

審査の結果の要旨

氏名 山下 健二 ホドリーゴ

本論文は、"Research on the Spatial Resolution in Optical Correlation Domain Distributed Measurement of Brillouin Dynamic Grating along Optical Fibers (光相関領域法による光ファイバ中のブリルアンダイナミックグレーティングの分布測定における空間分解能に関する研究)"と題し、英文で書かれていて、7章よりなる。近年、光ファイバをビルやトンネルの内壁あるいは飛行機の翼などに埋め込むことで、建造物の経年劣化や地震による損傷を診断する技術に注目が集まっている。本技術は、建造物や材料に人間のような神経機能を持たせるものであり、「光ファイバ神経網」と呼ばれている。本論文では、光ファイバ神経網として重要な機能である温度と歪の同時・分離・分布測定を実現するために活用する光ファイバ中のブリルアンダイナミックグレーティングに関する研究であり、本グレーティングを分布測定する際の空間分解能の制限要因をシミュレーションと実験により明らかにしてその向上手法を提案・実証するとともに、関連する性能制限要因についての挙動把握とその対策についても論じたものである。

第一章は「序論」であり、本研究の背景や関連する先行研究の原理ならびに達成機能について歴史を追って述べている。また、光ファイバ中の温度や歪の分布を測定する原理であるブリルアン散乱について述べ、その分布測定法が時間領域法と相関領域法に大別され、本研究では所属研究室の独自技術である後者の手法を活用すること、そして温度と歪の分離測定原理となる光ファイバ中のブリルアンダイナミックグレーティングについて概説している。最後に、本論文の各章の構成と関連について記述されている。

第二章は「ブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA 法) とブリルアンダイナミックグレーティング (BDG) の原理」である。まず、BOCDA 法では、光ファイバにブリルアン周波数シフト相当の周波数差を有するポンプ光とプローブ光を対向伝搬させつつ光源の周波数を正弦波で変調することで、光ファイバに沿う一点でのみ誘導ブリルアン散乱を位置選択的に発生できることを述べている。つづいて、偏波維持光ファイバの一方の偏波軸に平行な偏波のポンプ光とプローブ光によって誘導散乱を起こしたときに強められているブリルアン散乱に付随する超音波回折格子によって、もう一方の偏波軸に平行な偏波もブラッグ反射を受けることが述べられている。ブリルアン散乱に付随する超音波回折格子は、ブリルアンダイナミックグレーティングと呼ばれる。本グレーティングのブラッグ反射周波数の温度と歪への依存性とブリルアン周波数シフトのそれらへの依存性の相違から、温度と歪の分離・分布測定が可能となることも示される。最後に、これまでの温度と歪の分離・分布測定での達成性能に触れ、ブリルアンダイナミックグレーティングの分布測定での空間分解能がブリルアン散乱スペクトルの分布測定でのそれに及ばないことが述べられる。

第三章は「光相関領域解析法で局在発生された BDG の理論解析」と題している。まず、光源が周波数変調された際のブリルアンゲインスペクトルの様子ならびにそれに付随するブリルアンダイナミックグレーティングによる反射スペクトルの様子を計算するシミュレーション手法の構築とそこに計算結果について述べられる。その結果、BDG の分布測定における空間分解能が光相関領域法による誘導ブリルアン散乱の分布測定での空間分解能より悪くなる理由は、光源の周波数変調による位置選択測定特性において測定位置の前後にサイドローブが形成され、これも本ダイナミックグレーティングの形成に寄与しているためであることを突き止めた。このシミュレーション結果より、BDG の分布測定における空間分解能の向上手法として、上記サイドローブの抑圧技術が有効活用できるとの見通しが得られることとなる。

