

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2017～2019
課題番号：17H03475
研究課題名（和文）複合材構造ボルトレス化に向けた接着接合部繊維強化型クラックアレスタ技術基盤の構築

研究課題名（英文）Development of fiber-reinforcement-based crack arrester for composite bonded joints

研究代表者
水口 周（Minakuchi, Shu）
東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70512359
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複合材構造のボルトレス化を実現するための、独自の繊維強化型クラックアレスタ技術基盤を構築した。各種亀裂進展試験および有限要素解析を用いることで、亀裂停止効果を最大化させるアレスタ構成を検討し、疲労接着剥がれおよびTジョイントの剥離を抑制できることを実証した。また、層端部の応力集中を抑制するPly curving terminationを考案し、基礎的な検討により有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の航空機複合材構造は、硬化成形した部材を接合し構造に組み立てる際に剥離防止のためのボルト締結が大量に用いられているため、複合材料の優れた力学的特性・軽量性が十分には生かされておらず、また製造コストが従来金属構造に比べて非常に高い。本研究は接着接合の信頼性を向上させることを目的とした試みであり、ボルト締結部を大幅に削減する「ボルトレス化」により軽量化と低コスト化を同時に実現するものである。

研究成果の概要（英文）：This study developed a fiber-reinforcement-based crack arrester technology to realize boltless composite structures. Through crack propagation tests and finite element analysis, the optimal arrester configuration for maximizing the crack stopping effect was investigated, and it was demonstrated that fatigue disbond and T-joint failure could be suppressed. In addition, ply curving termination (PCT) was devised to suppress the stress concentration at ply edges, and its effectiveness was confirmed by basic experimental verification.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 接着接合 クラックアレスタ 亀裂抑制 応力集中

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

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適用が航空機主翼や胴体などの主構造へ進んできているが、硬化成形した部材を接合し構造に組み立てる際に剥離防止のためのボルト締結が大量に用いられているため、複合材料の優れた力学的特性・軽量性が十分には生かされておらず、また製造コストが従来金属構造に比べて非常に高い。そうしたなか接着接合を積極的に利用することでボルト締結部を大幅に削減する「ボルトレス化」により軽量化と低コスト化を同時に実現することに大きな期待が集まっている。具体的には接着部に剥離防止のために一定間隔で打たれているボルトを削減すること、またボルト締結のみで接合が行われている部分を接着接合に置換することが期待されている。そのためには接着信頼性の向上が必要であり、これまでに接着面前処理や非破壊検査に関する技術開発が進んできている。しかしながら、主として接着面の汚染に起因する接着不良や経年劣化さらには運用時損傷を起点として接着剥離が発生する可能性を排除することはできない。ボルトレス構造が耐空証明を取得しライフサイクルにわたって安全に運用されるためには、従来の剥離防止のボルト締結に代わって亀裂を停止させる内部機構「クラックアレスタ」を接着接合部に付与し損傷許容性を高めることが不可欠である。欧州を中心に技術開発が進んでいるものの、従来のボルト締結に匹敵する損傷許容性を有する機構の構築には至っていない。

こうした状況のもと、当研究グループでは独自の「繊維強化型クラックアレスタ」を考案し基礎的な検討を進めてきている。基本的なアイデアは炭素繊維などの高強度連続繊維を接着層に導入することで亀裂が発生した際に大量の繊維架橋を発生させて亀裂の進展を抑制するというものである。下図右にその一例である X 型アレスタを示す。X 型アレスタは長手方向に繊維方向を有する 2 つの 0° 層を交差させ、その間に繊維が直交する 90° 層を挿入した構成になっている。亀裂がアレスタに接近するとまず①亀裂をアレスタ内に誘導し、次に亀裂先端が交差部を通過すると②0°層が繊維架橋し亀裂の開口を抑制、さらには 90°層からの拘束により③架橋した 0°層が剥離するのを抑制する 3 段階のステップで亀裂を停止する。亀裂がさらに進展するためには架橋した 0°層あるいはそれを拘束する 90°層の繊維を切断する必要があるため、高い亀裂進展抵抗が期待できる。

