

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 24 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560096

研究課題名(和文) 繊維強化複合材料における微視破壊クライテリオンを基にした損傷進展予測手法の確立

研究課題名(英文) Development of damage growth prediction methodology based on microscopic fracture criterion in fiber reinforced composites

研究代表者

荻原 慎二 (OGIHARA, Shinji)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：70266906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)： 軽量・高剛性・高強度の特徴を有する連続繊維強化積層型複合材料・構造のより効果的設計法構築の基礎のため、微視破壊クライテリオン(マイクロフラクチャクライテリオン)をベースとした損傷発生・進展挙動予測手法を検討した。すなわち、繊維、マトリックス及び界面それぞれの破壊クライテリオンを実験的に明らかにし、それらとプライレベルの損傷発生・進展挙動の関係を検討し、プライレベル損傷発生・進展挙動予測手法を構築した。

研究成果の概要(英文)： Towards the development of effective design methodology for continuous fiber reinforced laminated composite materials/structures which has the advantages of light weight, high stiffness and high strength, we investigated the prediction method of the damage initiation and propagation based on the microscopic fracture criterion. We experimentally clarified the fracture criterion of fibers, matrix and interface and investigated their relation to the ply-level damage initiation/propagation behavior, which lead us to the ply-level damage initiation/propagation prediction methodology.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：炭素繊維強化プラスチック ガラス繊維強化プラスチック 複合材料 界面強度 微視的損傷 界面はく離 破壊クライテリオン 単繊維モデル複合材料

1. 研究開始当初の背景

連続繊維強化積層型複合材料は、一方向に強化されたプライを積層したものであり、各プライは繊維方向には高強度であるが、それに直角な方向及び積層方向には強度は低い。よって、積層複合材料では負荷過程において、オフアクシスプライにマトリックスクラック、層間に層間はく離が生じ、複合材料全体の剛性および強度の低下が起こるため、マトリックスクラック発生荷重あるいは層間はく離発生下での圧縮強度が設計基準となることがある。さらに、このような損傷発生条件が明らかでないため、実際の設計では安全率を大きくせざるを得ない。これが、複合材料の性能を十分に発揮させているとは言えない状況を生んでいた。さらに、一方、複合材料構造の損傷発生・進展に関する研究は数多く行われているが、マトリックスクラックに関してはプライレベルのスケールで取り扱うものがほとんどで、層間はく離についてもマクロな破壊力学に基づくものがほとんどである。すなわち、繊維とマトリックスを区別するマイクロメカニクスに基づいて、微視破壊クライテリオンとプライレベル損傷挙動との関係を考えた研究は数少ない状況にあった。

2. 研究の目的

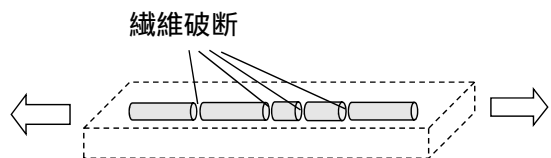
申請者は自ら従来進めてきた複合材料のプライレベルの損傷発生・進展解析とともに、近年、よりミクロなレベルでの微視破壊クライテリオン（マイクロフラクチャクライテリオン）の構築について一定の成果を収めつつあるので、その研究成果を踏まえ、次のステップとして、微視破壊クライテリオンとプライレベル損傷発生・進展挙動との関係を実験的に明らかにし、微視破壊クライテリオンを基にしたプライレベル損傷発生・進展挙動予測手法確立へと研究を進展させることを目的としている。

3. 研究の方法

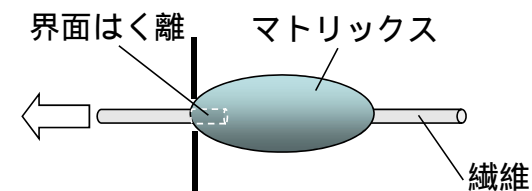
(1)モデル複合材料を用いた界面微視破壊クライテリオンの実験的評価

単繊維とマトリックス樹脂とを組み合わせた試験片を用いて、1.フラグメンテーション試験、2.マイクロボンド試験、3.Cruciform試験（図1）を行い、界面特性の評価、また界面破壊クライテリオンの実験的評価を行う。フラグメンテーション試験では、単繊維を引張方向に埋め込んだ試験片に対し引張試験を行い、繊維多重破断を起こさせ、その破断プロセス、および最終多重破断状態から、繊維強度分布や繊維マトリックス界面特性（界面応力伝達性やはく離強度）を推定する。マイクロボンド試験では、繊維にマトリックス樹脂の液滴を付着・硬化させ、繊維引き抜きを起こさせることで、界面せん断応力を求める。また、Cruciform試験では、引張方向に垂直に繊維を埋め込んだ試験片を使

