

光計測技術を用いた炭素繊維複合材料の非破壊検査技術の開発

廣川 勝久, 竹保 義博

Fast FBG-Sensor System using DFB-LD Light Source

HIROKAWA Katsuhisa and TAKEYASU Yoshihiro

A noble optical fiber system using a DFB-LD light source and a fiber-Bragg-grating (FBG) sensor is proposed. The system can high-speedily measure a strain caused inside of carbon fiber reinforcement plastics (CFRP). Spectrum shift by the FBG sensor embedded in a loaded CFRP is detected in terms of the intensity modulation transmitting to the sensor. The present system can measure both of the static strain and the dynamic strain is experimentally demonstrated. We verify the dynamic strain can be detected with frequency range from 200 Hz to 10 kHz.

FBG センサを使った炭素繊維複合材料の内部ひずみ計測を高速に行うシステムを開発した。高速化のために、FBG センサの反射波長幅より狭い発光波長幅を持つDWDM 用DFB-LD レーザを用いて強度変調によってひずみを計測する方法を確立した。このシステムにより CFRP の静的なひずみと動的なひずみが同じシステムで測定可能であることを示した。また、動的ひずみの測定は最大 10kHz の振動周波数まで測定可能であることを確認した。

キーワード：ファイバセンサ、光ファイバ、ブラッググレーティング、FBG、炭素繊維複合材料、CFRP

1. 緒 言

ガソリン価格の高騰や、限りある石油を有効に使うために、航空機や自動車では、燃費を向上させることが要求されている。燃費向上のためには、内燃機関のエネルギー効率の向上も必要であるが、それに加えて、ボディー自体も軽量化しなければならない。現在、ボディー軽量化のために、カーボンファイバを使った軽量で高強度の複合材料 (CFRP) の開発が急ピッチに進められている。この複合材料の破壊は、力を受けた時に生ずる材料内部の非常に小さな層間剥離やクラックに起因して引き起こされる。光ファイバセンサは、この破壊を引き起こす内部ひずみを直接計測するための唯一の方法であり、CFRP の力学特性を評価する研究開発や品質保証には欠かせない。この光ファイバセンサには、ファイバ内部にブラッグ回折格子を持った FBG (fiber-Bragg-grating) センサがもっとも多く使われている。しかし、従来の FBG センサを使った計測装置では、広帯域光源を用いて 100nm 程度の波長範囲を数 pm の分解能で分光する必要がある、波長走査による分光計測速度は数 Hz 程度と遅く、急速なひずみ量の変化を計測することは不可能である。

そのため、本稿では、CFRP の衝撃実験などに利用することを

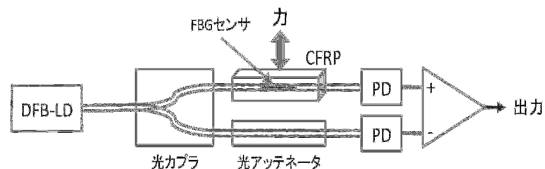


図 1 高速 FBG センサシステム

目的とした高速 FBG センサ計測システムの開発について報告する。特に、WDM (wavelength division multiplexing) 用に開発され狭帯域な波長半値全幅をもつ DFB-LD 光源を用いて計測の高速化を図った。

2. 高速計測システム

FBG センサによるひずみ計測を高速化する方法として、図 1 に示す WDM 用光通信デバイスを応用した計測システムを提案する。このシステムでは、従来の広帯域光源から単色光源の DFB-LD (distributed-feedback laser diode) に変更し、FBG センサを透過する光の波長分布では無く、強度変化を計測することにより、FBG センサ部分のひず

