

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02345

研究課題名(和文)CFRPマルチマテリアル接着・溶着構造の破壊伸展特性の解明

研究課題名(英文)Fracture behavior of adhesive/fusion bonding in CFRP multi-material

研究代表者

吉村 彰記(Yoshimura, Akinori)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：20462898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではCFRPの接着・溶着接合において破壊プロセス、特に破壊モード変化(き裂偏向)を詳細に観察・解析し、この原因と挙動を学術的に解明した。き裂偏向は接合の不安定破壊をもたらすため、偏向の原因を明らかにすることが重要であった。このため、本研究の結果はCFRPマルチマテリアル構造の実現に向けて重要な知見である。

実験ではCFRPの混合モード試験(MMB試験)を多数実施し、き裂のその場観察とデジタル画像相関法によりき裂偏向の挙動を詳細に観察した。解析では有限要素法を用いて接着破壊挙動をシミュレートし、き裂先端の応力三軸度、接着界面の引張応力の2つの原因によりき裂偏向が生じることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

き裂偏向はCFRP接合構造の不安定破壊をもたらすため、このメカニズムの解明はCFRPマルチマテリアル構造の実現のためには不可欠であった。本研究はこのき裂偏向の原因を解明しており、CFRPマルチマテリアル構造の実現のために重要な知見が得られた。

また、学術的には、接着部の破壊進展を結合力モデル(Cohesive zone method)と連続体損傷力学(CDM)を組み合わせた有限要素モデルを提案し、これによってCFRP接合部の破壊シミュレーションを実施できるようにしたことは接着部の解析において非常に重要な成果であると考えている。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the fracture process, especially crack migration, of the adhesive/fusion bonding joint in the CFRP structure both experimentally and numerically, and revealed reasons and behavior of the crack migration. Since crack migration causes unstable fracture of the joint, investigation of the reasons of crack migration is essential. The results of this study are therefore important knowledge for achieving the CFRP multi-material structure. In the experimental part of this study, a number of mixed mode fracture tests (MMB tests) were performed. During the tests, in-situ crack micrography and strain analyses using digital image correlation (DIC) were performed to observe crack migration behavior. In the analytical part of this study, damage progress simulations were performed based on finite element method. The results of the simulations revealed that 1. stress triaxiality at crack tip and 2. normal stress at the adhesive/adherend interface caused the crack migration.

研究分野：複合材料工学

キーワード：炭素繊維強化複合材料 接着構造 破壊靱性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙構造への炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の適用は急速に進んでいる。しかし、その大きな弱点の一つとして、部材同士の接合が挙げられる。CFRPは応力集中部に繊維・樹脂間のクラックが発生してしまうため、可能であればファスナ接合を避け、接着・溶着接合を全面的に採用することが望ましい。しかし、現在ではCFRP構造においても接着・溶着構造は航空宇宙構造の一次構造への全面的な適用には至っていない。これには複数の理由があり、強度や破壊じん性値が作業環境の影響を受けやすく、安定した強度を得られない可能性がある、き裂進展に複数のモードがあり、き裂進展荷重、経路の予測が難しい、き裂が進展途中で停止せず不安定進展する可能性がある、などが挙げられる。したがって、学術的な観点からはCFRP接着・溶着接合の詳細な破壊メカニズムを解明することにより、これらの問題点の解決に貢献することができる。具体的には、接着・溶着部の力学的特性の評価方法を確立し、き裂進展経路の予測を可能にすることである。

2. 研究の目的

CFRPの接着・溶着接合部においては、接着剤や溶着した母材樹脂が荷重の伝達を担っている。従来の接着・溶着接合の評価は、接着・溶着部をマクロに見て、破壊力学的な手法を用いて行われており、接着剤・溶着部内部の構成式については考慮されていないことがほとんどであった。接着剤や溶着部は弾塑性材料であり、特にき裂先端には大きな塑性域が成長している。また、接着剤・溶着部内の破壊は隣接する高剛性の被着材の影響を強く受ける。このため、破壊力学に基づいた従来のアプローチでは、損傷・き裂伸展の方向・経路の予測は限界がある。特に接着・溶着層のき裂が偏向して被着体のCFRPの内部へ入り込み、CFRP層を破壊する現象(Migration)も発生するが、この現象の予測は従来手法ではできていなかった。したがって、高分子材料の材料特性と被着材の特性までを取り入れた、損傷・き裂伸展の評価手法が必要とされていた。

