

論文内容の要旨

論文題目：

埋め込み FBG センサを用いた先進グリッド構造のヘルスマニタリング
Structural Health Monitoring in Advanced Grid Structures with Embedded Fiber Bragg Grating Sensors

氏名： 天野 正太郎

緒言

近年、異なる二つの材料を組み合わせ、それぞれの特徴を生かした複合材料の開発が進んでいる。その中でも特に炭素繊維強化複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP)は、樹脂に炭素繊維を埋め込んだ複合材料で、繊維配向方向の比強度・比剛性に優れた材料であり、軽量化が特に重要となる航空宇宙構造用の材料として注目されている。しかしながら、CFRP を材料として用いることには、その信頼性の面で様々な問題がある。

その信頼性向上のため、構造ヘルスマニタリング(Structural Health Monitoring : SHM)システムが提案されている。SHM とは、基本的にはメンテナンスを行うためのシステムであるが、特に、材料内部にセンサやプロセッサを埋め込み、半永久的に簡便に構造健全性診断を行うシステムと定義される。

本研究では、CFRP を用いた構造に対する SHM の構築を研究目的としているが、その対象として、CFRP 先進グリッド構造(Advanced Grid Structure : AGS)を選択した。グリッド構造は、梁のみを用いて正三角形が連続する構造であり、面内等方性の構造としては、最もシンプルな構造である。等方性なため Isogrid 構造は、面内の引張・圧縮・せん断、及び、面外の曲げ、振り、とほぼ全ての荷重パターンに対して適用できる。また材料破壊の観点では、CFRP 一方向材のみで構成されているため、積層板等で問題となる層間剥離のような複雑な損傷が発生・進展しない。さらにグリッド構造は、構造の強度について安全性・安定性を確保するのに必要な部材や支点以上に余分な部材を持っており、この余剰部材が冗長性をもたらし、フェールセーフ性を有する構造である。

本研究では、この AGS に対して、SHM システムを構築することを目的とする。AGS についての近年の研究としては、製造方法開発、試験方法、構造最適化、破壊現象の解明・モデル化、などが行われている。一方、SHM については、センサ開発、各種複合材料構造への適用、信号処理による損傷同定方法、などが研究されてきた。しかし、この両方を組み合わせて検討している研究はない。筆者は、本論文の中で、この AGS の各リブに光ファイバセンサの一種である Fiber Bragg Grating(FBG)センサを埋め込み、構造の健全性を評価するシステムを提案する(Fig. 1)。FBG センサは、ひずみ・温度を計測するセンサであるが、一般的なひずみゲージに較べて、高感度・無誘導性・省スペース・多重化などの様々な利点を有する。本研究では、この FBG センサを多重化した上で、AGS の各リブに一つずつ埋め込み、FBG センサを用いたひずみ計測を利用した SHM を検討した。SHM の方法として筆者らは大きく 2 種類の方法を提案する。一つ目は

AGS に特定の試験負荷を与え、その負荷下での構造全体の静ひずみ分布の変化から損傷を同定する方法、もう一つは、AGS のリブに沿って動ひずみ、すなわち、弾性波を伝播させ、信号の変化から損傷を同定する方法、である。これらの SHM システムを検討するには、まず、どのような損傷が発生するのかを明らかにする必要がある。そこでまず、作成した AGS に低速衝撃荷重や押し込み荷重を加えながら、発生する損傷について詳細に議論した。次に、それらの損傷を検知する計測システムとして、提案した上記システムについて、静的・動的なひずみ計測能を評価した。さらに、どの損傷がどの方法で検知できるのかを、実験・解析両方を用いて検討した。以上を考える際には、常に AGS 適用部位として主翼 Winglet を想定し、この Winglet に対する SHM システムを検討した。

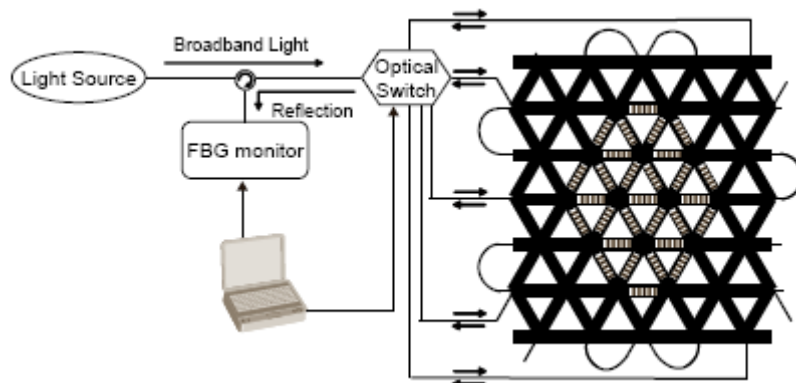


Fig. 1 : 埋め込み多重化 FBG センサを用いた AGS の SHM システム

AGS に生じる低速衝撃損傷評価

衝撃位置・衝突物サイズ・格子サイズの 3 つをパラメータと考え、その組み合わせによりどのように損傷形態が変化するのかを実験により確認した。その結果、低速衝撃試験によりスキンのない AGS に生じる損傷は、リブの繊維破断によるクラック、リブ上面に発生するスプリッティング、スキン付の AGS については、AGS せん断中心付近のリブ側面の剥離損傷のみ考慮すればよいことがわかった。これに、製造時のリブ-スキン接着が不完全になりやすいという問題も加えた 4 つの損傷について SHM を検討することとした。