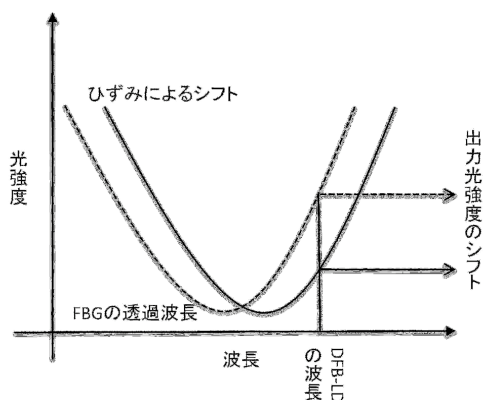


図2 ひずみ検出の原理

サの反射波長のスロープ部分に狭い発振波長を持つ

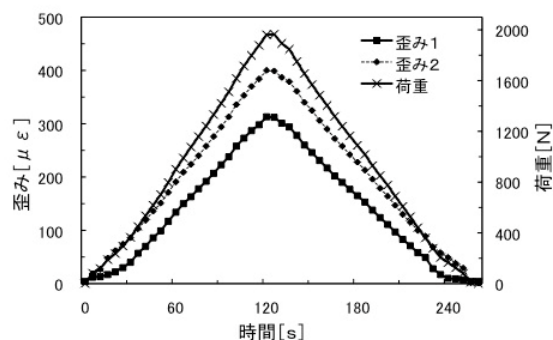


図4 CFRP 板材への荷重とひずみ

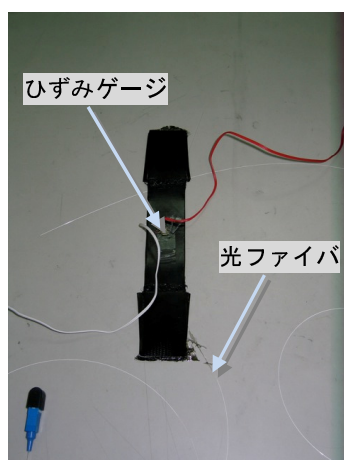


図3 FBG センサを埋めたCFRP

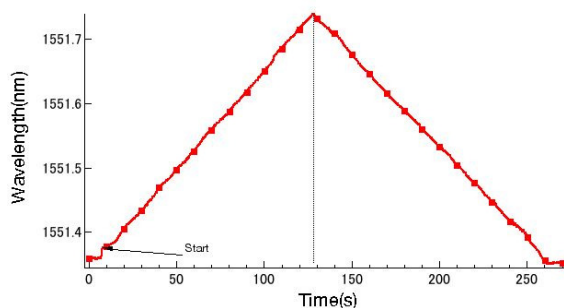


図5 FBG センサによるひずみ

み測定を行う。強度変化のみを測定するために、波長走査を行わない高速な測定が可能となる。また、PD (Photodiode)には、光通信用に開発された高速なデバイスを用いた。このような光通信用のLDやPDを用いることにより、安価で高速なシステム構成を可能とする。FBG センサを透過する光は、直流成分にひずみの変化分が加わった光強度変調として計測される。計測に必要なひずみに対する成分のみを測定するために、光カップラにより、LDからの光を2分割して参照光として用いている。CFRPに力を加える前に、FBG センサを透過する光強度と光アッテネータを透過する光強度を同じに合わせた平衡受光回路を構成した。平衡受光回路では、FBG センサを透過する光強度から光アッテネータを透過する光の強度を差し引くことにより、FBG センサを透過する光の変動分のみを検出することができる。変動成分がひずみに対応するため、変動成分のみを増幅することによって、より高精度なひずみ計測が可能となる。また、この方法は、LDのノイズなどによる強度変化も同時にキャンセルすることが可能である。このシステムのDFB-LDとFBGセンサの波長の関係を図2に示す。DFB-LDの発光波長はDWDM用に開発された狭帯域な波長半値全幅を持つ。このFBGセン

DFB-LDが入射するように、LDの温度と発光強度をあらかじめ調整する。このような条件下で、光ファイバがひずみを受けると、FBGの反射波長は長波長にシフトするため、図2に示すような反射光強度の変化が起きる。この場合、FBG センサは、ひずみが生じた場合にも、反射波長のスロープ部分内にDFB-LDの発光波長があるためには、FBG センサ波長幅はDFB-LDの発光波長幅に対してある程度の大きな幅を必要とする。

