

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008-2009

課題番号：20860027

研究課題名（和文）階層型光センシングネットワークを用いた
複合材構造ヘルスマニタリング技術の創成研究課題名（英文）Development of a fiber-optic-based hierarchical sensing network
for health monitoring of composite structures

研究代表者

水口 周（MINAKUCHI SHU）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：70512359

研究成果の概要（和文）：より軽量な先進複合材航空機構造を実現するためのキーテクノロジーである構造ヘルスマニタリング技術（構造健全性診断技術）の新たな概念として、「階層型光センシングネットワーク」を提案した。損傷検知に特化した分散デバイスと損傷情報の収集・伝達に特化した光ファイバセンサネットワークを階層的に組み合わせることで、光ファイバセンサを用いたこれまでのヘルスマニタリング技術の課題点である「補修性」「ロバスト性」「計測領域」を改善すると同時に、複合材特有の微視的內部損傷への感度を向上させることを狙いとした。本研究では技術実証のために衝撃損傷検知システムを構築し、階層型光センシングネットワークの利点と課題を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a novel hierarchical sensing concept for detecting damage in composite structures. In the hierarchical system, numerous three-dimensionally structured sensor devices are distributed throughout the whole structural area and connected with an optical fiber network through transducing mechanisms. The distributed devices detect damage, and the fiber optic network gathers damage signals and transmits the information to a measuring instrument. In order to validate the proposed sensing concept, an impact damage detection system was developed and a verification test was then conducted. Occurrence of barely visible impact damage was successfully detected and it was clearly indicated that the hierarchical system has better repairability, higher robustness, and wider monitorable area compared to existing systems utilizing optical fiber sensors.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：知的複合材料構造

科研費の分科・細目：工学・構造・機能材料

キーワード：(1)複合材料 (2)航空宇宙構造 (3)構造ヘルスマニタリング (4)監視システム
(5)光ファイバセンサ (6)衝撃損傷

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック（CFRP）に代表される先進複合材料の航空機への適用が急激に加速しているが、運用中の検査においては目視検査に頼らざるを得ないのが現状であり、結果として内部損傷を許容しない設計となっている。そのため、先進複合材料の持つ優れた特性が十分に引き出されていない。そうしたなか、センサを構造材に埋め込み内部の健全性を常に監視する構造ヘルスマニタリング技術の適用が検討されつつある。特に、光ファイバセンサは小型・軽量で柔軟性に優れ、電磁ノイズおよび腐食に強いため複合材料への適用に最適であり、損傷の発生による材料内部のひずみ変化を検出することが出来るため、先進複合材料構造の損傷許容設計を可能にする埋め込みセンサデバイスとして注目されている。

しかし一方で「ロバスト性」「補修性」、「計測領域」に対する課題も指摘されてきている。従来システムにおいては、光ファイバネットワークが構造内に形成され、センサ部が損傷の発生によるひずみや温度の変化を感知することで損傷の検知を行う。ここで重要なのは、このひずみや温度の変化といった、いわゆる“損傷情報”を損傷領域から計測器に伝送するために、再度光ファイバが用いられている点である。これが、従来システムがモニタリングシステムとしてのロバスト性に欠けている理由である。すなわち、損傷の発生等により光ファイバネットワーク上の一点が断線した場合に情報伝送能力を完全に失ってしまうため、その破損箇所だけでなく他の領域の計測までも不可能になってしまう。複合材料に埋め込まれた光ファイバは破損後に補修を行うことが困難であるにも関わらず、「損傷の検知」と「損傷情報の伝送」の2つの役割を同時に担っていることが原因と考えられる。さらに、光ファイバセンサは基

本的には軸方向の一次元ひずみ温度分布を取得するものであるため、光ファイバ埋め込み位置から離れた場所に発生した損傷を検知することは困難であり、構造全体をモニタすることは出来ない。

2. 研究の目的

本研究は以上三つの課題を踏まえ、新たな「階層型センシングシステム」を提案する。このシステムは独立して損傷を検知できる多数の分散センサデバイスと、そのデバイスの出力を入力として受け取り損傷の発生に関する情報を計測器に伝達する光ファイバネットワークから構成される。本研究では実証のために、複合材衝撃損傷検知システムを構築し評価を行う。分散デバイスには表面き裂検知技術の一種である **Comparative vacuum monitoring (CVM)** 法を応用した新規センサデバイスを、また光ファイバセンシングには高空間分解能ブリルアン式分布ひずみ計測装置を用い、航空機胴体を模擬したCFRP 曲面補強パネルに発生した目視発見が困難なレベルの損傷を検知可能であることを示す。

