

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709082

研究課題名（和文）損傷検知・修復システムと急速補修法の融合技術による超軽量複合材航空機構造の実現

研究課題名（英文）Ultra-lightweight composite aircraft structures designed based on combined SHM, self-healing and rapid repair system

研究代表者

水口 周 (Minakuchi, Shu)

東京大学・新領域創成科学研究科・特任准教授

研究者番号：70512359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では耐損傷性の問題から十分な軽量化にいたっていない複合材航空機構造を対象に、大幅な重量低減を目標とした検討を行った。具体的にはこれまで構築してきた階層型光ファイバ損傷検知システムを損傷検知・修復ハイブリッドシステムに発展させるとともに、独自の急速補修技術と融合させて構造に適用することで、設計許容ひずみレベルを向上させることを試みた。損傷検知・補修融合技術を適用することで初めて可能になる軽量供試体を作製し、従来構造との強度比較実験を通して融合技術による重量低減ポテンシャルを示した。

研究成果の概要（英文）：This research project demonstrated ultra-lightweight composite structures based on new damage-tolerance design concept. Damage sensing-healing hybrid system was developed by extending the hierarchical fiber-optic damage detection system and was then combined with rapid repair technology. Weight reduction potential by the combined system was demonstrated through strength comparison between conventional structures and ultra-lightweight structures designed based on the combined system.

研究分野：航空機構造

キーワード：複合材料 損傷許容設計 損傷検知 損傷修復

1. 研究開始当初の背景

近年、航空機胴体・翼などの主要一次構造部材への先進複合材料の適用が急速に進んでいる。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) に代表される先進複合材の適用によって、航空機の耐疲労性や耐腐食性の向上は達成されつつあるが、複合材の最大のメリットである高い比強度・比剛性を生かした構造の軽量化は依然達成されていない。その要因として複合材料は異物衝突を受けると、外部からは検知が難しい亀裂が内部に発生し、強度が大きく低下することが挙げられる。航空機の外表面は、離着陸時の石の跳ね上げ、点検時の工具の落下、駐機中の地上車の追突、運行中の雹・鳥の衝突など、さまざまな局面で衝撃負荷を受ける可能性があるため、その結果もたらされる影響を考慮した構造設計を行わざるを得ない。具体的には、目視検査で発見できない衝撃損傷が構造内部に存在しても、最大運用荷重を耐荷できるように、十分に余裕を持たせて構造の厚みを決定している。結果的に、複合材料が本来有する強度を十分に活用できておらず、複合材料の軽量性を構造重量の低減に生かせていない。

2. 研究の目的

本研究課題では耐損傷性の問題から十分な軽量化にいたっていない複合材航空機構造を対象に、大幅な重量低減を目標とした検討を行うことを目的としている。具体的にはこれまで構築してきた階層型光ファイバ損傷検知システムを損傷検知・修復ハイブリッドシステムに発展させるとともに、独自の急速補修技術と融合させて構造に適用することで、設計許容ひずみレベルを向上させることを試みる。損傷検知・補修融合技術を適用することで初めて可能になる軽量供試体を作製し、従来構造との強度比較実験を通して融合技術による重量低減ポテンシャルを目に見える形で示す。

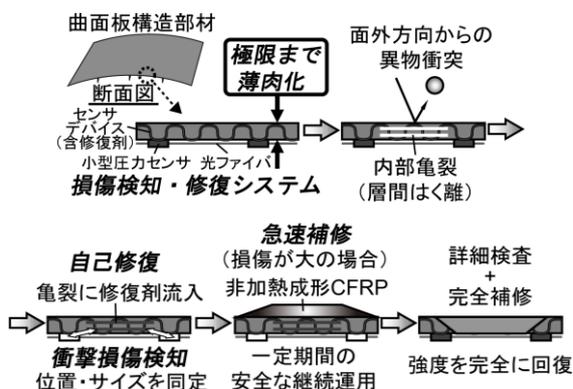


Fig. 1 軽量設計された複合材航空機の運用方法の概要

3. 研究の方法

(1) 損傷検知・修復ハイブリッドシステム構築したハイブリッドシステムの概要を

Fig. 2 に示す。まずプリフォーム積層時に内部に編みこんだ Sacrificial Fiber を成形後に熱処理で除去し構造内に3次元の流路網を形成する。表面を機械加工することで流路を外部に引き出し、光ファイバ分布圧力センサおよび修復剤（未硬化樹脂）注入機構と接続する。損傷が起こるとその周辺の流路が破壊され、流路内の圧力変化が起こると同時に未硬化樹脂が流入するため、損傷を検知すると同時に修復することが出来る。階層化により流路径を小さくすることができ、また流路の局所的な閉塞への耐性が向上するなど、システムの小型化と高ロバスト化を可能にしている。損傷含浸実験および破壊靱性値評価試験を用いてハイブリッドシステムの有効性を評価するとともに、航空機構造を模擬したスキンストリング供試体を用いた試験により技術実証を行った。

