

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560086  
 研究課題名（和文）航空宇宙用先進複合材料・構造のマイクロフラクチャクライテリオンの構築  
 研究課題名（英文）Development of Microfracture Criterion in Advanced Composite Materials/Structures for Aerospace Application  
 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 准教授  
 研究者番号：70266906

## 研究成果の概要：

航空宇宙用先進複合材料・構造のマイクロフラクチャクライテリオンを構築することを目的に GF/Epoxy モデル複合材料を用いて界面はく離の発生，進展挙動を観察し，Straight 試験片及び Cruciform 試験片におけるそれらの差異を実験的に明らかにした。また，FEM 解析により Cruciform 試験片を用いることで Straight 試験片にあるような端面の応力特異性影響を避け，界面の引張強度を評価できることを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,200,000	0	2,200,000
2007 年度	700,000	210,000	910,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	420,000	4,020,000

## 研究分野：複合材料工学

科研費の分科・細目：5001（機械工学（機械材料・材料力学））

キーワード：複合材料，ガラス繊維，エポキシ樹脂，界面，破壊，マイクロフラクチャクライテリオン，十字型試験片

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素繊維などを強化材とする先進複合材料は軽量かつ高剛性，高強度を有することから航空・宇宙分野での期待が大きく，これまで多くの材料が開発されてきた。航空・宇宙分野での使用を考えた構造材料では，極限環境においてその性能を十分に発揮させることが重要であり，この点から連続繊維強化積層型複合材料が期待される。材料開発の面からこれまでの研究の流れを概観すると，繊維はより高強度なもの，あるいはより高剛性なものに分かれて開発が進んでいる。一方，

マトリックスとしては，樹脂系においては，大きな流れとして，より耐熱性を有するもの，あるいは，より高靱性なもの，を目指して開発されている。

(2) 連続繊維強化積層型複合材料は，一方方向に強化されたプライを積層したものであり，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る。

## 2. 研究の目的

繊維強化複合材料において、繊維とマトリックス間の界面は複合材料の力学的特性に重要な役割を果たしている。よって繊維強化複合材料をいっそう優れた材料として活用するためには、界面のより高精度な評価が必要である。界面特性を評価する手法として、様々なものを用いられている。このうち、Cruciform 試験片を用いた界面の引張強度を求める方法は端面での応力特異性の影響を避ける事に特徴がある。

本研究では、GF を繊維、エポキシをマトリックスとしたモデル材料について Cruciform 試験片の有用性を実験的及び解析的に検証することを目的とする。すなわち、Cruciform 試験片及び、通常の試験片(Straight 試験片)の界面はく離発生、進展挙動を実験的に明らかにする。また、有限要素法を用いた応力解析を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 実験には、引張荷重方向に直角な方向に繊維を持つ単繊維複合材料を用いた。本研究では繊維に GF(直径 13 $\mu$ m)、マトリックス(エポキシ)にはエピコート 828 を主剤に TETA (Triethylenetetramine) を硬化剤にしたものを用いた。試験片形状としては、Straight 試験片と Cruciform 試験片を用意した。

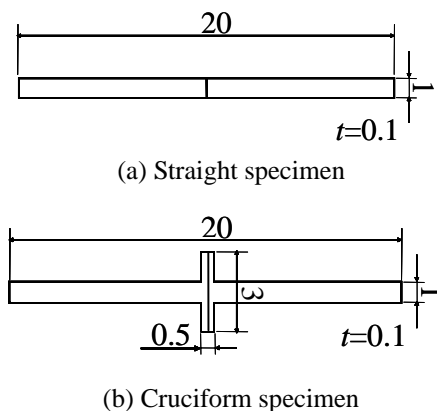


図 1 Schematic of specimens

(a) Straight specimen and (b) Cruciform specimen

図 1 にそれぞれの試験片形状を示す。それぞれの試験片について、引張試験を光学顕微鏡のステージに取り付けた小型負荷装置を用いて行った。負荷過程における界面はく離発生、進展のプロセスを光学顕微鏡により観察した。繊維から反射される光を強調するために繊維に垂直に両端から光を当てた。引張速度は 0.05mm/min で行った。

(2) 実験で用いた試験片形状での応力分布を FEM 解析 (MSC.Marc.) によって調べた。Cruciform 試験片のモデル図を図 2 に示す。試験片は  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸に対称な形状であるため、1/8 モデルにし、応力勾配の大きい領域である端面と界面の周辺は要素を細かく設定した。要素は 8 節点立体要素を使用し、線形弾性問題として解析した。拘束条件はそれぞれの対称面に拘束し、 $y$  方向に 1% のひずみをモデルの上部に与えた。解析に用いた材料特性と要素数を Table 1 に示す。

