

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月7日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360417

研究課題名（和文） 複合材ファンシステムにおける高速衝撃損傷挙動の解明

研究課題名（英文） Characterization of high-speed impact damage in composite fan-engine systems

研究代表者

黄木 景二 (OGI KEIJI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70281194

研究成果の概要（和文）：音速程度の高速衝撃に対する CFRP（炭素繊維強化プラスチック）積層板の損傷挙動を解明した。まず、異物衝突模擬実験を行い、高速衝撃損傷データを取得した。次に、損傷現象のモデル化と有限要素法による数値シミュレーションを行い、衝撃損傷進展プロセスを数値的に再現した。特に、材料定数が損傷規模と貫通限界速度に及ぼす効果を数値的に明らかにした。さらに、粒子法による損傷進展解析も行い、実験結果と比較することにより、その有用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：High-speed (around the sound velocity) impact damage in CFRP (carbon fiber reinforced plastic) laminates was characterized. First, foreign object impact tests were conducted to obtain high-speed impact damage data. Next, modeling of damage phenomena and finite element analysis were performed to simulate the damage propagation processes. Particularly, the effect of material properties on damage size and perforation limit speed was investigated numerically. In addition, damage extension simulation was conducted using a particle method and its result was compared with experiment result to confirm the validity of the method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	8,500,000	2,550,000	11,050,000

研究分野：複合材料工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：損傷、複合材料積層板、有限要素解析、粒子法、高速衝撃

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic; CFRP) は軽量・高強度・高剛性であり、近年航空機の一次構造に使用されるなどその適用範囲は拡大している。音速近くで航行する航空機の構造材料では異物衝突損傷に対する耐久性が問題とされる。

一般に、CFRP 積層板では、面外からの衝突荷重により層間はく離などの損傷が発生し、これにより、圧縮強度をはじめとする機械的特性が低下する。

これまで、ツールドロップなどを想定した比較的低速の衝撃に対する損傷については、実験、数値シミュレーションともに盛んに研

究されてきた。また、スペースデブリなどを想定した秒速数 km の超高速衝撃に対する損傷についても貫通挙動を中心に研究が行われてきた。一方、航空機構造材料にとって問題となる音速付近の異物衝突については、実験、モデリング、数値シミュレーションを行った研究例は多数あるものの、層内、層間における個々の損傷の発生と進展に関する詳細な挙動が解明されているとは言えない。また、実用上重要となる CFRP の物性値が異物衝突損傷や貫通限界速度に及ぼす効果についても明らかになっていない。

2. 研究の目的

- (1) 音速域近傍における高速衝撃に対する CFRP 積層板の損傷挙動を実験的に解明する。
- (2) CFRP の物性値が高速衝撃損傷に及ぼす効果を明らかにする。
- (3) 粒子法 の 一 種 である SPH (Smoothed-particle hydrodynamics) 法を用いて損傷解析を行い、実験と比較することにより、その有用性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 異物衝突模擬試験

使用した材料は炭素繊維強化エポキシであり、積層構成は一方向積層板 $[0^{\circ}_{16}]$ (以下, UD), 直交積層板 $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$ (以下, CP) および擬似等方性積層板 $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ (以下, QI) である。試験片サイズは 55 mm 角, 厚さ 1.6 mm である。

電熱銃を利用した飛翔体衝突試験装置を用いて高速衝撃試験を行った。飛翔体として直径 1.5 mm (重量 14.2 mg) の鋼球を用い、衝突速度 v を約 150~450 m/s の範囲で変化させた。試験後の表面・裏面および内部の損傷を光学顕微鏡と軟 X 線撮影装置で観察した。

(2) 有限要素解析

汎用非線形有限要素解析ソフト (Abaqus) を用いて衝撃損傷進展解析を行った。図 1 に示すように、対称性を考慮して、4 分の 1 モデルを用いた。8 節点 6 面体ソリッド要素を用いて各層の要素分割を行った。CFRP 層内の破壊に対して、どの応力に起因するのかを明確に判定するために、最大応力基準を適用した。破壊後の要素に対して、応力および弾性率の値を低下させた。また要素のつぶれによる時間増分数の極端な増加を防ぐためひずみが一定値に達したとき要素を削除した。

さらに、層間はく離と表面・裏面のスプリッティングを表現するために、全層間と表面・裏面の衝撃点近傍に結合力要素を挿入した。結合力要素の破壊発生基準として 2 次式を用い、破壊進展基準として Benzeggagh-Kenane 基準を適用した。

(3) SPH 法による損傷解析

実験結果を基に、CFRP 積層板に対する鋼球

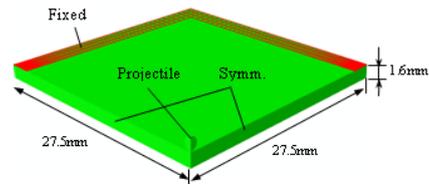


図 1 Model for finite element analysis.