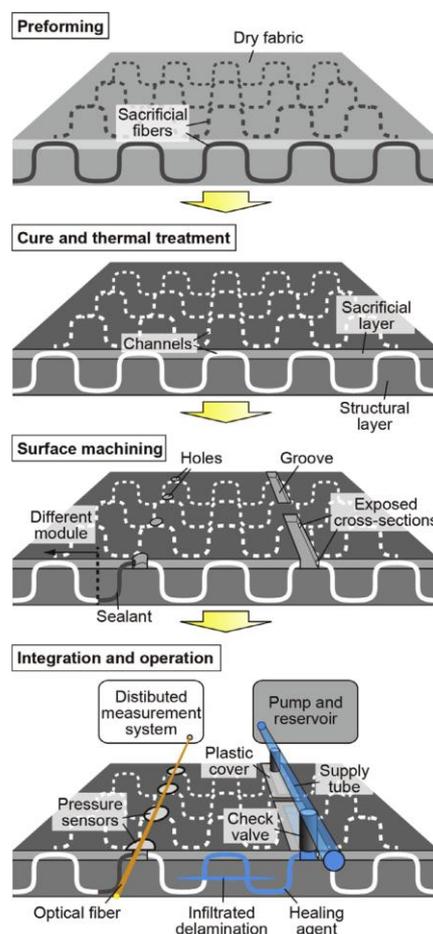


Fig. 2 ハイブリッド階層システムの概要

(2) 急速補修システム

提案概念による重量低減ポテンシャルを具体的な形で示すために、スキンストリング供試体の衝撃後圧縮試験を用いた実証を行った。従来設計法に基づく厚肉基準供試体と軽量設計法による薄肉軽量供試体の2種を作製し、等しい押し込み変位を荷重した後に軽量供試体のみ複合材パッチを用いた修復を行った。その後圧縮荷重を与えることで強

度比較を行った。

4. 研究成果

(1) 損傷検知・修復ハイブリッドシステム

損傷含浸実験と破壊靱性値評価試験から、階層型システムを用いることで複雑な内部損傷を修復剤で含浸し、層間強度を損傷前と同等のレベルまで回復可能であることを示した。またスキンストリング供試体を用いた実証試験では、スキンストリング間の剥がれを検知・修復可能であり (Fig. 3)、損傷近傍での変形の局所化を抑制することで無損傷時比で 60%まで低下した強度を 80%まで回復可能であることを示した (Fig. 4)。一方で面内方向に長い単一流路を用いたため、損傷内に修復剤が未含浸の部分も生じており、これが完全な強度回復に至らなかった要因として考えられた。そこで含浸性を改善するための面外方向短流路を複数用いる新しい構成の階層型システムを考案し、合理的な流路導入方法の構築や損傷修復の実証に成功した。

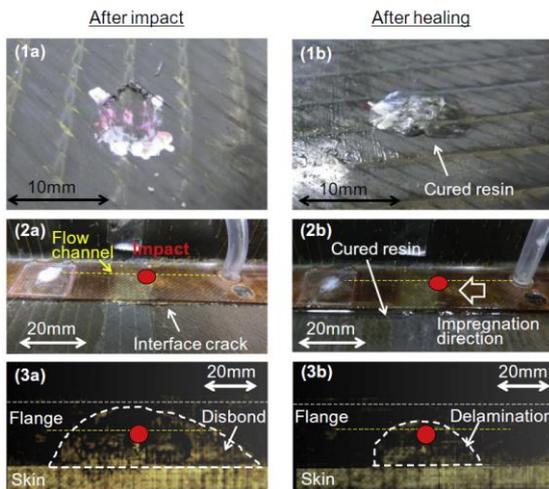


Fig. 3 修復前後でのスキンストリング間の剥がれ状態の比較 (1) 荷重負荷表面 (2) 裏面 (3) 超音波探傷結果

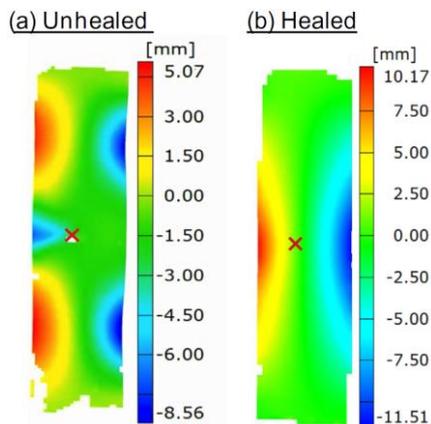


Fig. 4 修復による損傷近傍の局所変形抑制 (DIC 計測結果)

(2) 急速補修システム

作製した 2 種類の供試体を Fig. 5 に示す。軽量供試体 (右) は基準供試体 (左) の約半分の厚みであり、センサシステムでの損傷検知後の補修を模擬して損傷部を含む領域に CFRP パッチを接着してある。一方の基準供試体では、目視発見不可能な剥離損傷が導入されており、補修は行っていない。この 2 種の供試体の圧縮破壊直前の軸方向ひずみ分布の DIC 計測結果を Fig. 6 に示す。基準供試体では損傷部近傍で局所的なひずみ集中が発生し 40.5kN で破壊したのに対し、軽量供試体ではパッチ補修により局所ひずみ集中が抑制されており、結果的に基準供試体よりも高い 44.8kN で破壊に至った。前述の通り軽量供試体は基準供試体の約半分の厚みであり、損傷検知・補修融合技術に基づいた計量設計法を取り入れることで大幅な重量軽減が可能であることが示された。