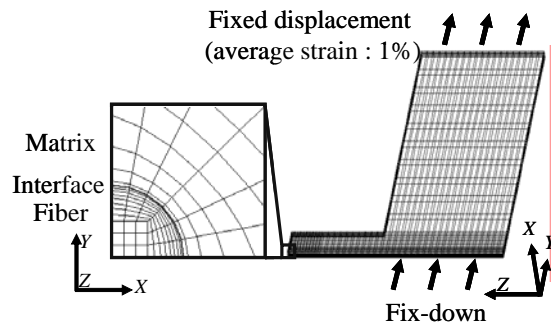


図 2 Schematic of a finite element analysis models

Table 1 Material properties and number of elements

	Young's modults		Number of elements	
	$E$ (GPa)	Poisson's ratio $\nu$	Straight-GF	Cruciform-GF
GF	70	0.2	1026	1995
Epoxy	4.28	0.42	3510	5325

## 4. 研究成果

(1) 図 3 及び図 4 にそれぞれ Straight 試験片及び Cruciform 試験片で観察された界面はく離発生、進展の状態を示す。Straight 試験片では、Cruciform 試験片に比較して低応力で端面からはく離が発生し、応力の増大とともに進展していく様子が観察された。Cruciform 試験片では Straight 試験片に比較し、高応力ではく離が発生するが、その際、試験片端面からの発生ではないことが確認できた。また、発生後のはく離の進展は Straight 試験片に比較して急激であった。

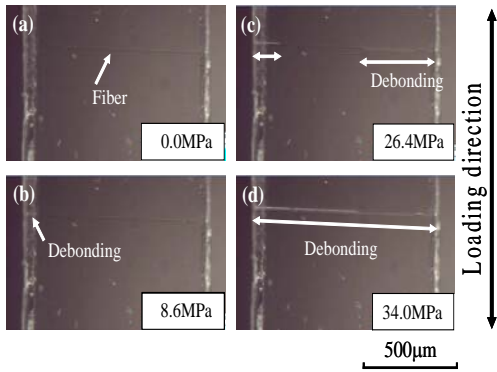


図 3 Debonding initiation and progress in a Straight specimen

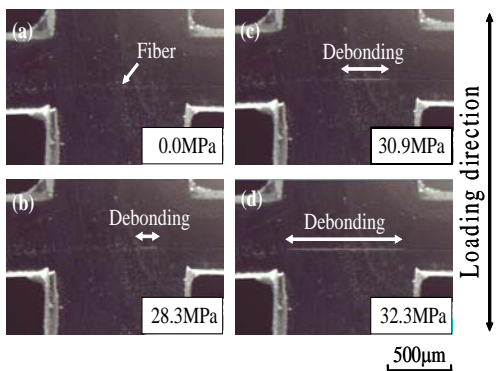


図 4 Debonding initiation and progress in a Cruciform specimen

(2) 図 5 は Straight 試験片及び Cruciform 試験片についての界面垂直応力の繊維方向での変化を示す。界面垂直応力は試験片平均応力 (Specimen average stress と呼ぶ) によって正規化した値 (応力比と呼ぶ) を使用している。Straight 試験片では、試験片端面での応力特異性の影響を受け、試験片端面付近では応力が非常に大きくなっていることがわかる。また Cruciform 試験片では、試験片端面での応力がゼロに近く、Straight 試験片のように端面での応力特異性の影響を受けないことが窺える。これより実験で得られたはく離発生挙動が証明される。また Cruciform 試験片での応力比は中央部分で 1.46 となった。よって、はく離発生時の平均応力にこの応力比をかけることで、はく離発生時の界面垂直応力(界面引

張強度)を求めることができると考えられる。図 6 に実験により得られた、はく離発生時の Straight 試験片の試験片平均応力、Cruciform 試験片の平均応力及びそれに応力比をかけて求めた界面垂直応力を示す。それぞれの平均値は 10.9MPa, 30.8MPa, 45.5MPa となった。これより、この系での界面引張強度は 45.5MPa と推定される。

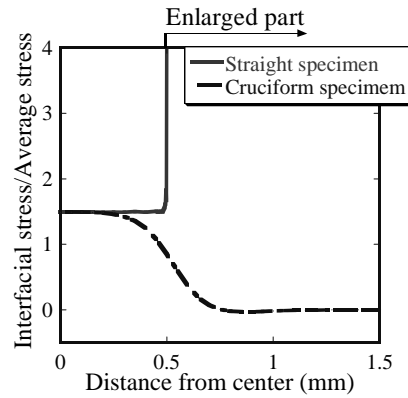


図 5 Relation between interfacial stress/specimen average stress

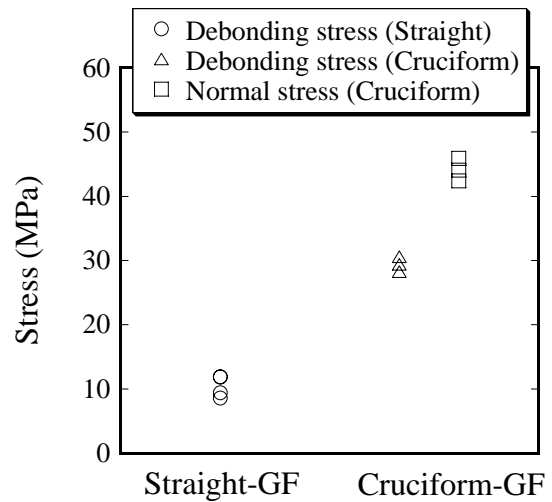


図 6 Debonding initiation stress and modified stress values by the stress ratio

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 22 件)