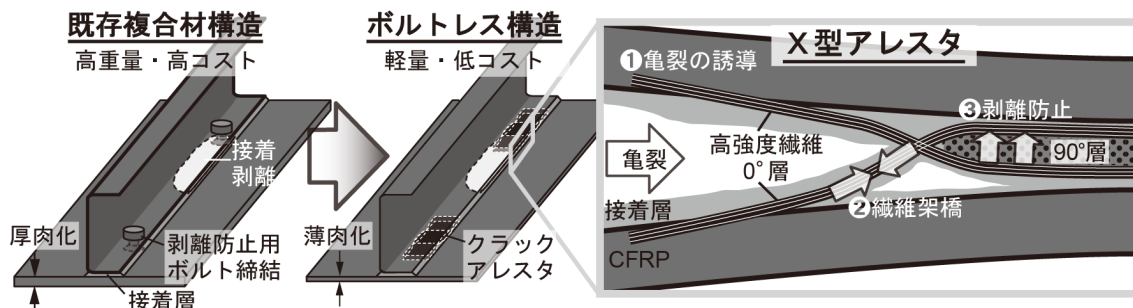


図1 ボルトレス化(左)と繊維強化型クラックアレスタ(右)

2. 研究の目的

本研究では、繊維強化型クラックアレスタを対象に、亀裂停止性能を最大化させるアレスタの構成について検討を進め、疲労試験環境下において接着亀裂の抑制を実証する。また、このアレスタ基盤技術を実用構造の一形態である複合材 T ジョイントに適用し、技術の成熟度を向上させる。

3. 研究の方法

最適なクラックアレスタ構成の探索のため、各種亀裂進展抑制試験と有限要素解析を組み合わせた検討を行う。X 線 CT 観察および内部応力計算に基づいて破壊メカニズムを明らかにし、所望の亀裂停止特性を有するクラックアレスタ構成を決定する。また、疲労接着亀裂停止および T ジョイントの破壊抑制については、アレスタを導入しない試験片との比較を通してその有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 疲労接着亀裂の抑制

繊維強化型クラックアレスタを用いて疲労接着亀裂の停止について検証を実施した。実構造での荷重状態を模擬する試験として、補強材終端部等を想定した Crack Lap Shear 試験を用いて引張-引張疲労負荷下で接着亀裂を進展させた。初期においては負荷サイクルに比例して亀裂長さが増加したが、亀裂先端がアレスタ繊維交差部を通過すると亀裂進展速度が著しく低下し、最終的に停止することを確認した。アレスタの材料構成および厚みを変化させることで亀裂停止効果が顕著になる亀裂長さが変化することも明らかにした。次に試験を模擬した有限要素解析を実施し、仮想き裂開口積分法を用いて亀裂先端のエネルギー解放率を計算した。亀裂先端がアレスタ繊維交差部を通過すると、亀裂面で多量の繊維架橋が発生することで亀裂の開口と接

着境界で発生する偏心による 2 次曲げを抑制することで亀裂先端での応力集中が抑制されることが分かった。また高い生産性と亀裂誘導性を備えるアレスタ導入方法として、被着材の表層を交差繊維層に併用する新たな製造法を構築した。作製した試験片を用いて疲労接着亀裂の停止を実証し、X 線 CT 観察を用いた観察から高い成形品質と亀裂の誘導性を両立可能であることを確認した。

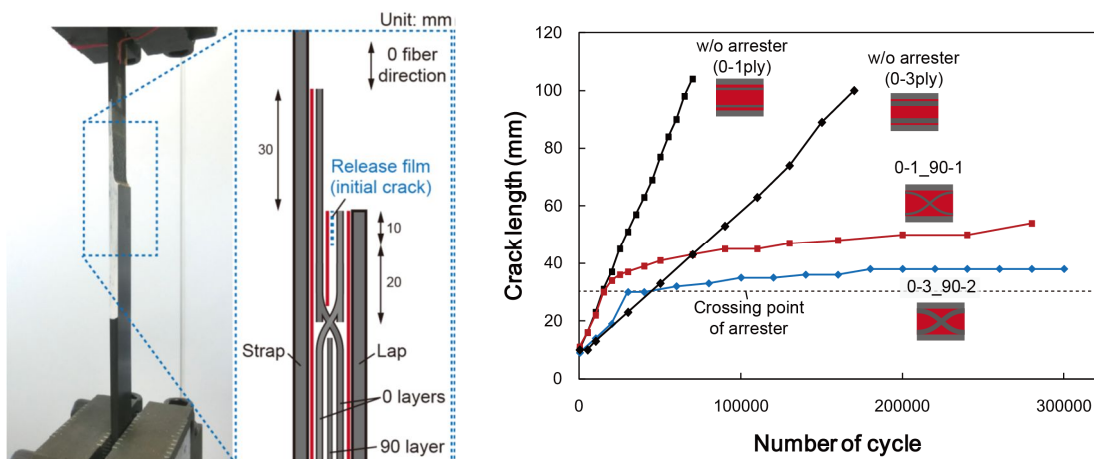


図 2 Crack Lap Shear 試験 (左) での疲労亀裂の抑制 (右)