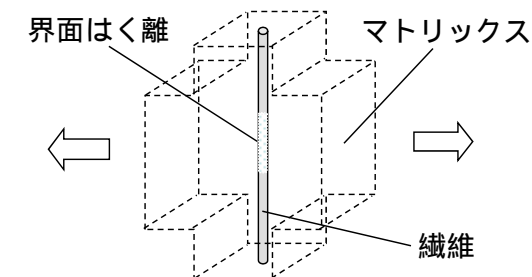
用するが、自由縁での応力の特異性をさけるために試験片を十字架型にする方法である。これにより界面引張強度を測定するものである。申請者は新たに、繊維を引張方向に垂直にするだけでなく、任意の角度傾けた方法を開発し、組み合わせ応力下での界面破壊クライテリオンを求める提案を行っている。また、繊維の引張試験、マトリックスの引張試験により、繊維強度分布の測定とマトリックス力学挙動の実験的評価を行う。



(a)フラグメンテーション試験



(b)マイクロボンド試験



(c)Cruciform試験

図1 単繊維埋蔵界面特性評価試験

(2)複合材料積層板のプライレベル損傷挙動の実験的把握

航空宇宙用先進複合材料として CFRP 一方向強化積層板、数種の多方向積層板（クロスプライ積層板、アングルプライ積層板、擬似等方積層板）を作製し、種々の面内負荷、面外負荷を与え、変形挙動、損傷発生・進展挙動、強度特性を得る。自作その場観察用負荷装置（光学顕微鏡などに装着し損傷進展プロセスをその場観察する）を用い、あるいは、必要に応じて試験機から取り外し、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、軟 X 線探傷装置を用いた損傷状態の観察を行い、負荷レベルと損傷状態の関係を実験的に明らかにする。損傷としては、マトリックスクラック及び層間は

く離を考へるが、積層構成、負荷形態により、その発生順序、発生負荷レベルが異なると思へられる。本研究では、それを実験的に明らかにする。

(3) プライレベル損傷を考慮した複合材料積層板の応力解析

得られた実験結果をまず従来のプライレベルでの力学での説明を試みる。その後、FEM解析などから得られるミクロ応力分布データを得る。さらに、実験的に得られたモデル複合材料の微視破壊クライテリオンとの比較を行う。これにより、モデル複合材料を用いた微視破壊クライテリオンが、複合材料積層板のプライレベル損傷発生条件として使用可能か検討する。材料の微視的拘束条件や熱残留応力の発生状態の相違から、複合材料積層板の結果とモデル複合材料の結果が必ずしも対応しないことが考えられるので、この補正をどのように行うか検討する。

(4) 構築した複合材料プライレベル損傷挙動予測モデルの妥当性の検討及び耐損傷性材料開発へのフィードバック

構築した微視破壊クライテリオンを基にしたプライレベル損傷挙動予測手法の妥当性を検討する。いくつかの複合材料積層板を想定し、損傷発生・進展プロセスを予測し、実験結果と比較し、その妥当性を検討する。損傷挙動の予測には、結合力要素を用いた有限要素法による数値モデルの検討を行う。さらに、耐損傷性複合材料開発のための繊維・マトリックス・界面特性の組み合わせを検討し、新規材料開発へのフィードバックを行いその指針を得ることを試みる

4. 研究成果

平成 23 年度は、単繊維とマトリックス樹脂とを組み合わせた試験片を用いて、1. フラグメンテーション試験、2. マイクロボンド試験、3. Cruciform 試験を行い、界面特性の評価、また界面破壊クライテリオンの実験的评价を行った。フラグメンテーション試験では、単繊維を引張方向に埋め込んだ試験片に対し引張試験を行い、繊維多重破断を起こさせ、その破断プロセス、および最終多重破断状態から、繊維強度分布や繊維マトリックス界面特性（界面応力伝達性やく離強度）を推定した。マイクロボンド試験では、繊維にマトリックス樹脂の液滴を付着・硬化させ、繊維引き抜きを起こさせることで、界面せん断応力を求めた。

