

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25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560682

研究課題名（和文）

耐衝撃性能と機械加工性に優れたCFRP開発のための材料構成要素の探究

研究課題名（英文）

Search material components for developing high anti-impact behavior and easy machining

研究代表者

田邊 靖博 (TANABE YASUHIRO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70163607

研究成果の概要（和文）：

飛翔体材質あるいは構成要素を制御した飛翔体衝突実験を実施し、ステレオビジョン法を用いて3次元化することでCFRP損傷の定量解析を行った。変形や破壊をおこさない飛翔体では、貫通するエネルギーは飛翔体材質によらず、その大きさに依存する。これに対して、変形や破壊する材質の飛翔体では、より大きなエネルギーを与えないと試料を貫通しないことが分かった。また、繊維の撓みを阻害しないマトリックスほど、耐衝撃特性が大きいことが明らかとなった。

スラスト力を加工性の指標として、自作の各種マトリックス樹脂の加工性について検討した。大きな傾向として、散逸エネルギーの大きなマトリックス樹脂は、小さなスラスト力で穿孔でき、耐衝撃特性と加工性が一つのCFRPで両立できることが示された。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we conducted impact tests and investigated the effects of projectile materials on impact phenomena of CFRP by using three-dimensional (3D) measurement under high-velocity projectile impact. The following two were mainly revealed: the first is that (1) the ballistic limit range was affected by the kinetic energy of the projectile and this kinetic energy was proportional to the diameter of the projectile. When projectile was deformed, its deformation energy was not negligible small. The second is that (2) the main mechanism of energy absorption in CFRPs is their deformation. CFRPs, consisting of high-strength carbon fiber having large-failure-strain and deformable resin, could absorb large kinetic energy of a projectile.

We can find a large trend that highly energy dissipated resins tended to show lower thrust-forces.

Both of high resistivity against impact and easy-machining can be compatible in a CFRP.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合材料

科研費の分科・細目：複合材料・物性

キーワード：材料構成要素、加工性、対衝撃特性

1. 研究開始当初の背景

軽量で比強度の高いCFRPは、安全・安心な輸送機器の実現と輸送機器のエネルギー効率向上に大きく貢献することが期待され、次

世代高速輸送機器の中心材料として有望視されている。国内でも次世代小型国産ジェット機への応用が検討されている。しかし、次世代高速鉄道や航空機の飛行速度である比

較的速い速度域 150~300m/s (500~1000 km/h : 部材の歪み速度 $10^3/s$ 以上) での衝撃特性と材料構成要素との関係の報告は、筆者らの一連の研究 [Int'l J. Impact Engng., 28 (2003) 627-642, 1045-1059, 平成 20 年度衝撃波シンポジウム (2009) 7-12 等] を除けば、ほとんどない。したがって、安全係数を大きく見積もった材料設計を行う必要があり、民間航空機 B787 では限界設計がなされていないと聞いている。これでは、CFRP の軽量性が十分には活かせない。さらに、CFRP は積層構造を有するため、層間剥離を起こしやすい。このことは、耐衝撃特性のみならず、CFRP の機械加工性にも影響している。樹脂と炭素繊維からなる材料でありながら、層間剥離やチップングの発生、精度を確保するための加工に手間がかかる等のため、一般的なアルミ合金ほどの高速機械加工性が確保されていない現状がある [例えば、H20, H21 年度戦略的基板技術高度化支援事業課題]。機械加工性の向上は、省材料・省エネルギーに直結する。しかし、機械加工に関する CFRP の系統的な学術研究は、申請者が調べた限りでは国内外共に報告されていない。

2. 研究の目的

軽量の CFRP は、高速輸送機器の中心材料になることは間違いない。高速輸送機器で問題となる耐衝撃特性および機械加工性に果たす材料構成要素の役割を解明し、優れた耐衝撃性能と機械加工性とを有する CFRP を創出するための材料設計指針を探究・提案することは、炭素繊維および CFRP で世界をリードする日本が果たすべき大きな役割の一つとなる。

そこで本研究では、CFRP の構成要素と CFRP の加工性、耐衝撃特性との関係を検討し、加工性・特性を向上させる指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 衝突実験

① 飛翔体材質

層間にポリアミド粒子を添加した CF/エポキシ CFRP 疑似等方積層材を試料として用いた。試料寸法は 70mm×70mm×1.5mm である。飛翔体には、ポリエチレン (PE)、アルミナ、フェライト、ポリアミド (PA66)、アルミニウム、タングステンカーバイト (WC)、軸受け鋼 (SUJ2) を用いた。飛翔体直径 4mm~6mm, 質量 0.08g~0.88g。

衝突実験には一段式ガス加速装置を使用し、最高速度 350 m/s まで飛翔体を加速させた。飛翔体の速度は、飛翔体の進行方向に対して

平行に高速度ビデオカメラを設置し計測を行った。また、試料を貫通する前後の飛翔体の運動エネルギー差から、試料を貫通するのに必要な吸収エネルギーを算出した。CFRP 試料の変形を計測するために、スペックルを描いた試料を用いた 3 次元解析をあわせて行った。

