

論文の内容の要旨

分布ひずみデータの形状特性評価に基づく モデル状態変化にロバストな CFRP 構造の変位同定法に関する研究

西尾 真由子

炭素繊維強化複合材料(CFRP)は、比強度・比剛性が高く、軽量の構造が可能となるため、特に航空宇宙機において、適用が進む材料である。機体の軽量化は、運行エネルギーとコストの低減につながるほか、航空機としての高機能化も図ることができる。一方でこの CFRP は、損傷形態が複雑であることから、供用時における構造の安全性と信頼性を保障するため、光ファイバセンサを用いた構造健全性モニタリングの適用が積極的に取り組まれてきた。光ファイバセンサは、軽量で繊維状であるため、CFRP 内に材料特性の低下なく埋め込むことができる。すると、材料内部のひずみや温度の計測が可能となり、局所的な内部損傷などの検知に、その有効性が示されてきた。このように、モニタリングシステムを一体化させることで構造の信頼性が向上すると、機体メンテナンスの効率化と低コスト化が実現するほか、CFRP の材料特性をより生かした設計が可能となり、さらなる機体軽量化も期待できる。そして近年では、航空機の翼や胴体といった大型構造部材が CFRP で製造されるようになり、その構造は大型化が進んでいる。このことから、モニタリングシステムにおいても、大型構造全体でデータを取得し、グローバルな構造状態を、定量的に把握できることが求められている。

このようなモニタリングシステムを実現する光ファイバセンサとして、本研究で用いたのが、 Brillouin 散乱現象を用いた分布型センサの一つである、Pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis (PPP-BOTDA) システムである。従来の多くのひずみセンサは、加工が施されたゲージ部で離散的に値を取得するのに対し、分布型光ファイバセンサは、光ファイバ上のサンプリング間隔が任意に設定でき、離散型センサでは実現が不可能な密な間隔でデータ値を取得することが可能となる。さらに、これまでこの Brillouin 散乱式センサは、1m もの空間分解能があったが、近年では、その高分解能化が著しく進んでいる。PPP-BOTDA システムにおいても、空間分解能 100 mm、サンプリング間隔 50 mm の分布データが取得可能であり、さらに、一度の計測で数 km もの光ファイバに対して計測を行うことができる。本研究では、この新しいデータ形式である分布ひずみデータを逆解析に用い、そのデータ特性を生かした構造モニタリングシステムの構築を行うこととした。その中でも、ひずみデータから変位を同定するアルゴリズムを取り扱い、構造のライフサイクルにおけるさまざまな場面において、変形状態を高精度で把握できるシステムとして、その有効性を示すことを目的とした。

分布ひずみデータを逆解析に用いるにあたって最も留意しなければならない特性は、一本の光ファイバ上で得られるデータ値の信頼性が、各サンプリング点によって異なることである。この要因は二つ挙げられる。一つ目は、分布データの空間分解能の影響によって、光ファイバ上に負荷されるひずみ分布が不均一である箇

所ほど、その分布形状の解像度が低下し、データ値の真値再現度が低下する点である。二つ目は、先と同様に、ひずみ分布が不均一である箇所のサンプリング点ほど、計測段階で得られるブリルアンゲインスペクトルの形状が広がることで、ひずみ計測精度が低くなるという、ブリルアン散乱現象を用いた計測手法に固有の要因である。そこで第2章ではまず、これら二つの要因において共通に関連している、ひずみ分布形状の不均一度を表す指標として、規格化ラプラス値(NLV: Normalized laplacian value)を定義した。この指標は、分布形状の二階微分値を表し、その不均一度が高いほど大きい値を示す。そしてこの NLV に対する、分布ひずみデータの真値再現度、およびひずみ計測精度の関係を、それぞれ実験によって検証し、統計的なデータ処理によって考察を行った。その結果、二つの要因それぞれについて、ひずみ分布形状指標 NLV とデータ信頼性低下度の関係を、定量的に記述することができた。ここで得られた結果は、第3章で構築した変位同定アルゴリズム内で用いることとなる。