以上より、本研究の目的は、接着・溶着部の力学的特性の評価方法を確立すること、および、CFRP接着部における接着・溶着層内でのき裂進展経路の予測を可能にすること、と設定した。

3. 研究の方法

3.1 実験

本研究では東レ(株)製プリプレグ P3252S-20(炭素繊維:T700SC, エポキシ樹脂:#2592)を用いて作成した一方向 8 枚積層の CFRP 試験片を、構造用エポキシ接着剤(NB-102HC, Mitsubishi Chemical Carbon Fiber and Composites, Inc.)を用いて接着した接着試験片を主な材料として用いた。被着材の接着面はピールプライ Burlease 51789 Natural (Solvay)によって処理した。

本研究では接着部に対して、モード I 負荷をかける DCB(Double Cantilever Beam)試験および WDCB(Wedge DCB)試験、モード II 負荷をかける ENF(End Notched Flexure)試験、モード I およびモード II 負荷をかける MMB(Mixed Mode Bending)試験の 3 種類の実験を行った。ENF, MMB 試験では、き裂先端近傍を顕微鏡を装着した CMOS カメラで観察し、き裂進展の様子を観察するとともに、き裂先端のひずみ分布をデジタル画像相関法(Digital Image Correlation; DIC)によって算出した(図 1,2)。

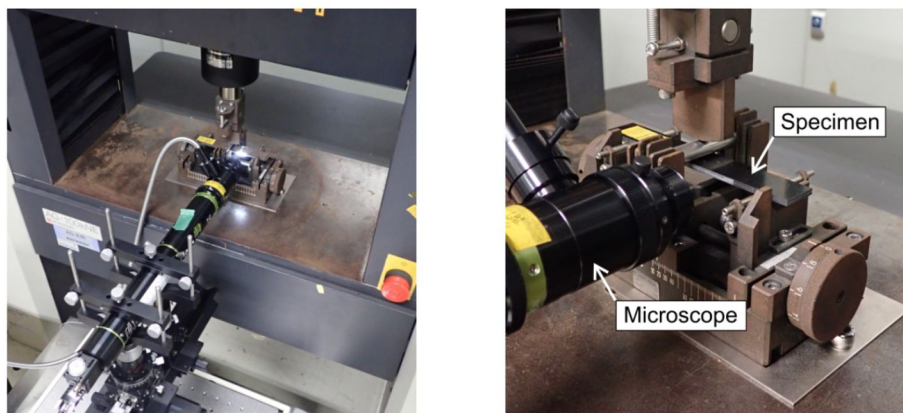


図 1 ENF 試験のセットアップ

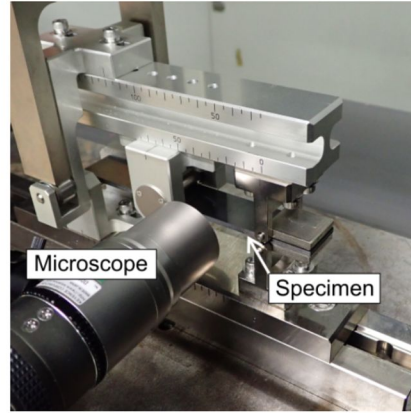
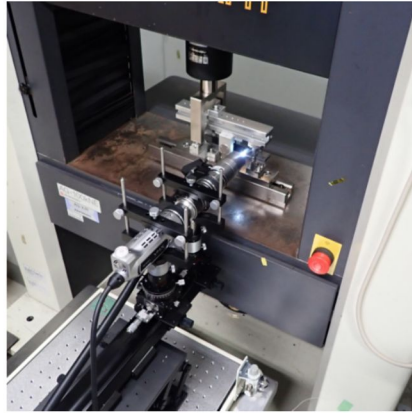