による衝撃実験を二次元および三次元でモデル化した。三次元解析モデルを図 2 に示す。積層構成は、クロスプライ積層板 $[0^{\circ}_4/90^{\circ}_4]_{sym}$ であり、層間はく離を表現するため、 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 層間に CFRP のマトリックスであるエポキシ樹脂 (赤色) の物性を持った粒子の層を導入した。破壊進展解析を行うために Chang-Chang の破壊基準を用いた。CFRP 積層板の損傷の発生によって変化する剛性の影響、応力の伝わり方を考慮し、損傷モードに応じて破壊後の粒子のヤング率、応力を低下させた。

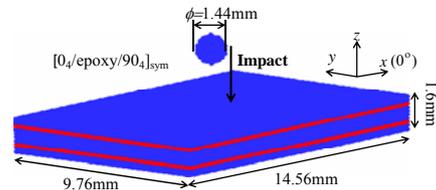


図 2 3D-model for SPH analysis.

4. 研究成果

(1) 実験及び有限要素解析結果の比較

図 3 に $v = 400$ m/s のときの UD の表面・裏面の損傷を示す。実験結果において、表面では衝突点にクレーター (矢印 A) が生じており、その上下縁から H 字型形状のスプリッティング (矢印 B) が生じている。一方、裏

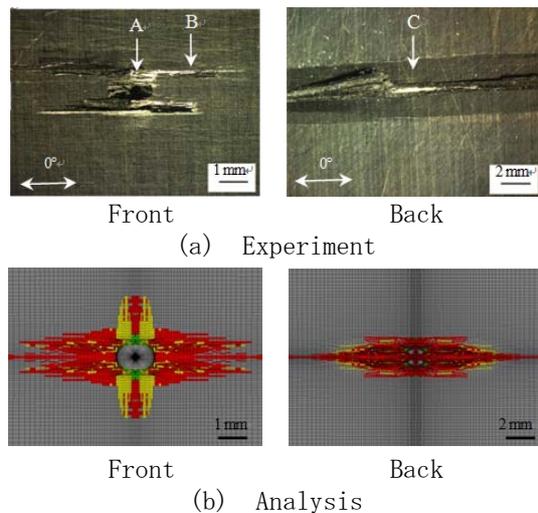
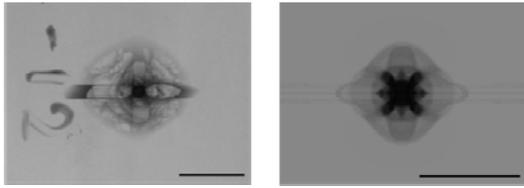


図 3 Comparison of surface damage states of the UD laminate between experimental and simulated results.



(a) Experiment (b) Analysis

図4 Comparison of delamination in the CP laminate between experimental and simulated result.

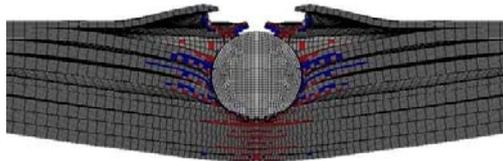
面では曲げによるスプリットが生じている(矢印C)。積層構成や衝突速度によって損傷規模は異なるものの、損傷形態は同様である。解析結果の図で赤色と青色は繊維に垂直な方向の引張と圧縮、黄色は面内せん断、緑色は面外せん断の各応力によるマトリックス破壊を表す。解析結果は、両面ともに実験結果を概ね再現している。

図4に $v = 400 \text{ m/s}$ のときのCPの(a)軟X線写真および(b)層間はく離の解析結果を示す。図の左右方向が表面層の繊維方向である。実験結果では、クレーターを中心として縦横方向に進展する円状の層間はく離が観察された。一方、解析結果は実験結果と定性的に良く一致している。

図5に(a)実験および(b)解析での $v = 400 \text{ m/s}$ のときのCPの断面損傷を示す。図の最上層の繊維方向が断面垂直方向である。実験結果では、衝突点に繊維破断を伴う深いクレーターが生じており、上層から下層にかけて層間はく離が発生している。層間はく離は 90° 層の下面すなわち 0° 層の上面の層間のみが発生している。この図と垂直な断面においても同様に2層おきに層間はく離が発生している。解析結果はこれらの損傷状態を良く再現している。なお、解析結果の図で赤色と青色は繊維方向の引張と圧縮の各応力による繊維破壊を表す。



(a) Experiment



(b) Analysis

図5 Comparison of thorough-the-thickness damage state in the CP laminate between experimental and simulated results.

