(プローブ光が誘導ブリルアン散乱により増幅された成分)から分離できる新たな方法として、ポンプ光およびプローブ光の双方に異なる周波数で強度変調を与え、この2つの周波数にて2段階の同期検波を行う手法(ダブルロックイン法)と差周波数にて同期検波を行う手法(ビートロックイン法)を発明し[14,41]、特許も申請した。これらによって、測定レンジ・空間分解能比は拡大できるが、相関位置で形成される本来のブリルアン散乱スペクトルに対して非相関位置で生じ光周波数軸上に広がった雑音スペクトル(図10右の富士山形状)が相対的に大きくなり、問題となる。これを解決するために発明したのが光強度変調法である。光周波数変調に同期して強度も変調し(図1)時間平均スペクトル形状を合成する[18,43]。図11は、新たに開発した時間領域シミュレーション法によって強度変調の効果求めた結果である[18]。時間平均スペクトルの中心で大きく、両端でも少し大きい強度があるように変調波形を合成することで、富士山形状の不要スペクトルが平坦化され、測定位置に加わる歪量が変化しても、不要スペクトルより高いピークスペクトルが見取れ、測定位置のブリルアン周波数シフトが判読できることが分る。図2に示した実験において強度変調を導入して合成された光源時間平均スペクトルを図12に示す[18]。このとき、図13に示したように、実験的にも不要スペクトルの頂上が平坦化されたことが示された。本技術も特許を申請した。

以上の発明により、測定レンジ・分解能比は、これまでの250程度から3,500へと格段に向上した。周波数変調振幅を保ったままでその速度を上げると、測定レンジ・分解能比を保ったままで空間分解能を向上できる。図14は、1.6mmの空間分解能を実現して、光ファイバの3mmの部分を引き張った際の歪分布を測定した結果である。接着剤の変形により歪が分布しているのが測定できている。このように、最近の独創的な研究により、BOCDA法の性能が格段に向上している。

BOCDA法の基礎となり、その他の分布測定法の原理でもある光波コヒーレンス関数の合成法は、干渉現象を利用したもので、原理的には光源の可干渉長以下の光路差の範囲からの反射光にしか適用できない。しかし、周波数変調速度、受光器出力信号帯域、干渉計のヘテロダイン周波数等の関係を最適化することで、可干渉長を越えた領域からの反射光に対しても分布計測できることを明らかにした[28,32]。上記各パラメータの関係解析するとともに、シミュレーションによって原理の確認ならびにダイナミックレンジの評価等を行った。図7の実験結果は、これら理論的検討の後に得たものある[28]。本原理は、同一波長FBGの多重化技術にも適用されて、可干渉長を超える1kmから2km遠方に配置された複数のFBGを多点・動的に測定することに成功した。結果を図15に示す。

本研究では、このように理論ならびに実験的検討を平行して進めている。このような手法により、極限性能の把握と実現を図ってきた。上記の他に、同一FBG多重化技術、EDFダイナミックグレーティングによる歪分布センシング、温度・歪同時検出でも、理論的検討を深め、その結果を実験的に検証している。以上のように、推薦者の期待に叶う成果が得られていると考えている。

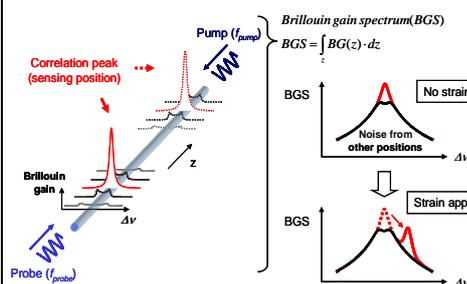


図10 光ファイバ各部での誘導ブリルアン散乱スペクトルと測定スペクトル(右)

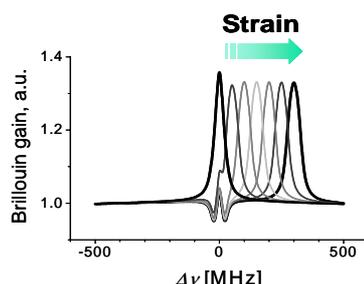


図11 強度変調による非相関位置での不要スペクトルの低減(理論)[18]