図2 MMB試験のセットアップ

3.2 数値解析

有限要素法により ENF 試験，MMB 試験における損傷進展のシミュレーションを行った．MMB 試験に関する有限要素モデルの概要を図3に示す．

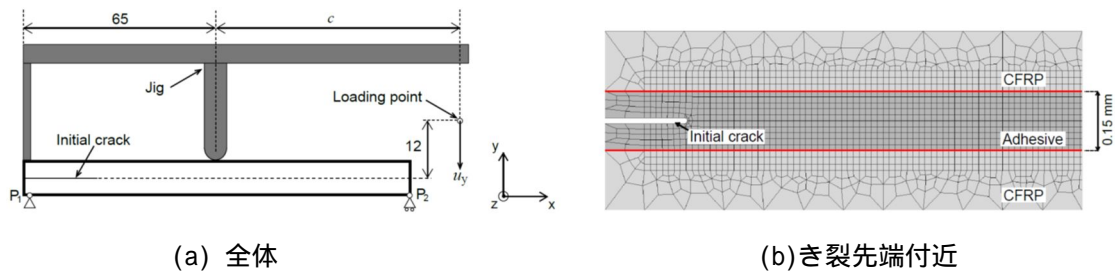


図3 有限要素モデルの概要

ここでモデルは3次元モデルとし，自由端付近と試験片中心付近の応力状態の差もシミュレートできるものとした．また，接着剤についてもモデル化し，接着剤については拡張 Drucker-Prager の降伏基準を用いた弾塑性材料とした．また，接着剤の破壊は応力三軸度に依存して破壊が発生し，これをクラックバンドモデル(Crack band model)によって損傷進展をモデル化した．また，接着剤とCFRPの界面には結合力モデル(Cohesive zone model)によって界面の破壊をモデル化した．解析は汎用有限要素法コード ABAQUS Explicit を用いて実行した．

4. 研究成果

4.1 実験結果

本研究での実験結果から，接着接合内の破壊進展について，以下のことがわかった．

1. モード I 荷重下においては，凝集破壊が支配的になる．接着試験片の自由端部にて被着材破壊へのき裂偏向が生じるが，これは局所的なものに限られる．
2. モード II 荷重下においては，き裂偏向は発生せず，凝集破壊が発生する．
3. モード I/モード II 混合モード荷重下においては，モード I 成分が大きい場合にき裂偏向が発生する．このとき，き裂偏向は， θ_1 ， θ_2 ， θ_3 の3つの形態に分けられる(破面の写真を図に示す)．特に θ_1 のき裂偏向は凝集破壊から界面破壊への偏向であり，この偏向が発生するとき裂は不安定に進展する．一方，き裂偏向の θ_2 は，モード I の場合と同じく自由端付近に被着体破壊に変更するが，局所的なものに限られる． θ_3 は局所的な被着体破壊への偏向であるが，これも局所的なものに限られる．

このとき， θ_1 のき裂偏向の原因を解明することが最も重要であると考えた．これはき裂偏向によって不安定破壊に移行してしまうためである．

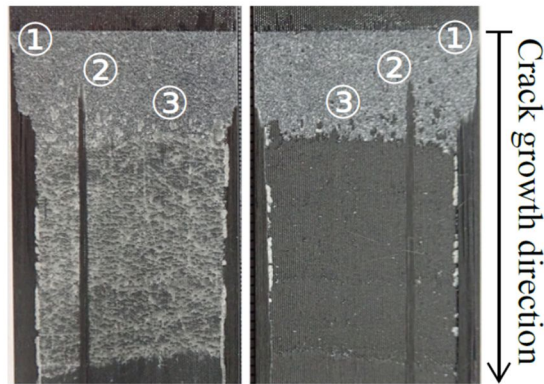


図4 MMB試験片におけるき裂偏向の様子

4.2 解析結果

MMBの解析結果について示す。本解析の結果により、モードI成分が大きい場合の混合モード荷重状態においては、まずモードI荷重によって接着剤-被着体界面にモードI支配の損傷が発生する。混合モードの荷重により、初期き裂の斜め上方に応力三軸度の高い領域が生じ、この部分から接着剤内の損傷が進展する。この初期き裂が界面損傷と合流することにより、一気にき裂の進展が生じる。という破壊機序が示された(図5)。

