

知覚・治癒機能を有する生体模擬航空宇宙複合材料

東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

水口 周

Shu MINAKUCHI



1. CFRPとその課題

炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) は直径が $10\mu\text{m}$ 以下の炭素繊維とエポキシ樹脂などのプラスチックから構成される複合材料である(図1)。CFRPは、重量当たりの強度・剛性や防錆性などの耐環境性に優れるため、従来の金属材料の代替として航空宇宙構造への適用が急速に広がってきている。例えば最新の中型旅客機 Boeing 787や Airbus A350においては、構造重量の50%以上をCFRPが占めるまでに至っている。日本は現在、世界の炭素繊維の70%程度を生産し、また製造技術においても Boeing 787の主要構造の開発・製造を担うなど、高い国際競争力を有している。

一方で、CFRPは不均質な積層構造を有しているために、均質な金属材料と比較して技術的な課題も多い。CFRPを成形する際に、 200°C 程度の高温でプラスチックを固めてから冷却する必要があるが、昇温・冷却中に炭素繊維が伸び縮みしないのに対して、プラスチックには熱変形と化学的硬化反応による体積収縮が発生する。結果として成形後に内部に複雑な残留応力場が発生し、破壊の要因となるとともに形状の歪みにもつながる。また運用時には、異物衝突を受けた際に外部から目視発見できない内部亀裂が発生し、構造強度が著しく低下することもある。そうしたなか、材料の信頼性向上のために、CFRP内部にセンサやアクチュエータを埋め込むことで、生物が有する知覚や損傷治癒能力をCFRPに付加する知的構造材料に関する研究開発

が進んできている。

2. 光ファイバセンサを用いたライフサイクルモニタリング技術

光ファイバは直径が $150\mu\text{m}$ 以下の極細の繊維形状を有するセンサで、内部を伝播する光の反射や散乱現象を利用することで光ファイバに沿った伸び縮みや温度の分布を計測することができる。光ファイバセンサの最大の特徴は、その細さを生かして材料特性を変化させることなくCFRP内部に埋め込むことで(図1)、著者らの研究グループでは、厚さ方向を含めた任意方向に光ファイバを埋め込む技術を開発してきている¹⁾。CFRP構造が製造されてから運用され廃棄に至るまで、いわば「ゆりかごから墓場まで」のライフサイクルにわたった計測ができることも光ファイバセンサの大きな特徴である²⁾。成形時に発生する残留応力や形状の歪み、さらには構造組み立て時の変形、さらには運用時の変形・損傷までをモニタリングすることが可能である(図2)。まさに生体における神経ネットワークのように機能し、構造の状態を連続的に把握することができる。

3. 階層型損傷検知・修復システム

センサシステムを大型航空宇宙構造に適用する際には、構造全域をカバーする能力と高い信頼性を両立させる必要があり、またシステム不具合に対する堅牢性も求められる。そこで著者らの研究グループでは、生体の有する神経ネットワークに類似する階層型システムを構築してきている³⁾。具体的には、末梢神経に相当するセンサ素子として多数の独立した微細流路網を構造表面、あるいは内部に冗長性を持たせながら配置し、中枢神経に相当する光ファイバネットワークでそれぞれのセンサ素子の圧力変動を監視する(図3)。構造に亀裂が発生することでセンサ素子内の

■ 著者連絡先

東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

(〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail. minakuchi@smart.k.u-tokyo.ac.jp

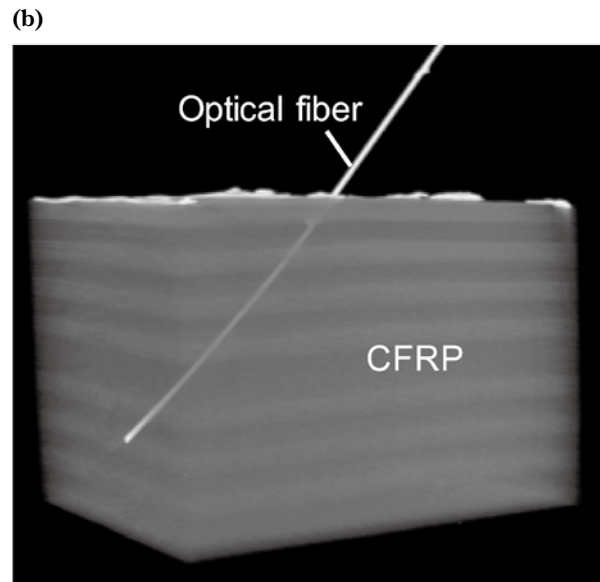
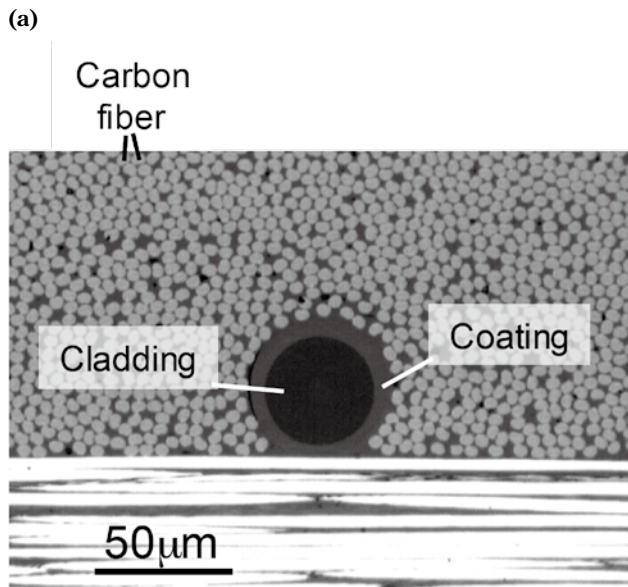