3. 研究の方法

提案する衝撃損傷検知システムを図1に示す。分散センサデバイスは豪州の **Structural Monitoring Systems** 社が開発しているき裂検出技術 **CVM** 法を基にして作製する。**CVM** 法は接着面に複数の微細な溝を形成した薄いプラスチック基板を構造に貼り付け、構造表面にき裂が発生した場合に内圧差を設けた溝同士でき裂を介して空気が移動するのを利用してき裂を検知するものである。ここでは衝撃損傷検知のため、内部に流路を設けた気密テープ（図中 **A**）を複合材料構造裏面に多数貼り付ける。この際に流路内の空気を除去することで、デバイスの内圧を大気圧よ

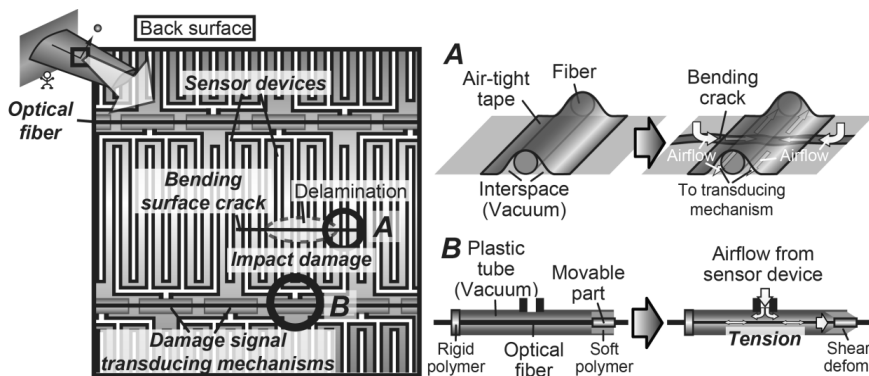


図1 衝撃損傷システムの概要

りも低く保つ。次にこれらのセンサデバイスと光ファイバを損傷情報変換機構（図中 *B*）を介して接続する。この機構は、損傷情報となるセンサデバイスの内圧変動を光ファイバの軸方向歪に変換するものである。本研究ではセンサデバイスの流路に硬質ポリマーチューブを結合し、内部に光ファイバを固定している。デバイスの内圧変動により光ファイバ固定部が変形することで、結果的に光ファイバに歪が生じる。各センサデバイスでのひずみ変動は、分布型ひずみ計測装置を用いてモニタする。

衝撃損傷が発生すると、荷重荷点直下の裏面に強化繊維方向の曲げ亀裂が発生する。この表面亀裂を介してセンサデバイス内に空気が流入すると（図中 *A*）デバイスに結合されたポリマーチューブの内圧が上昇する。最終的にチューブ内部に固定された光ファイバに引張ひずみが負荷されるので（図中 *B*）、分布ひずみ計測装置を用いることで衝撃損傷を検知することが可能である。

4. 研究成果

提案したセンサデバイスを製作し、航空機胴体構造を模擬した CFRP 補強曲面パネル（長さ 1m）に適用した（図 2）。合計 32 個のセンサデバイスを用い、それぞれが 10cm 四方の平面領域に発生する衝撃損傷をモニタすることで構造全体をカバーしている。また各変換機構には逆止弁を取り付け、中空チューブを用いてすべてのセンサデバイス内の空気を一気に除去することで、センサデバイス流路内を効率的に低圧に保った。

実証試験においては、まず図 2 中の *C* と *c* がモニタする領域に低速衝撃荷重を与えた。衝撃荷点表面には目視発見不可能な深さ 0.1mm 程度の凹みが発生し、裏表面には曲げ亀裂が発生した。健全部のセンサデバイスのひずみには変化がなく、損傷部のみ約 200 μe 程度のひずみ上昇が確認され、感度良く衝撃損傷を検知できた。次に、損傷部近傍のセン

サデバイスを補修し、再度衝撃損傷の発生をモニタすることを行った。センサデバイスが簡易な構造であるため容易に補修が可能であり、数分程度の作業でセンサシステムの作動復帰を確認することが可能であった。衝撃試験においては衝撃圧子がパネルを貫通する現象が見られた。従来システムにおいては光ファイバの破断が生じ計測不能になる状況であったが、階層システムは正常に作動し、損傷を検知することが出来た。以上より衝撃損傷システムが実証され、本研究で提案する階層型光ファイバセンシング概念の有する優れた計測領域、補修性、ロバスト性のすべてを具体的に示すことが出来た。