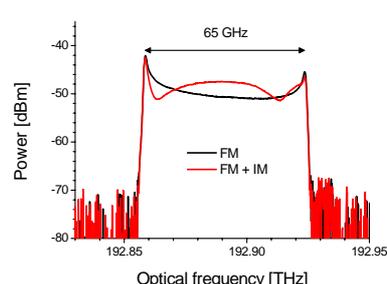


図12 強度変調による光源時間平均スペクトル(実験:強度変調有/無)[18]

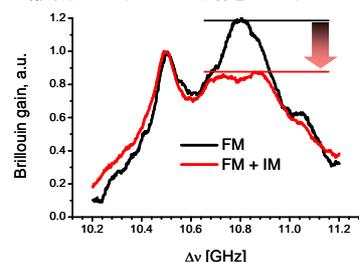


図13 非相関位置での不要ブリルアン散乱スペクトルの強度変調法による抑圧(実験結果)[18]

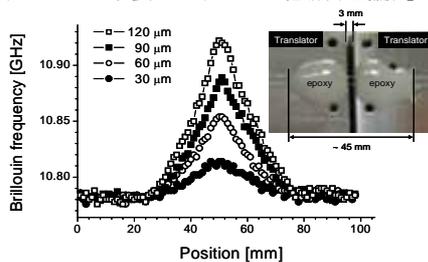


図14 空間分解能1.6mmでの歪分布測定結果

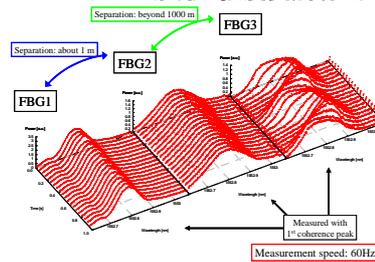


図15 可干渉長を超える遠方に配置された複数のFBGの多点・動的測定結果

研究成果の発表状況

この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限ります。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）、最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について、2頁以内に記入してください。

[論文]

1. M. Kashiwagi and K. Hotate, "Elongation of measurement range by successively shifting measurement window in a high spatial resolution reflectometry for optical subscriber networks by synthesis of optical coherence function," *Measurement Science and Tec.*, **15**(8), 1512-1518 (2004).
2. S. Yamashita and A. Inaba, "FBG laser sensor with intracavity dispersive fiber based on mode-locking frequency interrogation," *Measurement Science and Technology*, **15**(9), 1536-1538 (2004).
3. Z. He, S. Yoshiyama, M. Enyama and K. Hotate, "High-reflectance-resolution optical reflectometry by synthesis of optical coherence function," *Jpn. J. of Appl. Physics*, **44**(3A), L117 - L119, (2004).
4. S. Yamashita, T. Baba and K. Kashiwagi, "Frequency-shifted multiwavelength FBG laser sensor," *Japanese Journal of Applied Physics*, **43**(12), 8322-8324 (2004).
5. X. Fan, Z. He and K. Hotate, "A novel distributed fiber-optic strain sensor by localizing dynamic grating in polarization maintaining Erbium-doped fiber: Proposal and theoretical analysis," *Jpn. J. of Appl. Physics*, **44**(2), 1101-1106 (2005).
6. M. Enyama, Z. He, and K. Hotate, "Expansion of spatial measurement range by use of vernier effect in multiplexed fibre Bragg grating strain sensor with synthesis of optical coherence function," *Measurement Science and Tech.*, **16**(4), 977-983 (2005).
7. Y. Nasu and S. Yamashita, "Densification of sampled fiber Bragg gratings using multiple-phase-shift (MPS) technique," *IEEE/OSA J. of Lightwave Tech.*, **23**(4), 1808- 1817 (2005).
8. S. Yamashita, Y. Inoue, K. Hsu, T. Kotake, H. Yaguchi, D. Tanaka, M. Jablonski, S. Y. Set, "5GHz pulsed fiber Fabry-Perot laser mode-locked using carbon nanotubes," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **17**(4), 750-752 (2005).