平成 24 年度は、前年度行った単繊維モデル複合材料による組み合わせ応力下での界面破壊クライテリオン（図 2）の結果を踏まえ、CFRP 一方向強化積層板、数種の多方向積層板（クロスプライ積層板、アングルプライ積層板、擬似等方積層板）を作製し、種々の面内負荷、面外負荷を与え、変形挙動、損傷発生・進展挙動、強度特性を得る。自作そ

の場合観察用負荷装置（光学顕微鏡などに装着し損傷進展プロセスをその場観察する）を用い、あるいは、必要に応じて試験機から取り外し、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡、軟 X 線探傷装置を用いた損傷状態の観察を行い、負荷レベルと損傷状態の関係を実験的に検討した。

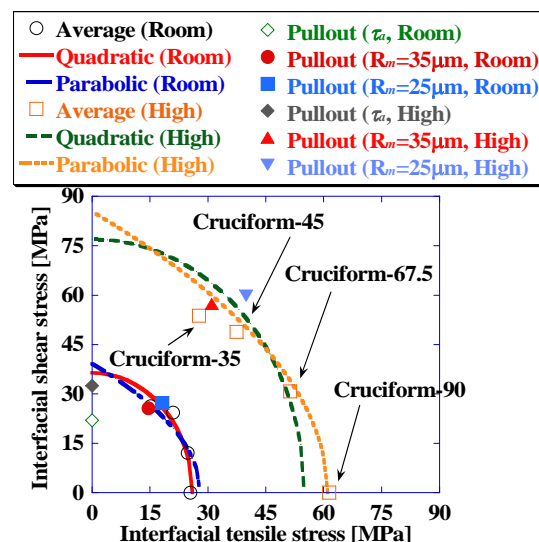


図 2 界面破壊クライテリオン

平成 25 年度は、軽量・高剛性・高強度の特徴を有する連続繊維強化積層型複合材料・構造のより効果的設計法構築の基礎のため、微視破壊クライテリオン（マイクロフラクチャクラテリオン）をベースとした損傷発生・進展挙動予測手法を検討した。すなわち、繊維、マトリックス及び界面それぞれの破壊クライテリオンを実験的に明らかにし、それらとプライレベルの損傷発生・進展挙動の関係を検討し、プライレベル損傷発生・進展挙動予測手法を構築した。

マトリックスクラックや層間はく離発生抑制のためのマトリックス樹脂の開発方針は、単に破断のびの大きい樹脂の開発、あるいは高靱性の樹脂の開発として行われている。しかしながら、複合材料の特性は組み合わせられる繊維との接着性、繊維体積含有率、最終的に作製される積層構造、に左右されるものであり、それらを考えないで効果的な材料開発は行えない。本研究では、マイクロメカニクスに根拠をおいた材料開発指針を得ることを目指した。

従来、積層型複合材料を作製する場合、材料開発者が与えたプライ特性を用いて、構造設計者が所望の特性を持った積層構造を設計する。その後、マトリックスクラックや層間はく離発生予測解析および実験的検証を行う。この方法では、効果的な構造設計を行っているとは言えない。本研究では、複合材料構成材料の微視破壊クライテリオンからプライレベル損傷挙動予測を目指した。本研

究により、プライレベル損傷発生・進展挙動予測が可能になれば、複合材料本来の性能を發揮させた設計・使用の実現への基礎となるものと考えられる。

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7件)

中谷隼人, 中谷健志, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 繊維不連続部を有する一方向強化 CFRP 積層板の損傷挙動, 日本機械学会論文集中(A編), 査読有, 79 巻 799 号, 294-303, 2013

Jun Koyanagi, Hayato Nakatani and Shinji Ogihara, Comparison of glass-epoxy interface strengths examined by cruciform specimen and single-fiber pull-out tests under combined stress state, Composites Part A, 査読有, Vol.43, No.11, 1819-1827, 2012

DOI:10.1016/j.compositesa.2012.06.018

中谷隼人, 上野拓也, 荻原慎二, 武田展雄, 青木雄一郎, 武田真一, 永尾陽典, 切欠きを有するノンクリンプ織物 VaRTM 複合材の引張特性, 材料, 査読有, 第 61 巻第 7 号, 642-647, 2012, DOI: 10.2472/jsms.61.642

中谷隼人, 高木健児, 小池朝夫, 荻原慎二, プライ厚の異なる CFRP アンギュラプライ積層板の非線形力学挙動, 材料, 査読有, 第 61 巻, 第 6 号, 515-521, 2012