3. 実験と結果

実験では、FBG センサを16層からなるCFRP板材の中心8層と9層の間に繊維方向と同方向に埋めた。CFRP板材は、16層を一方向に積層した後、オープン成形により製作した。この時の繊維方向は、板材の長軸方向と同じ方向に配置した。図3にFBG センサを埋めたCFRPの板材の図を示す。板材には、引張試験を行う時にチャックに挟むことができるように上下に板を接着し厚みを増している。また、FBG センサのひずみ量測定の正確さを比較するために、両面にひずみゲージを張り付けている。FBG センサは反射率94.9%、反射中心波長1550.3nm、反射半値全幅0.52nm、FBG長4mmのものを用いた。

図4は、CFRP板材の長手方向に荷重を増加・減少させた場合のひずみゲージによる測定結果を示す。1965Nまで120秒か

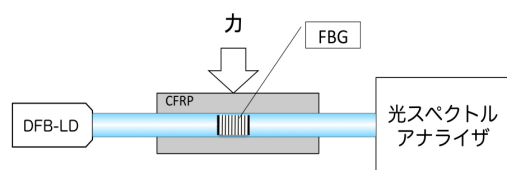


図6 ひずみと単色光源の出力光源

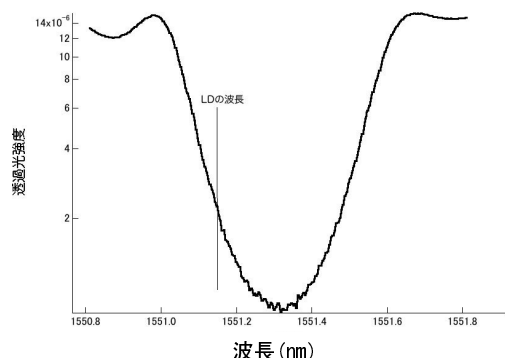


図7 FBG センサの透過波長分布

けて荷重を増加させ、その後除荷を行った。表面に貼り付けたひずみゲージから測定したひずみの最大値は、 $400 \mu \varepsilon$ と $313 \mu \varepsilon$ となった。

図5は、市販のFBG測定装置とFBGセンサによるひずみの同時測定結果を示す。ひずみゲージと比較すると、ひずみの値が小さい場合でも負荷値に対する追従性が良いことが判る。ただし、各点の測定速度は、波長走査を必要とするため、10Hzと非常に遅い。測定には、Micron Optics社のsm125を用いた。

次に、単色光源を用いて、FBGセンサの反射波長のシフトを測定する確認実験を行った。実験では、図6に示すように、DFB-LDの単色光源から出た光をCFRP板材に埋め込まれたFBGセンサを通過させ、光スペクトルアナライザによって受光した。この時、CFRP板材の中央部分に力を加えながら、荷重変化による、波長と強度変化を調べた。FBGセンサの透過光波長分布を図7に示す。LDコントローラを使ってDFB-LDの注入電流と温度を制御することにより、発振波長を図8に示すようなFBGセンサのスロープの部分に合わせた。DFB-LDの発光波長半値全幅は55pm、FBGセンサの吸収波長の半値全幅は520pmのものを用いた。FBGセンサはCFRPの中央部に埋め込まれているが、製造時に誤差が生じるため、完全に板の中心位置にはない。そのため、板を上下に変形させると圧縮または引張りのひずみが生じる。図9は、板を変形させながら、FBGセンサを透過した光をスペクトルアナライザによって、時間ごとに測定したものを示す。荷重変化により、透過光強度の変化が計測できたことから、このシステムによりひずみ計測が可能であることが確認できた。