埋め込み多重化 FBG センサを用いた SHM システムの検証

上記の 4 つの損傷に対する最適な SHM システムとして、多重化した FBG センサを AGS の各リブに構造成形段階より埋め込み、構造中に発生する静的・動的なひずみから損傷診断を行う SHM システムを提案した。そして、埋め込んだ FBG センサが、実際に静・動ひずみを計測できることを実験的に確認した。

静ひずみ計測については、少なくともひずみゲージの代替としては十分役割を果たすことを明らかにした。さらに後述のとおり、この計測系のひずみ計測誤差が現段階で $\sim 50\mu\epsilon$ であることを明らかにした。

一方、動ひずみ(弾性波)計測では、AGS に適用するのに最適な疎密波・曲げ波を決定するとともに、AGS 中を両弾性波がどのように伝播するのか、その伝播特性を明らかにした。その結果、疎密波を用いた損傷検知を行う場合には、Fig. 2 のように、AGS の各直線経路上の端部にそれぞれ圧電素子を接着し、経路ごとに構造診断を行う方法を、曲げ波を用いた損傷検知を行う場合には、Fig. 3 のように例えば、リブ 3 本おきに交点に圧電素子を接着し、リブ 2 本分の領域全体を診断するという方法を提案した。

Table 1に損傷と、各手法の組み合わせを示した。以降ではこの表に基づき、損傷検知手法を検討する。

Table 1 : 損傷と検知手法の組み合わせ

	繊維破断によるクラック	リップ上面のスプリッチング	リップ側面の剝離損傷	リップ-スキンの接着不良
一点集中 曲げ荷重	実験により検討	解析による検討	実験により検討	×
面内圧縮 荷重	解析による検討	解析による検討	実験により検討	×
疎密波	実験により検討	実験により検討	×	実験により検討
曲げ波	実験により検討	実験により検討	×	実験により検討

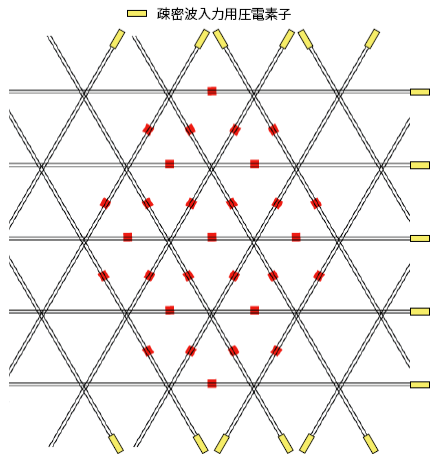


Fig. 2 : 疎密波を用いた SHM 手法提案

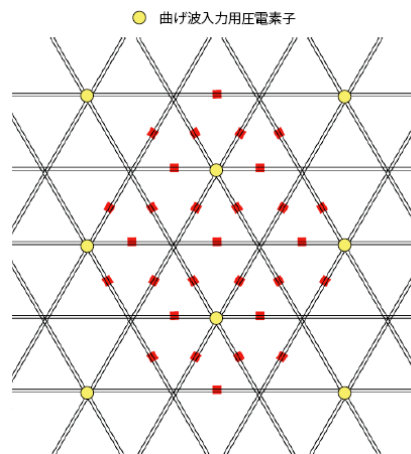


Fig. 3 : 曲げ波を用いた SHM 手法提案

静ひずみ計測によるヘルスマonitoring

検査荷重として、実構造において特定箇所を押すことに相当する面外一点集中荷重、自重による面内圧縮荷重を用い、損傷前後で計測される静ひずみの差から損傷検知を行う方法を提案した。検討に際しては計測誤差を考慮して、 $50\mu\epsilon$ 以上のひずみ差を生じた場合に、損傷が検知できる可能性があると判断することとした結果、本研究で提案している手法(計測系、静ひずみ計測両方の意味で)を用いて検知できそうな損傷としては、リップの繊維破断、のみであることがわかった。