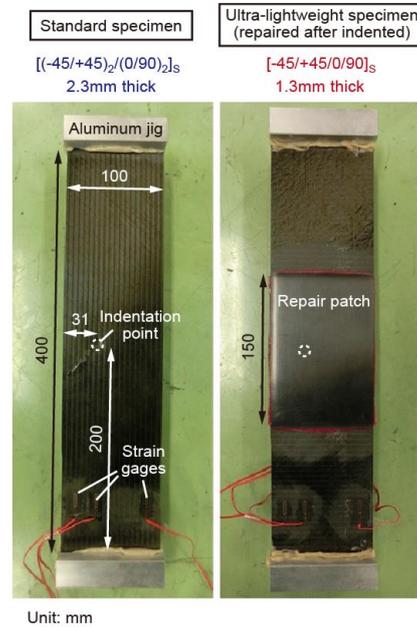


Fig. 5 基準供試体と軽量供試体

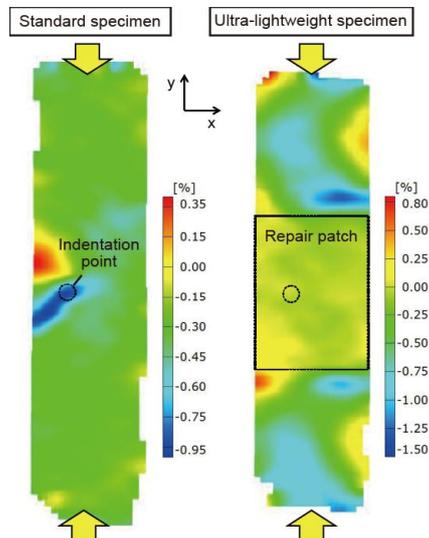


Fig. 6 破壊直前の軸方向ひずみ分布

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 3 件)

[1] N. Sakurayama, S. Minakuchi, N. Takeda, “Sensing and healing of disbond in composite stiffened panel using hierarchical system,” *Composite Structures*, 132, 833-841 (2015) 査読有
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.074>

[2] S. Minakuchi, D. Sun, N. Takeda, “Hierarchical system for autonomous sensing-healing of delamination in large-scale composite structures,” *Smart Materials and Structures*, 23(11), 115014 (2014) 査読有
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/11/115014>

[3] S. Minakuchi, N. Takeda “Recent advancement in optical fiber sensing for aerospace composite structures,” *Photonic Sensors*, 3 (4), 345-354 (2013) 査読有
10.1007/s13320-013-0133-4

[学会発表] (計 9 件)

[1] 木村佳樹, 水口周, 荻原慎二, 武田展雄, “板厚方向流路網を用いた自己修復複合材料” 第 8 回日本複合材料会議, 東京大学 (東京都文京区) 20170316

[2] S. Minakuchi, K. Yokota, N. Takeda “Ultra-lightweight composite stiffened panel designed based on SHM and rapid repair system” 10th International Workshop on Structural Health Monitoring 2015, Stanford, CA (U.S.A.), 20150903

[3] S. Minakuchi, N. Sakurayama, K. Yokota, N. Takeda, “Microvascular-based Hierarchical System for Sensing-Healing of Delamination in Composite Structures” International Conference on Self-Healing Materials, Durham, NC (U.S.A.), 20150624

[4] 櫻山直也, 水口周, 武田展雄, “階層型剥離検知及びセルフヒーリング複合システム, 第 6 回日本複合材料会議, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都葛飾区), 20150304

[5] 横田和樹, 武田展雄, 水口周, “CFRP 構造の軽量化のための急速補修技術” 第 6 回日本複合材料会議, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都葛飾区), 20150304

[6] S. Minakuchi, D. Sun, N. Takeda, “Extended Hierarchical Fiber-Optic-Based System for Sensing-Healing of Composite Delamination” 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Nantes (FRANCE) 20140709

[7] 孫登昊, 水口周, 武田展雄, “拡張階層型システムを用いた層間剥離の検知と修復” 第 5 回日本複合材料会議, キャンパスプラザ京都 (京都府京都市下京区) 20140306

[8] 横田和樹, 水口周, 武田展雄, “CFRP 構造の軽量化のための急速補修方法” 第 56 回構造強度に関する講演会, 浜松市浜北文化センター (静岡県浜松市), 20140806

[9] D. Sun, S. Minakuchi, N. Takeda, “Self-Healing Of Delamination Using Sensing Healing Hybrid System”, 13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, ウィンクあいち (愛知県名古屋市), 20131112

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水口 周 (MINAKUCHI SHU)

東京大学・新領域創成科学研究科・特任准教授

研究者番号 : 70512359