①小柳潤, 加藤肇, 荻原慎二, Cruciform Specimen法による繊維/樹脂界面破壊クライテリアン確立手法の解析的検討, 材料システム, 第27巻, 63-69, 2009.3, 査読有

② Keiji Ogi, Shigeki Yashiro, Manabu Takahashi and Shinji Ogihara, A Probabilistic Static Fatigue Model for Transverse Cracking in CFRP Cross-Ply Laminates, Composites Science and Technology, 69, 469-476, 2009.2, 査読有

③荻原慎二, 坂本頼昭, 小柳潤, Cruciform Specimen法を用いたガラス繊維/エポキシ樹脂界面の引張強度評価, 日本機械学会論文集(A編), 第75巻, 第749号, 49-55, 2009.1, 査読有

④Shinji Ogihara, Evaluation of Mode III Interlaminar Fracture Toughness of Laminated Composites, Science and Engineering of Composite Materials, Vol.15, No.4, 303-311, 2008.12

[学会発表] (計 86 件)

①荻原慎二, 加藤肇, 鹿島彰浩, 五十嵐雄一, 小柳潤, Cruciform Specimen (十字型試験片)法を用いた複合材料界面強度評価, 第33回複合材料シンポジウム, 北海道大学, 2008.10.27

② Shinji Ogihara and Hajime Kato, Interfacial Strength Evaluation in Glass Fiber Reinforced Composites Using the Cruciform Specimen Method, The 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2008), Northwestern University, Evanston, USA, 2008.10.9 (Paper No. MSEC\_ICMP2008-72281)

③ Shinji Ogihara and Hajime Kato, Interfacial Strength Evaluation in Glass Fiber Reinforced Composites Using the Cruciform Specimen Method, The 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P 2008), Northwestern University, Evanston, USA, 2008.10.8, Poster Presentation (Paper No. MSEC\_ICMP2008-72593)

④ Shinji Ogihara and Hajime Kato, Evaluation of Interfacial Strength in a Glass Fiber/Epoxy Composite with the Cruciform Specimen Method, The Seventh Joint Canada-Japan Workshop on Composites (Poster Presentation), Shonan Institute of Technology, 2008.7.28

⑤ Shinji Ogihara, Yoriaki Sakamoto, Hajime Kato, Satoshi Kobayashi and Ichiro Ueno, Interfacial Strength Evaluation in a Glass Fiber Reinforced Composite Using Cruciform Specimen Method, 13th European Conference on Composite Materials, Royal

Institute of Technology, Stockholm (Sweden), 2008.6.4

⑥ Shinji Ogihara, Yoriaki Sakamoto, Hajime Kato and Ichiro Ueno, Evaluation of Interfacial Strength in a Glass Fiber Reinforced Composite Using Cruciform Specimen Method, 2007 International Conference on Engineering Research, HoChiMinh City University of Technology, HoChiMinh (Vietnam), 2007.12.21

⑦ Shinji Ogihara, Yoriaki Sakamoto and Hajime Kato, Evaluation of Interfacial Strength in a Glass Fiber/Epoxy Composite Using a Cruciform Specimen, 10<sup>th</sup> Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE-10), Tokyo Big Sight (Tokyo, Japan), 2007.11.28

⑧荻原慎二, 加藤肇, 坂本頼昭, 上野一郎, Cruciform試験片を用いた一方向繊維強化複合材料の横方向引張強度評価, 成形加工シンポジウム07, (プラスチック成形加工学会), 山口県教育会館(山口), 2007.11.19 (ポスター発表)

⑨荻原慎二, 坂本頼昭, 加藤肇, 上野一郎, Cruciform試験片法によるガラス繊維/エポキシ複合材料の界面強度評価, 第32回複合材料シンポジウム, 長崎総合科学大学(長崎), 2007.10.18

⑩Shinji Ogihara and Yoriaki Sakamoto, Evaluation of Interfacial Strength in a Glass Fiber Reinforced Composite using a Cruciform Specimen, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics '07 (ATEM07), Across Fukuoka (Fukuoka), 2007.9.13 (Poster Presentation)

## 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  
准教授

研究者番号 : 70266906