さらに本研究では、得られたひずみ変化の情報から損傷位置を同定する手法として、新たに統計的異常値検知手法を用いることを提案した。この方法は、本研究のシステムで損傷により発生するひずみ変化の情報を扱うのに非常に適しており、計測・環境誤差による問題をむしろ積極的に利用している。この方法を、上記で得られたひずみ変化の情報に対して適用したところ、損傷したリップを精度よく判定することができた(Fig. 4)。

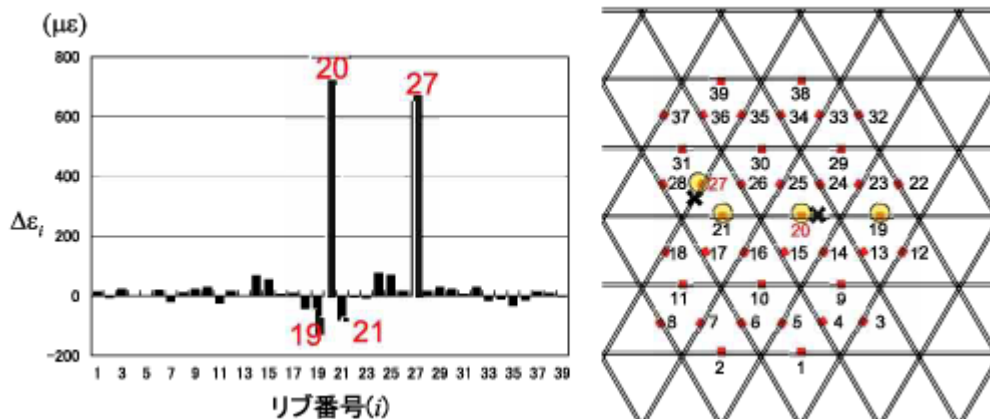


Fig. 4 : 統計的異常値検知手法を用いた損傷診断結果

動ひずみ(弾性波)計測によるヘルスマモニタリング

弾性波として、疎密波・曲げ波を AGS 格子部に入力し、埋め込まれた各 FBG センサで計測されたひずみの時間履歴から損傷検知を行う方法を提案した。疎密波に関しては、AGS が単純なユニットの繰り返しであること、また、疎密波が非常に単純な波でありリブごとの製造時のサイズ誤差を無視できること、を考慮して、様々な経路に弾性波を伝播させ、入力部より等距離にある FBG センサの信号を互いに比較し、その最大強度の違いから損傷位置を特定する方法を提案した。一方、曲げ波については、交点より入力した波が周囲 6 方向に一樣に伝播する性質を利用し、6 方向のそれぞれに埋め込まれている FBG センサで計測された弾性波(初期到達波)の強度を比較し、他に比べて小さいところに損傷が存在すると考えることとした。

以上の提案を、前述の損傷すべてについて実験により検討した結果、疎密波・曲げ波どちらの場合においても、伝播される弾性波強度の変化から、損傷が検知できることが明らかになった。これは、繊維破断、上面のスプリットイング、については、その亀裂先端において反射が起こり伝播される弾性波エネルギーが小さくなることを利用している。またスキンの接着不良に関しては、完全に接着されていた場合にスキンへ逃げる弾性波エネルギーが、接着不良により格子部に留まるため、計測される弾性波が見かけ上大きくなることを利用している。

結言

以上、本研究で提案した埋め込み多重化 FBG センサを用いたひずみ計測系及び静的・動的な SHM 手法を用いて計測できる損傷について、改めて Table 2 に示す。この結果、低速衝撃荷重により発生する可能性のある損傷全てを、非常に簡便に検知できることがわかった。本研究で特に重要であるところは、これら全ての検討を解析だけではなく、実構造物レベルで行っている点にある。

Table 2 : 各損傷に対する各 SHM 手法の適用可能性

	繊維破断によるクラック	リブ上面のスプリットイング	リブ側面の剝離損傷	リブスキンの接着不良
一点集中 曲げ荷重	検知可能	検知不可	検知不可	×
面内圧縮 荷重	検知可能	検知不可	検知不可	×
疎密波	検知可能	検知可能	×	検知可能
曲げ波	検知可能	検知可能	×	検知可能

また、本研究では特に AGS を対象として SHM システムを検討したが、今回の SHM システム構築までの流れは、一般的なすべての構造に対する SHM システム構築においても適用可能である。一つの構造に対してその SHM システムを、損傷の解明、その損傷にあった計測系及び計測手法の提案、提案された計測手法を用いた SHM 方法の提案、以上全ての実験的な確認、この流れに沿って開発を行うべきであると示唆したことも本研究の大きな成果であり、その工学的意義は大きいものとする。今後はこの研究成果を用いてより大きなアプリケーション構造(主翼端 Winglet の翼ボックス構造)に対しての検証実験を行うことが決まっております、本研究で得られた成果がその際にも大きく役立つことを期待したい。