(2) 高速衝撃損傷に及ぼす材料定数の効果

本研究ではパラメータとして、繊維方向引張・圧縮強度 (σ_{1T}, σ_{1C}), 層間破壊靱性 (G_i^c), 繊維方向弾性率 (E_{11}) を選択し、7種類のケースを設けた。表1に各ケースにおけるパラメータの組み合わせを示す。表の値はケース①に対する各材料定数の値の比率(%)である。特に④, ⑤については、 G_i^c と層間強度 t_i^0 の組み合わせにより3パターン(A, B, C)を設けた。

図6に $v = 400 \text{ m/s}$ における①に対する各ケースの層間はく離面積の比率(%)を示す。これより繊維方向強度は層間はく離面積に影響を与えないことがわかる(②, ③)。また繊維方向弾性率を変化させた場合においても影響は限定的である(⑥, ⑦)。一方, ④, ⑤に着目すると, [A]では層間はく離面積への影響は限定的であるが, [B]および[C]では, はく離面積は④で増加し, ⑤で減少している。これより, 層間はく離面積には層間強度が大きく影響を及ぼすことが分かる。

なお紙幅の関係で詳述しないが, 貫通限界速度には繊維方向弾性率が最も影響を及ぼすことが分かった。

(3) SPH法による損傷解析

図7に 0° 方向断面の損傷の様子とその解

表1 Combination of Parameters.

Case No.	σ_{1T}, σ_{1C} (%)	G_i^c (%)	t_i^0 (%)	E_{11} (%)
①	100	100	100	100
②	50	100	100	100
③	150	100	100	100
④-A	100	50	100	100
⑤-A	100	200	100	100
④-B	100	50	71	100
⑤-B	100	200	141	100
④-C	100	100	71	100
⑤-C	100	100	141	100
⑥	100	100	100	50
⑦	100	100	100	150

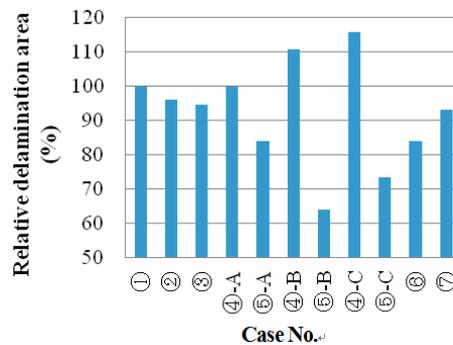
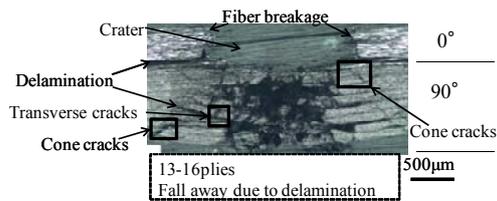
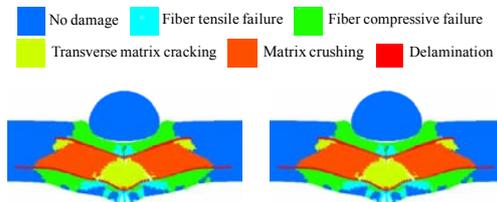


図6 Relative delamination area for all the cases ($v = 400 \text{ m/s}$).



(a) Experiment



(b) 2-D simulation (c) 3-D simulation
 図7 Comparison of the optical micrograph and simulation result of damage extension in the 0° directional cross-section ($v = 600 \text{ m/s}$).