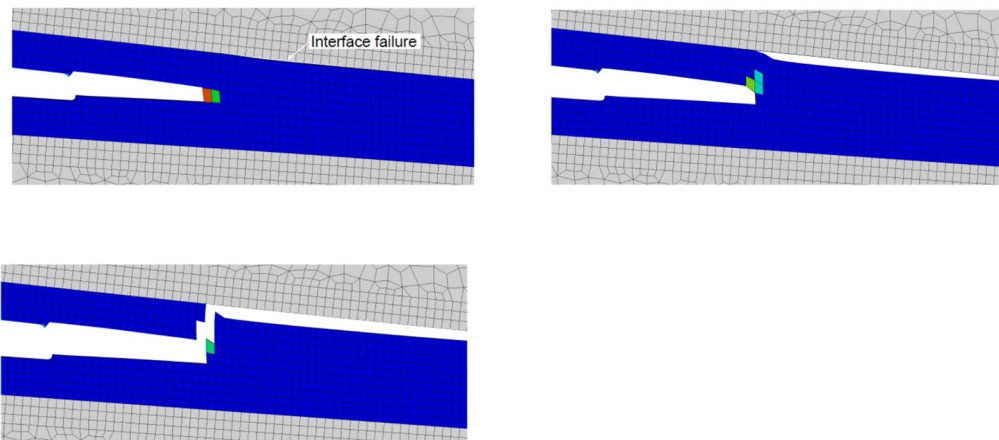


図5 混合モード荷重下におけるき裂偏向の様子。 の順に破壊が進行しき裂偏向が生じる

ここで、モードII成分が大きくなった場合、で発生する界面破壊が発生せず、結果としてき裂が接着剤内にとどまり、き裂偏向が生じないことがわかった。また、純粋モードI荷重下(DCB)においては、の応力三軸度の高い領域が斜めに発生せず、結果としてき裂が接着剤内を直線的に進展し、き裂偏向を生じないことがわかった。

以上のように、本研究によってCFRP接着破壊におけるき裂偏向の原因を、高分子材料と界面の材料特性を考慮に入れた上で、明らかにすることができた。これにより、接着・溶着部の力学的特性の実験的な評価方法を確立した。また、CFRP接着部における接着・溶着層内でのき裂進展経路の予測が可能になり、本研究の目的を達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 小林 充, 神鳥 哲, 吉村 彰記, 後藤 圭太, 荒井 政大	4. 巻 -
2. 論文標題 CFRP発泡コアサンドイッチ構造の極低温環境下における機械的特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本複合材料学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小林 充, 神鳥 哲, 後藤 圭太, 吉村 彰記, 荒井 政大
2. 発表標題 極低温におけるCFRP発泡コアサンドイッチ構造の面内圧縮特性
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉村 彰記, 若山 涼, 後藤 圭太, 荒井 政大
2. 発表標題 混合モード荷重下におけるCFRP接着接合の破壊形態遷移に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第64回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Wakayama, A. Yoshimura, M. Arai, K. Goto
2. 発表標題 Failure Mode Transition in Adhesively Bonded CFRP Joints Under Mixed-Mode Loading
3. 学会等名 17th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-17) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

この他、投稿論文1本(国際誌)の投稿を準備中である。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	後藤 圭太 (Goto Keita) (00760935)	名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター・准教授 (13901)	
研究 分 担 者	荒井 政大 (Arai Masahiro) (30260532)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------