9. K. Hotate and T. Yamauchi, "Fiber-optic distributed strain sensing system by Brillouin optical correlation domain analysis with a simple and accurate time-division pump-probe generation scheme," *Jpn. J. of Appl. Physics*, vol.44, no.32, pp.L1030-L1033, 2005.
10. X. Fan, Z. He, Y. Mizuno and K. Hotate, "Bandwidth-adjustable dynamic grating in Erbium-doped fiber by synthesis of optical coherence function," *Optics Express*, **13**(15), 5756-5761 (2005).
11. S. Yamashita and M. Yokooji, "Tuning of channel spacing in sampled fiber gratings by heat-induced multiple-phase-shift (MPS) technique," *Jpn. J. of Appl. Physics*, **44**(8), 6047-6051 (2005).
12. 保立和夫, "コヒーレンス関数の合成による高空間分解能分布型光ファイバセンサ" *レーザー研究*, **33**(9), 571-576 (2005).
13. X. Fan, Z. He, and K. Hotate, "Novel strain- and temperature-sensing mechanism based on dynamic grating in polarization-maintaining Erbium-doped fiber," *Optics Express*, **14**(2), 556-561 (2006).
14. K.-Y. Song and K. Hotate, "Enlargement of measurement range in a correlation-based Brillouin sensing system using double lock-in amplifiers and a single-sideband modulator," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **18**(3), 499-501 (2006).
15. K. Hotate and Z. He, "Synthesis of optical coherence function and its applications in distributed and multiplexed optical sensing," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, **24**(6), (2006), in press <Invited>.
16. Z. He, T. Tomizawa and K. Hotate, "High-speed high-reflectance-resolution reflectometry by synthesis of optical coherence function," *IEICE Electronics Express*, **3**(6), (2006), in press.
17. K. Hotate, K. Makino, Z. He, M. Ishikawa and Y. Yoshikuni, "High spatial resolution fiber optic distributed lateral stress sensing by stepwise frequency modulation of an super structure grating distributed Bragg reflector laser diode," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, **24**(6), (2006), in press.
18. K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate, "Optimization of Brillouin optical correlation domain analysis system based on intensity modulation scheme," *Optics Express*, (2006), in press.
19. K. Hotate, "Fiber Sensor Technology Today," *Jpn. J. of Appl. Physics*, special Issue for Microoptics, (2006), in press.