析結果を示す。損傷モードによって粒子を色分けした。図7(a)において飛翔体球の衝突に伴うクレーター、繊維破断、コーンクラック、トランスバースクラックおよび層間はく離が観察された。裏面側の0°層は層間はく離によってはがれていたため観察できなかった。図7(b)において、二次元シミュレーションでの損傷形態は実験とほぼ一致した。表面側の0°層は飛翔体衝突により繊維圧縮で座屈が起こり、クレーターが発生したと考えられる。90°層では母材引張、圧縮によって実験で観察された壊滅的な破壊が起こった。図7(b),(c)において、二次元シミュレーションと三次元シミュレーションとでは損傷モードが異なっているのがわかる。これは、二次元では0°層は繊維破壊、90°層は母材破壊の損傷判定しか行っていないからである。三次元シミュレーションでは二次元と比較すると損傷領域は小さくなったが、全体的な損傷形態は一致した。0°/90°層間にエポキシ樹脂の物性を持った粒子の層を導入することで、二次元、三次元解析ともに層間はく離を再現できた。

(4) 得られた成果の位置づけとインパクト

3カ年にわたる研究により、研究課題の初期の目的はほぼ達成できたといえる。最も重要な成果は有限要素解析および粒子法の2つの方法により、高速衝撃による複雑な損傷過程を数値的にほぼ再現し、解析法を確立することができたことである。このような研究は国内外においてもほとんど成功例がない。もう一つの成果は損傷規模と貫通限界速度に及ぼす物性値の効果を数値的ながら解明できた点である。この成果は今後、ターボファンエンジンや航空機の機体にCFRPを適用

する際に、最適な材料設計を行うための大きな指針を与えるものである。

さらに今回の損傷進展シミュレーション手法の確立により、面内荷重、面外荷重を問わず、疲労、せん断切断など他の荷重様式や加工による損傷を数値的に予測できる可能性が開けた。

(5) 今後の展望

有限要素解析によるパラメトリックスタディ(材料物性の効果)の結果を実験的に検証することが今後の課題である。また吸湿環境下、温度環境下(特に-30°Cと60~80°C)におけるCFRP積層板の高速衝撃損傷を実験及び数値的に調べることは、実用上、意義が高いため、今後遂行する予定である。

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14件)

- ① S. Yashiro, K. Ogi, M. Oshita, High-velocity impact damage behavior of plain-woven SiC/SiC composites after thermal loading, Composites Part B, 43, 1353-1362, 2012, 査読有
- ② 黄木景二, 田中孝明, マトリックスクラックを有する吸水したCFRPクロスプライ積層板の電気抵抗特性, 日本複合材料学会誌, 37, 226-233, 2011, 査読有
- ③ K. Ogi, M. Takahashi, S. Yashiro, Empirical models for matrix cracking in a CFRP cross-ply laminate under static- and cyclic- fatigue loadings, Polymer Composites, 32, 1652-1660, 2011, 査読有
- ④ K. Ogi, M. Yamanouchi, Temperature dependence of flexural strength of a CF-SMC composite, Applied Composite Materials, 18, 397-408, 2011, 査読有
- ⑤ 駒形大輔, 岡部朋永, 矢代茂樹, 吉村彰記, 小笠原俊夫, 柔軟体衝突を受けるCFRP積層板の損傷解析, 日本複合材料学会誌, 37, 164-171, 2011, 査読有
- ⑥ 黄木景二, 田中孝明, 矢代茂樹, 吉村彰記, CFRP一方向積層板および直交積層板における高速衝撃損傷, 材料, 60, 418-424, 2011, 査読有
- ⑦ K. Ogi, Prediction of residual tensile strength after fatigue in unidirectional brittle fiber-reinforced ceramic composites, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 5, 64-74, 2011, 査読有
- ⑧ S. Yashiro, K. Ogi, T. Yamamoto, T. Watanabe, A Simple Approach for Determining the Characteristic Distance in the Point Stress Criterion for Holed

CFRP Unidirectional Laminate, Advanced Composite Materials, 19, 243-259, 2010, 査読有

⑨ K. Ogi, T. Okabe, M. Takahashi, S. Yashiro, A. Yoshimura, T. Ogasawara, Experimental characterization of high-speed impact damage behavior in a three-dimensional woven SiC/SiC composite, Composites Part A, 41, 489-498, 2010, 査読有

⑩ K. Ogi, S. Yashiro, K. Niimi, A probabilistic approach for transverse crack evolution in a composite laminate under variable amplitude cyclic loading, Composites Part A, 41, 383-390, 2010, 査読有

⑪ K. Ogi, S. Ogihara, S. Yashiro, A Probabilistic SCG Model for Transverse Cracking in CFRP Cross-ply Laminates under Cyclic Loading, Advanced Composite Materials, 19, 1-17, 2010, 査読有