最後に、以上の実験結果から、平衡受光システムの動作検証を行った。図10に平衡受光システムの実験光学系を示す。DFB-LD

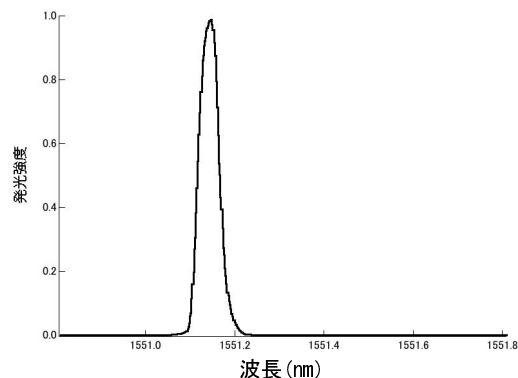


図8 DFB-LDの発光スペクトル分布

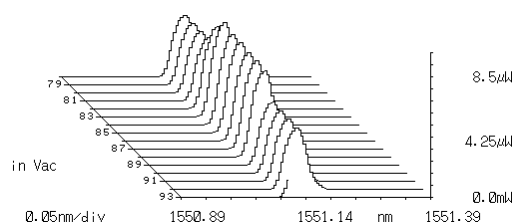


図9 ひずみに対する波長・強度変化

から出た光は、光カプラにより2分割する。一方はCFRPのひずみを測定するためのFBGセンサに光を透過させる。また、もう一方の光は参照用の光ファイバに入射する。この実験では、参照用の光アッテネータの代わりに、CFRP用のFBGセンサと同じセンサを用いることによって、両方の光ファイバの透過光強度を同じにした。両方の光ファイバを通過した光は、光通信用の高速アナログホトディテクタにより、電気信号に変換された後にアンプにより増幅する。最後に増幅されたひずみ信号と参照信号はオシロスコープにより差分をとることによって、ひずみ成分のみをオシロスコープで検出した。実験光学系のDFB-LD光源には三菱電機製ML925J40F-08を用いた。また、ホトディテクターには、京セラ製KPDE008、アンプにはアナログデバイス製AD8304を用いることにより、電気的には10MHzまでの動作が可能な光学系としている。

システムの周波数応答性を調べるために、図11に示すような piezoアクチュエータによりCFRPにひずみを与え、そのひずみの変化速度に対する動作を確認した。CFRPの板材は、振動数の高い部分まで追従できるように、一方向に3層を積層した薄い平板状の形状をオートクレープ成形法により製作した。大きさは、 $1.5\text{cm} \times 7.5\text{cm}$ の長方形である。FBGセンサはCFRPの裏面にセロハンテープで接着させ、CFRPのひずみを測定する。ひずみを与えるため、CFRP板材の表面を、直径10mmの円形の piezoアクチュエータを使って荷重を与える。アクチュエータからの振動をCFRP板材に効率良く伝えるために、CFRP板材とアクチュエータの間にワックスを入れ密着性を向上させた。piezoコントローラにファンクションジェネレータを接続し、piezoアクチュエータの動作を制御した。但し、用いた piezoコントローラの最大動作周波数は10kHzである。また、実験では、CFRPの両端は保持具により固定されている。

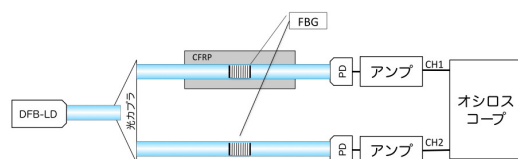


図 10 平衡受光システムの実験光学系

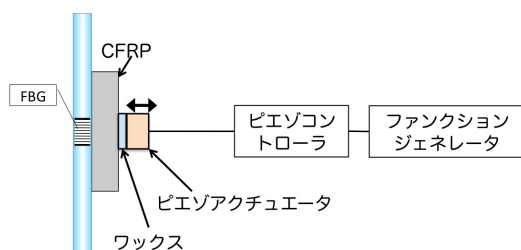


図 11 高速振動によるひずみ発生

まず、ピエゾアクチュエータに与える電圧を徐々に増加させ、荷重に対して、フォトディテクターからの電圧差を調べた。図 12 は、コントローラからの電圧を 0V からマニュアル操作により電圧を上昇させながら、電圧値に対して、両方の PD からの電圧差をオシロスコープにより計測したグラフを示す。但し横軸は、コントローラの電圧からピエゾアクチュエータのストローク値に換算した値である。2 回の測定結果は、ほぼ一致して、押出量の増加に比例して PD の電圧差も上昇している。従って PD の電圧差は、CFRP に加えられているひずみにほぼ比例していると考えられる。従って、従来の広帯域な光源を用いた場合と同様に、単色光源でもひずみ量のみの測定が可能となった。