[国際会議発表論文]

20. T. Yamauchi and K. Hotate, "Distributed and dynamic strain measurement by BOCDA with time-division pump-probe generation scheme," the 2004 CLEO/IQEC conference, San Francisco, CWA57 (2004).
21. K. Hotate, "Trends and prospects for optical distributed sensing - Fiber-optic nerve systems for smart materials and smart-structures -," SPIE vol.5502, Second European Workshop on Optical Fiber Sensors, Santander, 51-58, (2004) <Invited>.
22. D. T. Kien and S. Yamashita, "Spectral broadening and densification of sampled FBGs by interleaving and multiple phase shift methods," Optical Electronics and Communications Conf., 15F3-3, (2004).
23. K. Hotate, "Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures," SPIE Optics East 2004, Philadelphia, 5604-1, 1-10, (2004) <Invited>.

研究成果の発表状況

24. M. Enyama and K. Hotate, "Dynamic and random-access strain measurement by fiber Bragg gratings with synthesis of optical coherence function," SPIE Optics East 2004, Philadelphia, vol.5589, 144-153 (2004) <Invited>.
25. T. Yamauchi and K. Hotate, "Performance evaluation of Brillouin optical correlation domain analysis for fiber optic distributed strain sensing by numerical simulation," SPIE Optics East 2004, Philadelphia, vol.5589, 164-174, (2004).
26. K. Hotate, "Fiber optic nerve systems with optical correlation domain technique for smart structures and smart materials," North American Euro-Pacific Workshop on Sensing Issue in Civil Structural Health Monitoring, Hawaii, (2004) <Invited>.
27. K. Hotate, "Correlation-based continuous-wave technique for optical fiber distributed strain measurement using Brillouin scattering," 17th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS-17), Bruges, Tu-1, 62-67 (2005) <Invited>.
28. M. Kashiwagi and K. Hotate, "Long range and high resolution reflectometry by synthesis of optical coherence function at region beyond the coherence length," 17th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Bruges, P1-63, 539-542 (2005).
29. K. Hotate and K. Abe, "BOCDA fiber optic distributed strain sensing system with a polarization diversity scheme for enlargement of measurement range," 17th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Bruges, P1-76, 591-594 (2005).
30. K. Hotate and H. Arai, "Enlargement of measurement range of simplified BOCDA fiber-optic distributed strain sensing system using a temporal gating schem," 17th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, Bruges, Th-1, 184-18 (2005).
31. M. Yokooji and S. Yamashita, "Channel spacing-tunable sampled FBG based on tunable chirp and its application to multiwavelength fiber laser," Optical Electronics and Communications Conf. (OECC'2005), 8D1-2 (2005).
32. M. Kashiwagi and K. Hotate, "Improvement of Dynamic Range in Reflectometry by Synthesis of Optical Coherence Function at Region beyond the Coherence Length," IQEC/CLEO-PR 2005, Tokyo, CFK2-2, 1584-1585 (2005).
33. K. Hotate, "Materials that feel pain – distributed strain sensing by optical fibers embedded in structures and materials," IEEE/LEOS Intern. Conf. on Optical MEMs and Their Applications, Oul, PLE2, 5-6 (2005) <Invited>.
34. K. Hotate, "Distributed and multiplexed fiber optic sensors and their applications to smart structures and smart materials," the 2005 Optical Amplifiers and Their Applications Meeting, Budapest, TuA4 (2005) <Invited>.
35. Z. He and K. Hotate, "Distributed photonic sensing with synthesized optical coherence function," SPIE International Congress on Optics and Optoelectronics, vol.5952, 147-161, Warsaw (2005) <Invited>.
36. Z. He, T. Hayashi and K. Hotate, "High-speed interrogation of multiplexed fiber Bragg grating sensors with similar Bragg wavelength by synthesis of optical coherence function," Proc. SPIE Fiber Optic Sensor Technology and Applications IV, vol.6004, 65-73, Boston (2005).
37. M. Imai, S. Miura and K. Hotate, "Health monitoring of a full scale tunnel model using BOCDA-based fiber-optic distributed sensor," Intern. Conf. on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, 385-391, Shenzhen (2005).
38. Z. He, S. Horie, K. Hotate, M. Ishikawa, and Y. Yoshikuni, "Unification of input and output ends in polarization-maintaining optical fiber stress sensor by synthesis of optical coherence function," Proc. SPIE Intern. Symp. on Optomechatronic Tech. (ISOT 2005), vol.6049, 25-36, Sapporo (2005) <Invited>.
39. M. Asano and S. Yamashita, "Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser using dispersion tuning," SPIE Photonics West, 6102-43 (2006).
40. X. Fan, Z. He, and K. Hotate, "A novel strain- and temperature-sensing mechanism based on dynamic grating in polarization-maintaining Erbium-doped fiber," 2006 OFC/NFOEC Meeting, Anaheim, OTuL2 (2006).
41. K.-Y. Song and K. Hotate, "Enlargement of measurement range in a Brillouin optical correlation domain analysis system using double lock-in amplifiers and a single-sideband modulator," 2006 OFC/NFOEC Meeting, Anaheim, OThA6 (2006).
42. S. Yamashita, Y.-W. Song, S. Y. Set, and K. Hsu, "Ultrashort-cavity passively mode-locked fiber lasers using carbon nanotubes," Conf. on Optical Fiber Communications (OFC2006), OThQ2 (2006) <invited>.
43. K.-Y. Song, Z. He and K. Hotate, "Brillouin optical correlation domain analysis system with kilometer measurement range based on intensity modulation scheme," CLEO/QELS 2006, Long Beach, CThL4 (2006) to be presented.
44. X. Fan, Z. He, and K. Hotate, "A novel distributed strain sensor based on dynamic grating in polarization-maintaining erbium-doped fiber," CLEO/QELS 2006, Long Beach, CThL3 (2006) to be presented.
45. M. Asano, S. Yamashita, and K. Hsu, "Widely and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser at 1.55 μ m region using intracavity dispersion," Conf. on Lasers and Electro Optics (CLEO 2006), CWD3 (2006) to be presented.