⑫ 黄木景二, 矢代茂樹, 確率的 SCG モデルとエネルギー解放率を用いたトランスバースクラックに関する疲労破壊クライテリアオン, 日本複合材料学会誌, 35, 212-220, 2009, 査読有

⑬ S. Yashiro, K. Ogi, Fracture behavior in CFRP cross-ply laminates with initially cut fiber, Composites Part A, 40, 938-947, 2009, 査読有

⑭ 高橋学, 鍛冶川晋也, 松田伸也, 黄木景二, 岡部永年, セラミック軸受球の静・動的接触強度特性, 材料, 58, 338-344, 2009, 査読有

[学会発表] (計 31 件)

① 重松豊, 佐川裕紀, 黄木景二, CFRP 積層板のパンチによる穴開け加工, 日本機械学会中国四国学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2012 年 3 月 7 日, 広島

② 大田敦史, 黄木景二, CFRP 積層板の切断加工, 日本機械学会中国四国学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2012 年 3 月 7 日, 広島

③ 井岡卓也, 中田真道, 岡英志, 黄木景二, CFRP 積層板における高速衝撃損傷過程, 日本機械学会中国四国学生会 第 42 回学生員卒業研究発表講演会, 2012 年 3 月 7 日, 広島

④ 黄木景二, CFRP クロスプライ積層板における疲労マトリックスクラッキング, 九州大学応用力学研究所新エネルギー力学専門部会共同研究集会「複合材料および新エネルギーへの応用と評価」, 2012 年 1 月 7 日, 福岡

⑤ 黄木景二, CFRP 積層板のせん断切断について, 第 8 回複合材料研究セミナー (東北大学機械系複合材料研究センター), 2011 年 12 月 16 日, 仙台

⑥ 岡英志, 黄木景二, 矢代茂樹, CFRP クロス

プライ積層板における高速衝撃損傷に及ぼす材料定数の効果, 第 36 回複合材料シンポジウム, 2011 年 10 月 20 日-21 日, 仙台

⑦ K. Ogi, Electrical resistance change in moisturized CFRP laminates under the freezing point, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 2011 年 9 月 19 日, 神戸

⑧ E. Oka, K. Ogi, A. Yoshimura, T. Okabe, High-velocity impact damage progress in CFRP laminates, 18th International Conference on Composite Materials, 2011 年 8 月 21 日-26 日, Jeju, Korea

⑨ 黄木景二, CF-SMC の引張後強度特性, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 2011 年 7 月 17 日, 福岡

⑩ 佐川裕紀, 中田真道, 黄木景二, 押し込み荷重による CFRP 積層板の損傷解明, 日本機械学会中国四国学生会第 41 回学生員卒業研究発表講演会, 2011 年 3 月 4 日, 岡山

⑪ K. Ogi, M. Takahashi, S. Yashiro, A. Yoshimura, Numerical and Experimental Characterization of High-Speed Impact Damage in CFRP Unidirectional and Cross-Ply Laminates, The 7th Asian-Australasian Conference on Composite Materials, 2010 年 11 月 16 日, Taipei

⑫ 岡英志, 黄木景二, 岡部朋永, 矢代茂樹, 吉村彰記, 飛翔体衝突による CFRP 積層板の損傷進展解析, 第 35 回複合材料シンポジウム, 2010 年 10 月 14 日, 広島

⑬ K. Ogi, S. Yashiro, A. Yoshimura, Effect of Impact Speed on High-Speed Impact Damage in CFRP Unidirectional and Cross-Ply Laminates, Effect of Impact Speed on High-Speed Impact Damage in CFRP Unidirectional and Cross-Ply Laminates, 2010 年 9 月 21 日, Dayton, USA

⑭ 黄木景二, 複合材料の高速衝撃破壊シミュレーション, 日本機械学会計算力学部門「複合領域における設計探査研究会」 「Multidisciplinary Design Exploration (MDE) Lecture Series 10」, 2010 年 8 月 6 日, 松山

⑮ 田中孝明, 黄木景二, 岡部朋永, 矢代茂樹, 吉村彰記, CFRP 一方向積層板及びクロスプライ積層板における飛翔体衝突損傷の解明, 第 52 回構造強度に関する講演会, 2010 年 7 月 22 日, 鳥取

⑯ 吉村彰記, 岡部朋永, 小笠原俊夫, 黄木景二, 連続体損傷力学と Cohesive zone モデルを用いた CFRP 積層板の損傷進展シミュレーション, 第 52 回構造強度に関する講演会, 2010 年 7 月 21 日, 鳥取