DOI: 10.2472/jsms.61.515

鹿島彰浩, 小柳潤, 荻原慎二, 十字型試験片法によるガラス繊維/エポキシ界面のはく離発生位置を考慮した界面はく離クライテリアの検討, 日本複合材料学会誌, 査読有, 37 巻, 6 号, 216-225, 2011

吉村彰記, 野路洋平, 小笠原俊夫, 横関智弘, 荻原慎二, 極低温環境下における CFRP 接着結合モード II 破壊靱性, 日本複合材料学会誌, 査読有, 37 巻, 4 号, 130-137, 2011

Jun Koyanagi and Shinji Ogihara, Temperature Dependence of Glass Fiber/Epoxy Interface Normal Strength, Composites Part B, 査読有, Vol.42, 1492-1496, 2011

DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.04.041

[学会発表](計12件)

Hayato Nakatani, Nurul Nabihah A.Hamid and Shinji Ogihara, Mechanical Properties in Quasi-Isotropic CFRP Laminates with Small Ply Orientation Mismatch, The 13th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE-13), WINC Aichi (Nagoya), 2013.11.12

光宗大貴, 猫島悠平, 中谷隼人, 荻原慎二, CFRP/チタン薄膜ハイブリッド積層板の引張強度に及ぼす界面破壊靱性の方向依存

性の影響, 日本機械学会第 21 回機械材料・材料加工技術講演会, 首都大学東京, 2013.11.10

高橋征大, 荻原慎二, 中谷隼人, 円孔を有する CFRP/チタン薄膜ハイブリッド積層板の損傷進展挙動, 日本機械学会第 21 回機械材料・材料加工技術講演会, 首都大学東京, 2013.11.10

Ogihara, Nonlinear Mechanical Response in CFRP Angle-Ply Laminates, The 13th Japan-Euro Conference on Composite Materials, EMC2 Technocampus, Nantes, France, 2013.11.5

Akinori Yoshimura, Kazuya Nagakura, Sho Fukuda, Tomonaga Okabe, Toshio Ogasawara and Shinji Ogihara, Damage Simulation of High-Velocity Projectile Impact of CFRP Laminates, The 13th Japan-Euro Conference on Composite Materials, EMC2 Technocampus, Nantes, France, 2013.11.4

中谷隼人, 中谷健志, 永田優, 小柳興瑤, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 繊維不連続部を有する CFRP 積層板の力学挙動, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 岐阜大学, 2013.10.12

中谷隼人, 梶原堅太郎, 秋田貢一, 荻原慎二, ラミノグラフィによるファイバメタル積層板の衝撃損傷の非破壊観察, 2013 年度 JCOM 若手シンポジウム, 金沢工業大学やつかほりサーチキャンパス(石川), 2013.8.23

永田優, 小柳興瑤, 中谷隼人, 松葉朗, 河野洋輔, 荻原慎二, 層間高靱性型 CFRP 積層板の力学的特性に及ぼす繊維不連続部の影響, 第 38 回複合材料シンポジウム, 鹿児島大学, 2013.9.26

中谷隼人, 梶原堅太郎, 秋田貢一, 荻原慎二, 衝撃損傷を有する Ti/CFRP 積層板のラミノグラフィによる非破壊評価, 第 38 回複合材料シンポジウム, 鹿児島大学, 2013.9.24

Shinji Ogihara and Hayato Nakatani, Effect of Constituent Ply Thickness on Mechanical Properties in CFRP Angle-Ply Laminates, The 15th US-Japan Conference on Composite Materials, Sheraton Arlington Hotel, Arlington, Texas, USA, 2012.10.3

Shinji Ogihara and Hayato Nakatani, Effect of Ply Thickness on Mechanical Properties in CFRP Angle-Ply Laminates, 15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 2012.6.25

Shinji Ogihara, Hayato Nakatani, Ichiro Ueno, Jun Koyanagi, Kenichiro Watanabe and Satoshi Kobayashi, Experimental Evaluation of Interfacial Failure Criterion in a Glass Fiber/Epoxy Composite, The 18th International Conference on Composite Materials (ICCM-18), ICC Jeju, Jeju, Korea, 2011.8.23

6 . 研究組織

(1)研究代表者

荻原 慎二 (OGIHARA, Shinji)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：70266906