第3章で構築した変位同定アルゴリズムは、大きく二つのプロセスからなる。はじめに、取得した分布ひずみデータより、光ファイバネットワークの埋め込み面内における、ひずみ関数を推定する。ここで、第2章の結果である、規格化ラプラス値 NLV で表されたデータ信頼性を用いることとなる。ここでは、NLV より求められたデータ信頼性に基づき、各データ点に重みを設定し、重み付き最小二乗法によって関数フィッティングを行う。この重みを考慮することで、信頼性の低いデータ点の推定結果への影響を少なくすることができ、真値に近いひずみ分布関数を得ることができる。次に、対象構造の有限要素モデルを構築し、そのひずみ値と節点変位の関係式から、変位の同定を行う。ここで用いるひずみ値は、はじめのプロセスで推定したひずみ関数に、構造上の任意の位置座標を代入して得られる値としている。このように、有限要素モデルのひずみ-変位関係式を取り扱う際に、直接分布ひずみデータを用いるのではなく、一旦、連続的なひずみ関数を推定し、その代入値を用いることで、さまざまな形状の構造に適用可能なアルゴリズムとしている。すなわち、同定パラメータである節点変位の数に応じて、ひずみ値の数が設定できるため、構造要素の数や種類が変化しても、十分な数のひずみ値をピックアップすることができる。構築したアルゴリズムは、片持ち板の曲げ変形における、たわみ量同定に適用し、その妥当性を検証した。ここでは、光ファイバネットワークを埋め込んだ CFRP 積層板供試体を作製し、曲げ試験によってデータを取得した。そして同定の結果、実測変位に対する誤差が 1% 以下と、高い精度でたわみ変形を同定することができた。またこの結果を、各データ点の信頼性低下を無視し、重みを付与せずに同定を行った場合での同定変位と比較したところ、信頼性低下を考慮した場合のほうが、50%程度も高い精度を示した。この結果から、構築した同定アルゴリズムにおける、分布ひずみデータ特性の考慮が妥当であることが示された。

逆解析において高い同定精度を得るには、計測データの精度・信頼性を把握しておくことに加え、構造の有限要素モデルが、実構造を適切に記述していることも重要となる。そのため、モデル構築においては、寸法や形状、適用する構造要素や境界条件といった点に留意しなければならない。しかし、実際に構造を供用していると、これらの既知条件、特に構造の固定部や荷重条件といった境界条件が変化してしまうことが考えられる。第4章では、分布ひずみデータの形状特性評価よりこの境界条件変化を検知し、構造モデルに対する先験情報として用いることで、構造状態の変化にロバストな逆解析が可能であると考え、検証を行った。はじめに、規格化ラプラス値 NLV の外れ値検出を行うことで、板供試体の固定端部や荷重点といった境界条件付与箇所の抽出が可能であることを示した。これを用いると、荷重点位置を変化させた際にも、その情報を検知することが

できた。そして、取得した位置情報より、供試体のたわみ形状の滑らかさに関する先験情報を設定し、それを考慮した変位同定を行った結果、実際のたわみ形状により合致する解を得ることができた。一方、変位境界条件に関する検証では、板供試体固定端部の領域を少しずつ変化させ、各状態で曲げ変形時のデータを取得した。ここから、固定端部付近に位置する分布データの NLV 値を調べることで、固定条件の変化領域が的確に診断できることが示された。そして、検知結果を有限要素モデルに反映させ、実際の固定条件にあったモデルへとアップデートさせた上で変位同定を行った結果、すべての状態で妥当なたわみ形状が高精度で同定された。この結果から、境界条件付与部のひずみ分布形状評価によって、構造の荷重境界条件、および変位境界条件の変化が検知可能であり、逆解析における先験情報として用いることで、妥当な同定解が得られることが示された。

第 5 章では、構築した変位同定アルゴリズムを、CFRP 構造の製造段階に生じる、熱残留ひずみによる変形のモニタリングに適用した。CFRP 構造の製造では、炭素繊維の積層過程において、その配向方向に誤差が生じると、熱膨張係数の中立面に対する対称性が崩れることがある。すると、成型時の温度変化によって生じる熱残留ひずみによって予期しない変形が生じ、構造の寸法精度が低下してしまうことがしばしば問題となっている。検証では、同じメカニズムで特徴的な変形を示す逆対称積層板を用い、構築した変位同定アルゴリズムによってその変形を同定し、製造段階における変形モニタリングへの適用可能性を示すことを目的とした。ただし、逆対称積層板のひずみ－変位関係は、板の大変形問題における関係式と等しく、節点変位に対して非線形な式となる。そこで、構築した変位同定アルゴリズムを、カルマンフィルタをもとにした反復計算アルゴリズムへと拡張し、非線形逆解析システムを作成した。そこに、実験によって得られた逆対称積層板の分布ひずみデータを適用した結果、実測変位に対して、概ね良好な同定精度で変形を求めることができた。

本研究では、分布ひずみデータの形状特性指標を、データ信頼性評価から構造モデルの境界条件変化の検知にまで幅広く用いることで、これまでになかった変位同定アルゴリズムの構築を行うことができた。そして、成型時におけるアプリケーションへの適用性や、境界条件変化に対するロバスト性を実証したことで、構築したアルゴリズムが、CFRP 構造のライフサイクルを通じて有用なモニタリングシステムであることを示した。