第四章は「強度変調による空間分解能の向上」である。上記のサイドローブの抑圧には、光源の

時間平均スペクトルの端部をなだらかにすることが有効である。そこで、周波数変調に同期した強度変調を施すことにより、端部がなだらかな時間平均スペクトルを実現する手法を導入した BOCDA 法に基づく BDG の分布測定システムを提案・構築した。偏波維持光ファイバの一部を冷水に浸して温度を下げ、この部分に測定位置を設定して、構築した BOCDA システムにより BDG 反射スペクトラムを測定した。ここで、冷水に浸すファイバの長さを変化させつつスペクトル測定を行ったところ、温度の低い光ファイバに対応した BDG 反射ピークと温度の高い光ファイバに対応したその強度は、冷水に浸したファイバ長が長いときは前者が、短いときは後者がより大きくなることを確認し、両者が一致するファイバ長を空間分解能の指標とできることを述べている。本実験を強度変調を行った場合と行わない場合とで実施し、強度変調により空間分解能が 4.5 倍向上したことを確認し、本手法が空間分解能の向上のために有効であることが実証された。つづいて、ブリルアン散乱スペクトルと BDG スペクトルの分布測定を行い、歪を印加した部分での変化を分布的に測定した。強度変調を行わないときの空間分解能よりも短い歪印加部分を明瞭に識別できる結果を得ることができた。

第五章は「BDG-BOCDA システムの性能向上」である。ブリルアンダイナミックグレーティングを BOCDA 法によって分布測定するシステムにおいて、各デバイスの接続点からの反射や偏波分離デバイスでの有限な偏波消光比のために、測定される BDG スペクトルには背景雑音が混入する。これを低減する手法として、誘導ブリルアン散乱を起こすためのポンプ光と BDG 反射スペクトルを読むためのリード光の両方に異なる周波数で強度変調を施し、両周波数の差周波数で同期検波する手法を提案して、背景雑音の低減を実証した。また、BDG スペクトルの取得には、リード光にもポンプ光・プローブ光に同期した周波数変調を施す必要がある。本研究で構築した実験系では光源はひとつであり、これに加えた周波数変調がポンプ光、プローブ光、リード光の全てに共通して掛かっている。したがって、周波数変調の変調周波数と変調振幅は完全に一致させ得て、優れた安定性が実現できる。しかし一方で、リード光とポンプ光との間に測定点における変調位相に差が生じると問題が起こる可能性がある。そこで、本研究では、ポンプ光部の光ファイバ長を 10cm 程度ずつ変化させて本位相差を変えつつ BDG スペクトルを測定して、位相差の影響を調べた。その結果、位相差が大きくなると BDG スペクトルの幅が広がり、さらに大きくなるとスペクトル先端部分が 2 つに分れる現象を確認した。これは、BDG 反射スペクトルのピーク周波数の読み取り精度を劣化させ、温度と歪の測定精度の劣化を招く。500m 程度の測定ファイバ長の場合には問題は無いが、長い測定ファイバが必要となる応用では、位相差の影響を補償する工夫が必要である。

第六章は「光相関領域法の最適化」である。BOCDA 法の測定レンジは、基本的には周期的に現れる相関ピーク（測定点）の間隔で決められ、典型的には数 10m である。これを延伸する技術として、この間隔に等しい光パルスを用いる技術であるテンポラルゲート法が提案されてきた。本研究では、相関ピーク形成用の光源周波数の正弦波変調とテンポラルゲート形成用の強度変調の関係を検討した。その結果、両変調波形の位相差が π のとき、最適な出力スペクトルが得られることが分かった。

第七章は「結論」であり、本論文の総括を述べ、残された課題と今後の展望について述べている。

以上、本論文は、ブリルアン光相関領域解析法によりブリルアンダイナミックグレーティングを分布測定する際に問題であった空間分解能劣化の原因が、相関領域法により位置選択的に形成される測定点の前後に生じるサイドローブの影響であることをシミュレーションによって見出し、その対策として光源に施す周波数変調に同期した強度変調が有効であることを実証して 4.5 倍の空間分解能の改善を達成するとともに、本システム中で生じる不要反射光等の影響の低減手法の提案・実証等の性能向上策の検討を行い、加えて光相関領域解析法自体の性能向上策も提案したものであって、電子工学への貢献が少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。