⑰ 岡英志, 黄木景二, CFRP 一方向強化積層板の高速衝撃損傷進展解析, 日本材料学会四国

支部第 8 回学術講演会, 2010 年 6 月 19 日, 四国中央

⑱大下将司, 黄木景二, 矢代茂樹, 熱衝撃後の織物 CMC における飛翔体衝突損傷挙動, 第 1 回日本複合材料合同会議, 2010 年 3 月 9 日, 京都

⑲北原龍一, 黄木景二, 矢代茂樹, スリットを有する CFRP 積層板の損傷進展過程, 日本機械学会中国四国学生会第 48 回期総会・講演会, 2010 年 3 月 6 日, 広島

⑳岡英志, 黄木景二, 岡部朋永, 矢代茂樹, 高橋学, 吉村彰記, 有限要素解析による CFRP 積層板の高速衝撃損傷進展シミュレーション, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010 年 3 月 5 日, 広島

(21)河野拓矢, 高橋学, 中岡善治, 黄木景二, 飛翔体衝突を受けたセラミックス材料の衝撃破壊挙動の検討, 日本機械学会中国四国学生会第 40 回学生員卒業研究発表講演会, 2010 年 3 月 5 日, 広島

(22)黄木景二, 矢代茂樹, 三次元 CMC の高速衝撃損傷挙動, 「ナノ複合材料等次世代複合材料の創製及び評価」共同研究集会, 2010 年 1 月 7 日, 福岡

(23) K. Ogi, T. Okabe, A. Yoshimura, S. Yashiro, HIGH SPEED IMPACT DAMAGE IN CFRP UNIDIRECTIONAL AND CROSS-PLY LAMINATES, The 11th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, 2009 年 11 月 26 日, 東京

(24)吉村彰記, 小笠原俊夫, 黄木景二, 矢代茂樹, 高速飛翔体衝突による炭素繊維複合材料の損傷進展と貫通挙動の予測, 日本航空宇宙学会第 47 回飛行機シンポジウム, 2009 年 11 月 6 日, 岐阜

(25)田中孝明, 黄木景二, 矢代茂樹, 岡部朋永, 吉村彰記, CFRP (CP 積層) 板に生じる飛翔体衝突損傷挙動の解明, 第 34 回複合材料シンポジウム, 2009 年 9 月 24 日, 金沢

(26)中村司, 矢代茂樹, 黄木景二, 粒子法による複合材料積層板の飛翔体衝突損傷解析, 第 34 回複合材料シンポジウム, 2009 年 9 月 25 日, 金沢

(27)A. Yoshimura, K. Ogi, T. Ogasawara, H. Sasaki, M. Miyoshi, Numerical simulation on the high velocity impact damage in the CFRP laminate, The 17th International Conference on Composite Materials, 2009 年 7 月 30 日, Edinburgh, UK

(28) K. Ogi, S. Yashiro, T. Okabe, A. Yoshimura, T. Ogasawara, A characterization study on high speed impact damage in CFRP laminates, the 17th International Conference on Composite Materials, 2009 年 7 月 30 日, Edinburgh, UK

(29)中村司, 矢代茂樹, 黄木景二, 2 次元平

織 CMC における飛翔体衝突損傷挙動の実験的解明, 日本材料学会 第 58 期総会・学術講演会, 2009 年 5 月 24 日, 松山

(30)中岡善治, 高橋学, 松田伸也, 黄木景二, 翔体衝突を受けたセラミックス材料の表面損傷解析, 日本材料学会 第 58 期総会・学術講演会, 2009 年 5 月 23 日, 松山

(31)黄木景二, 織物 CMC における飛翔体衝突損傷挙動, 東北大学複合材料研究センター第 4 回複合材料セミナー, 2009 年 4 月 3 日, 仙台

〔図書〕(計 2 件)

①黄木景二, CFRP (炭素繊維複合材料) の樹脂含浸性向上と信頼性評価, 技術情報協会, 2010, 319-332

②黄木景二, 最新フラクトグラフィー各種材料の破面解析とその事例, テクノシステム, 2010, 294-303

〔その他〕

ホームページ

<http://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikais/ei/zairiki/kogi/kogi-j.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黄木 景二 (OGI KEIJI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 70281194

(2) 研究分担者

矢代 茂樹 (YASHIRO SHIGEKI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 00452681

(3) 連携研究者

吉村 彰記 (YOSHIMURA AKINORI)

研究者番号: 20462898