(2) アレスタ構成の影響評価

亀裂停止性能を最大化させる繊維強化型クラックアレスタの構成に関して評価を行った。具体的には交差部 0° 材と 90° 材の厚みの異なる Double Cantilever Beam 試験片を作製し亀裂進展試験を実施した。90° 材を厚くすることで亀裂進展荷重を向上させることが出来る一方で、0° 材の早期破壊を招くことが分かった。有限要素解析により、アレスタ交差部近傍で応力が最大になる位置がアレスタ構成によって変化することを明らかにし、亀裂進展抑制効果に直結するエネルギー吸収特性が最大化される構成として、0° 材を厚く 90° 材を薄くしたアレスタ構成を考案した。

(3) T ジョイントの剥離進展抑制

T ジョイントは航空機構造において、縦と横の部材を結合する役割を担うが、強度が低くまたそのばらつきも大きい。さらには成形残留応力や製造欠陥により、内部に亀裂が発生することもある。T ジョイントの信頼性向上のためには、これら初期破壊からの亀裂進展を抑制する必要がある。そこでフランジ/スキン界面に繊維強化型アレスタを導入し、T ジョイントの最終破壊を遅延させることを試みた。アレスタの導入により初期破壊荷重を低下させずに亀裂進展抵抗を著しく向上できること、また繊維強化型アレスタの導入位置および交差繊維構成によって亀裂停止特性が変化することを明らかにした。アレスタを導入したフランジ/スキン界面以外にも複数個所で亀裂が発生したが、最終破壊はアレスタが破損するまで生じず、フランジ/スキン界面にアレスタを導入することの高い有効性が確認された。

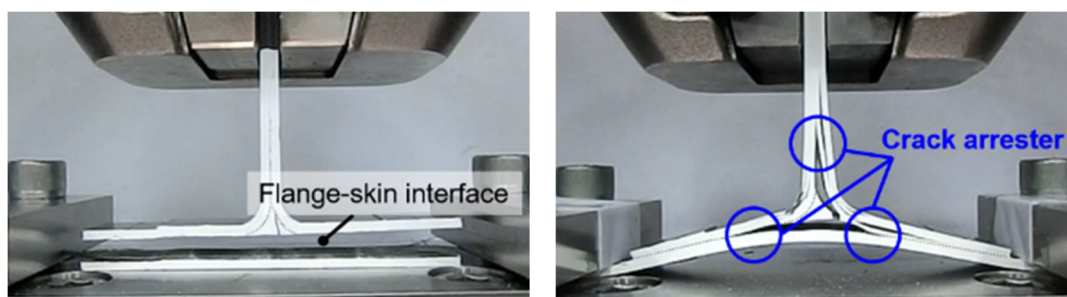


図 3 T ジョイントの剥離抑制 ((左) アレスタなし、(右) アレスタあり)

(4) 層端剥離抑制機構の考案と実証

アレスタの亀裂停止機能を評価している際に、アレスタが端部から剥離し、アレスタ自体が破壊する場合があるという課題があった。そこで、層端部での応力集中を抑制するため、層端部の繊維を局所的に屈曲させる Ply Curving Termination(PCT)を提案し基礎的な検証を行った。終端層を有する代表的部位であるプライドロップオフの剥離抑制や積層板の端面剥離や樹脂亀裂の抑制に高い効果があることを有限要素解析と実証試験によって確認した。さらに、従来は不連続短繊維を用いて行われていた複雑形状部材の伸張成形への適用性を検討するため、PCT を応

用した繊維屈曲材の成形性評価も行った。屈曲部が高い伸張性を有すること、またこの繊維屈曲材には短繊維材のような応力集中部となる繊維端を含まないことから、引張疲労特性が著しく向上することを確認した。