図1 光ファイバセンサ

(a) CFRPに埋め込まれた細径光ファイバセンサ(コーティング径 $52\mu\text{m}$)，(b) CFRP厚さ方向に埋め込まれた光ファイバのX線CT画像。

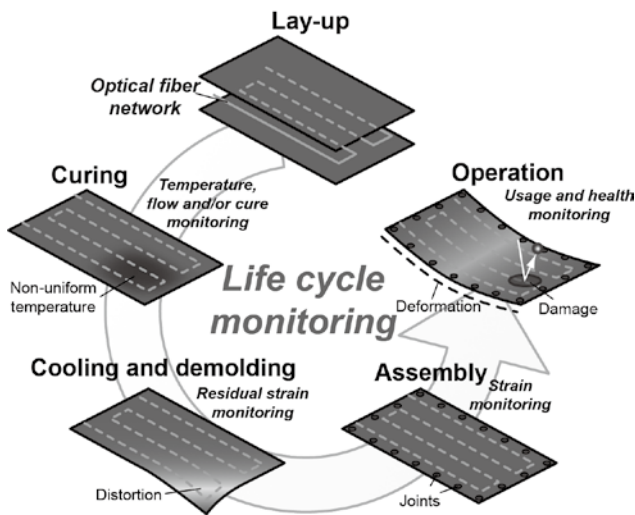


図2 光ファイバセンサを用いたライフサイクルモニタリング技術の概念図

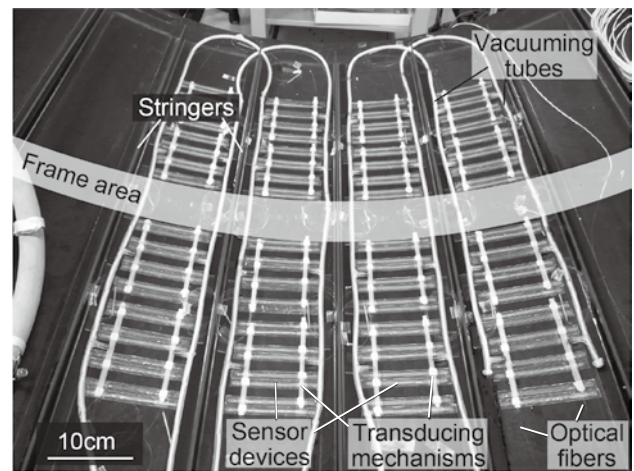


図3 航空機胴体模擬供試体に設置された階層型センサシステム

圧力が変動するため、任意の位置に発生する損傷を検知することが可能であり、冗長性を有する階層的な構成により一部の不具合(例えばセンサ素子の損失)によってシステム全体の機能が損なわれることがない。さらにこの階層型損傷検知システムを発展させ微細流路の内部に修復材(例えば未硬化の樹脂)を循環させることで、発生した亀裂を検知すると同時に修復することも可能である。

4. 生体への応用可能性

複合材料は義肢や人工骨などに適用されているが、航空

宇宙CFRP用途に開発が進むセンサ技術や損傷修復技術は、生体適合性を有する他の材料からなる複合材料の高機能化にも十分に寄与できる可能性がある。そもそも知的構造材料開発は、進化の過程で生物が取得してきた様々な優れた適応機能を工学的に可能な形で構造材料に与える取り組みであり、生物から学ぶことで実現した材料高機能化技術を逆に生体に適用することは、ある意味自然な流れであると感じる。近年の生物に着想を得た複合材料高機能化はセンサ・損傷修復技術だけではなく、生物の微視構造を模倣した高強度材料の開発などへも進んできており、こうし

た様々な取り組みにより生体への複合材料適用に向けたさらなる道が開けていくことを期待している。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

文 献

- 1) Minakuchi S: In situ characterization of direction-dependent cure-induced shrinkage in thermoset composite laminates

- with fiber-optic sensors embedded in through-thickness and in-plane directions. *J Compos Mater* **49**: 1021-34, 2015
- 2) Minakuchi S, Takeda N, Takeda S, et al: Life cycle monitoring of large-scale CFRP VARTM structure by fiber-optic-based distributed sensing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **42**: 669-76, 2011
 - 3) Minakuchi S, Tsukamoto H, Banshoya H, et al: Hierarchical fiber-optic-based sensing system: impact damage monitoring of large-scale CFRP structures. *Smart Mater Struct* **20**: 085029, 2011