最後に平衡受光システムが計測できる動作速度を調べた。動作速度を調べるために、ファンクションジェネレータにより一定の振動を CFRP 板材に加え、その振動を平衡受光システムで測定した。測定では、200Hz～16kHz の範囲で測定が可能であった。但しピエゾコントローラの最大動作周波数は 10kHz であるため、10kHz 以上の周波数については、発振機器が正しく動作していたとは言えない。また、ピエゾアクチュエータの質量があるため、ストローク量が多い場合、高速な振動には追従出来ない。このため、ストローク量は小さく抑えている。図 13 は、10kHz で CFRP 板材を振動させた場合の、オシロスコープの画面を示している。差動電圧の変動が 10kHz で検出できている。また、差動電圧のみを増幅表示した。この実験から、CFRP を伝わる衝撃波や弾性波などの高速な計測が提案するシステムにより可能になることが確認できた。

4. 結 言

CFRP のひずみ量を高速に測定するために単色光源を用いた FBG センサシステムを開発した。このシステムでは、

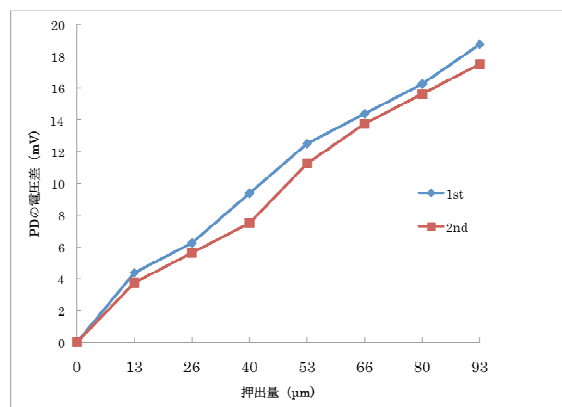


図 12 ピエゾアクチュエータの押出量に対する PD の電圧差

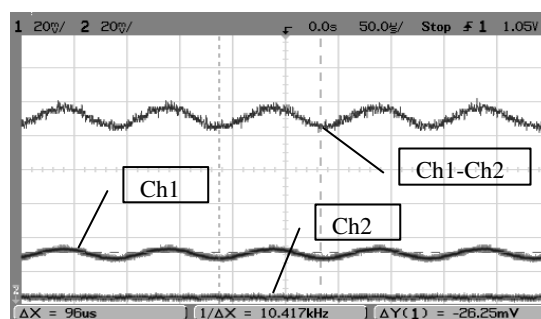


図 13 振動を与えた場合の電圧差

通信用に用いる DFB-LD の狭帯域なレーザ発振波長を用いることによって、強度変化のみの測定によるひずみの変化を測定できた。また、この方法に、PD やアンプなども光通信のデバイスを用いることによって、高速な測定が低価格なシステム構成で可能となった。

提案するシステムを用いることによって、CFRP 内部を高速に伝搬する衝撃波などを計測することが可能となるため、CFRP の初期破壊の原因とされる内部クラックの発生の究明に利用できる。

謝 辞

研究を推進するにあたり、光ファイバブラッググレーティングの製作について、多大なるご協力をいただきました(株)プロリンクスの猪瀬健次氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 光ファイバ総合技術展2008 光ファイバ技術特別セミナー予稿集, 2008.
- 2) 小島征爾, 小松崎晋路, 黒沢芳宣, 本郷章史: 工業技術研究誌 日立電線, 23, 9-12 (2004).