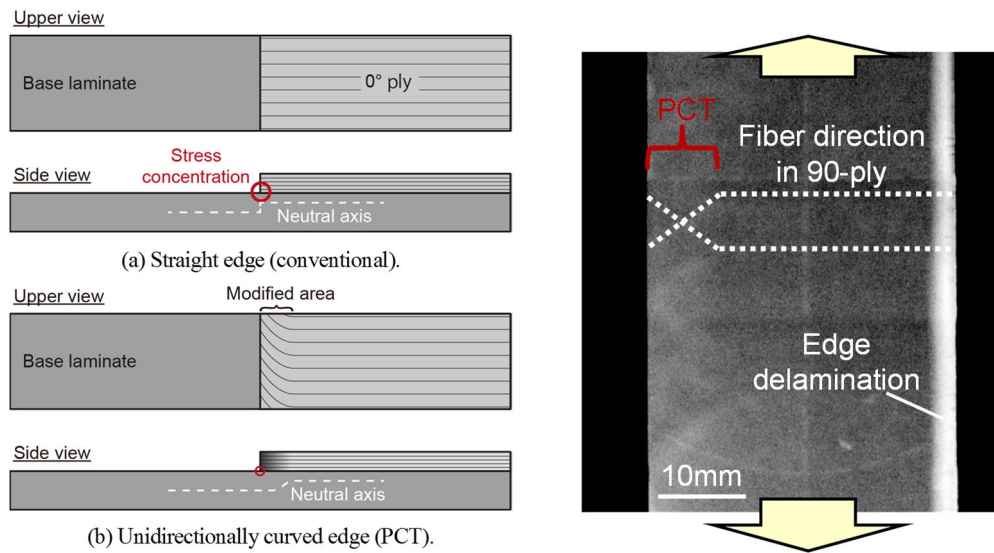


図3 PCTの概要(左)と端面剥離の抑制(右)

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 S. Hisada, S. Minakuchi, N. Takeda	4. 巻 未定
2. 論文標題 Effect of interlocking fiber configuration on mode-I disbond arresting in composite bonded joints	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SAMPE JOURNAL	6. 最初と最後の頁 未定
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14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Minakuchi S., Takeda N.
2. 発表標題 Ply Curving Termination to Suppress Delamination in Composite Ply Drop-Off
3. 学会等名 The International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity (ICAF) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shu Minakuchi, Nobuo Takeda
2. 発表標題 Ply curving termination: suppressing delamination in tapered composites
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Hisada, Shu Minakuchi, Nobuo Takeda
2. 発表標題 Process-induced failure of deltoid in composite T-joint: fiber-optic based monitoring and numerical simulation
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shu Minakuchi, Nobuo Takeda
2. 発表標題 Ply curving termination:suppressing delamination in composite ply drop-off
3. 学会等名 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水口周, 武田展雄
2. 発表標題 Ply Curving Terminationを用いた複合材剥離抑制
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水口周, 武田展雄
2. 発表標題 Ply Curving Terminationによるトランスバースクラックと端面剥離の抑制
3. 学会等名 第 11回 日本複合材料会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsaku Hisada, Shu Minakuchi and Nobuo Takeda
2. 発表標題 CRACK PROPAGATION SUPPRESSION IN COMPOSITE T-JOINT USING FIBER-REINFORCEMENT-BASED CRACK ARRESTER
3. 学会等名 18th European Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久田深作, 水口周, 武田展雄
2. 発表標題 繊維強化型クラックアレスタを用いた複合材T-jointの損傷許容性向上
3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinsaku Hisada, Shu Minakuchi, Nobuo Takeda
2. 発表標題 Enhancing Damage Tolerance of Composite T-joint Using Fiber-Reinforcement-Based Crack Arrester
3. 学会等名 American Society for Composites 33rd Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shu Minakuchi and Nobuo Takeda
2. 発表標題 Arresting Fatigue Crack in Composite Bonded Joint using Fiber-Reinforcement Design Feature
3. 学会等名 International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity ICAF2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shu Minakuchi and Nobuo Takeda
2. 発表標題 ARRESTING CRACK IN COMPOSITE BONDED JOINT UNDER FATIGUE USING FIBER-REINFORCEMENT-BASED FEATURE
3. 学会等名 SAMPE Seattle 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shu Minakuchi and Nobuo Takeda
2. 発表標題 ARRESTING FATIGUE CRACK IN COMPOSITE BONDED JOINT USING INTERLOCKED FIBER FEATURE
3. 学会等名 21st International Conference on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shu Minakuchi and Nobuo Takeda
2. 発表標題 STOPPING FATIGUE CRACK IN COMPOSITE BONDED JOINT USING INTERLOCKED FIBER FEATURE
3. 学会等名 15th European-Japanese Meeting on Composite Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久田深作, 水口周, 武田展雄
2. 発表標題 繊維強化型クラックアレスタを用いた複合材T-jointの亀裂進展抑制
3. 学会等名 第9回日本複合材料会議
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 複合材料、積層構造体、航空機の翼及び複合材料の製造方法	発明者 水口周, 武田展雄	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2017-253113	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----