一方で階層システムの課題として、以下の 2 点が明らかになった。まずセンサデバイスにおいて複数の要素を階層的に組み合わせているため、センサ要素の数・種類とそれらをつなぐ接合部分が多い点である。各センサ要素は当然であるが、接合部分の信頼性も重要であり、簡易的構造を有し信頼性の高いセンサ要素を適切に組み合わせて用いる必要がある。もう一点の課題としては、センサデバイスを内部に埋め込まないため、構造裏面が若干乱雑になってしまう点である。構造の製造および運用過程において許容できる程度に容易な敷設が可能なセンサデバイスを開発する必要がある。

本研究は表面亀裂を検知対象としたが、将来的には樹脂割れ等の微視的内部損傷の検知が望まれるため、埋め込みタイプの分散デバイスを開発することを考えている。貼り付けタイプに比べ、そのサイズおよび材質をはじめとして様々な制約が出てくることが予想される。すなわち構造の機械特性の劣化、成形・製造過程への適合性などの点で、デバイスが満たさなくてはならない条件が複数挙げられるであろう。電磁気的あるいは化学的变化を用いる手法を含め幅広く調査・検討し、航空宇宙構造に適した微細なデバイスを発案・実証していく予定である。

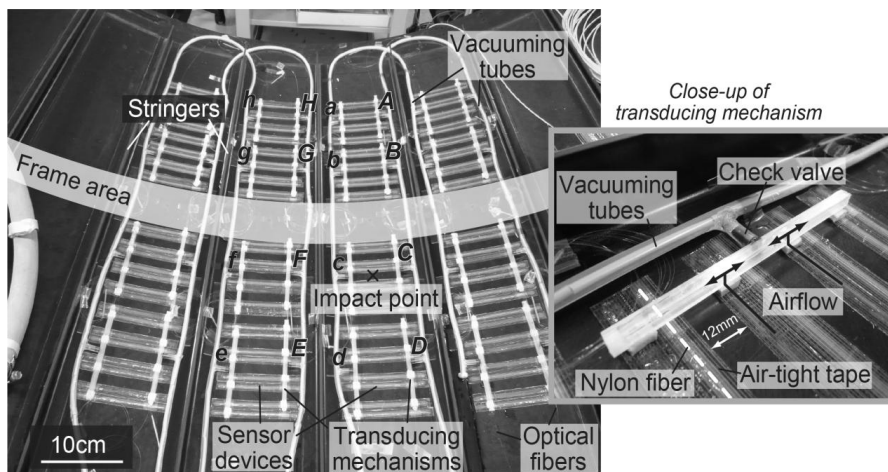


図 2 衝撃損傷検知システムが設置された CFRP 曲面補強パネル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

[1] S. Minakuchi, Y. Okabe, T. Mizutani and N. Takeda, "Barely visible impact damage detection for composite sandwich structures by optical-fiber-based distributed strain measurement," *Smart Materials and Structures*, 18(8), 085018 (2009) 査読有

[2] S. Minakuchi, T. Mizutani, H. Tsukamoto, M. Nishio, Y. Okabe, and N. Takeda, "Brillouin Spectral Response Depending on Strain Non-Uniformity within Centimeter Spatial Resolution and its Application to Internal Damage Detection in Large-Scale Composite Structures," *Structural Durability & Health Monitoring*, 4(4), 199-219 (2008) 査読有

〔学会発表〕(計4件)

[1] S. Minakuchi, H. Tsukamoto, N. Takeda, "Impact damage detection of CFRP panel using fiber-optic-based hierarchical sensing system," 7th Japan-Korea Joint Symposium on Composite Materials, 2009年9月25日, 金沢

[2] S. Minakuchi, H. Tsukamoto, N. Takeda, "Hierarchical sensing system for detecting impact damage in composite structures combining a fiber optic spinal cord network and distributed sensory nerve cell devices," 7th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2009年9月10日, Stanford, USA

[3] 水口周, 塚本遥, 武田展雄, "三次元の広がりをもつ分散デバイスと光ファイバを階層化したセンシングシステムによる複合材衝撃損傷検知," 第51回構造強度に関する講演会, 2009年7月22日, 白浜

[4] S. Minakuchi, H. Tsukamoto N. Takeda, "Hierarchical structural health monitoring system combining a fiber optic spinal cord network and distributed nerve cell devices," SPIE Smart Structures/NDE 2009, 2009年3月10日, San Diego, USA

6. 研究組織

(1)研究代表者

水口 周 (MINAKUCHI SHU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号 : 70512359