② 構成要素

炭素繊維には、YSH-50A (日本グラファイトファイバー) および T700S (東レ) を使用した。YSH-50A と比較して T700S は引張応力と破断ひずみが大きく、弾性率は小さい。T700S は引張応力に対して伸びやすく、破断しにくい炭素繊維である。

樹脂にはエポキシ樹脂を用いた。本研究では主剤と硬化剤の配合を変えて樹脂 A~D の 4 種類の樹脂を作成した。樹脂 B は最も引張強度が高く、破断ひずみが小さい。反対に樹脂 C は引張強度が低く、破断ひずみは大きい。また、樹脂 D は樹脂 A~C と比較すると引張強度および引張弾性率が極端に低く、“グミ”に近い樹脂である。

界面の影響について検討するために、市販品 YSH-50A 繊維をメチルエチルケトンでサイジング剤を除去後に、不活性雰囲気中 1000°C で熱処理することで炭素繊維表面の水酸基 (-OH 基) などの含酸素官能基を減少させた。サイジング剤および含酸素官能基を減少させることによって炭素繊維と樹脂との接着力が弱められる。それぞれの CFRP を、“樹脂名-炭素繊維名”で命名する。ここで、T1 繊維とは T700S を用いた繊維 (平織り)。ARD (As-Received) 繊維とは YSH-50A に対してサイジング剤除去処理およびその後の熱処理 (以降、両処理をあわせて熱処理と略記する) を行わず、市販品をそのまま用いた繊維 (5 枚朱子織)、HTD (Heat-Treated) 繊維とは界面強度を低下させるために熱処理を行った繊維 (5 枚朱子織) を指す。繊維含有量 V_f はいずれの CFRP ともに 60% である。

衝突実験は、一段式軽ガス加速装置を用いて $\phi 4\text{mm}$ の SUJ2 球を加速して衝突させた。CFRP 試料の変形を計測するために、スペックルを描いた試料を用いた 3 次元解析をあわせて行った。

(2) 穿孔実験

小型のボール盤に、ロードセルを組み込んだ自動昇降式の台を取り付け、プログラムコントロールにより一定速度で穿孔を行い、そのときのロードセル荷重をスラスト力として計測した。 $\phi 5\text{mm}$ ドリル刃を用いて、回転数 850rpm、送り 0.6mm/s の条件でドリル加工を行った。用いた試料は、A-ARD および B-T1、

樹脂 A-D である。さらに、樹脂 B に微粒子ゴム添加剤を入れて韌性を向上させた樹脂についても実験を行った。

4. 研究成果

(1) 衝突実験

① 飛翔体材質

図 1 に、各飛翔体が試料を貫通した時の運動エネルギーを示す。変形あるいは破壊しない飛翔体については、6J 前後で貫通した。また、直径が 6mm と大きな SUJ2 では、貫通に必要なエネルギーが大きくなっている。また、Al 球やプラスチック球では、試料に貫通穴をあけることはできなかった。このことは、衝突時に変形・破壊しない飛翔体では、その材質に関わらず、貫通限界を飛翔体の運動エネルギーで整理することができることを示している。

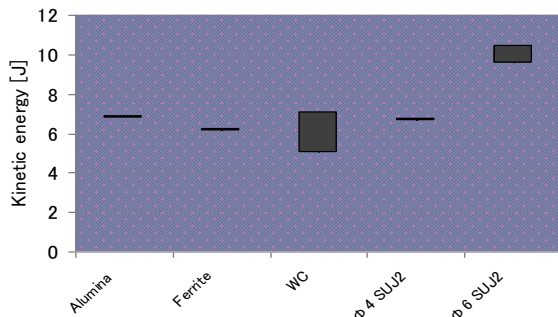


図 1 変形しない飛翔体の貫通エネルギー

図 2 に、3次元変形の一例をしめす。試料との衝突により大きな破損が観察される PA6 は、破壊や変形が観測されない SUJ2 と比べて、変形する底面積が大きいことが計測された。飛翔体の変形や破損によって、試料に加わる圧力が分散されたためと推察される。そのため、試料を貫通しなかったと考えられる。

② 構成要素

図 3 に、各種 CFRP の撓みに費やされたエネルギーと散逸した飛翔体の運動エネルギーとの比を示す。図から明らかな様に、T1 繊維を用いた CFRP の運動エネルギー散逸能が高く、また、試料の撓みに費やされたエネルギーも大きいことが分かる。また、T1 ではマトリックス樹脂の差が顕著に表れている。D をマトリックスとする CFRP のエネルギー散逸が大きいことから、繊維の拘束が大きいと散逸エネルギーが小さくなる傾向にあると推測される。界面強度の影響でも、D をマトリックスとする CFRP 以外では、表面処理を施すことによって、散逸エネルギーが大きくなった。このことも、エネルギー散逸と繊維の変形を妨げるか否かが大きく関係していることを示唆している。D 樹脂で散逸エネルギーが大きくなるな

った理由は、過度の撓みは逆効果であることを示唆していると考えている。

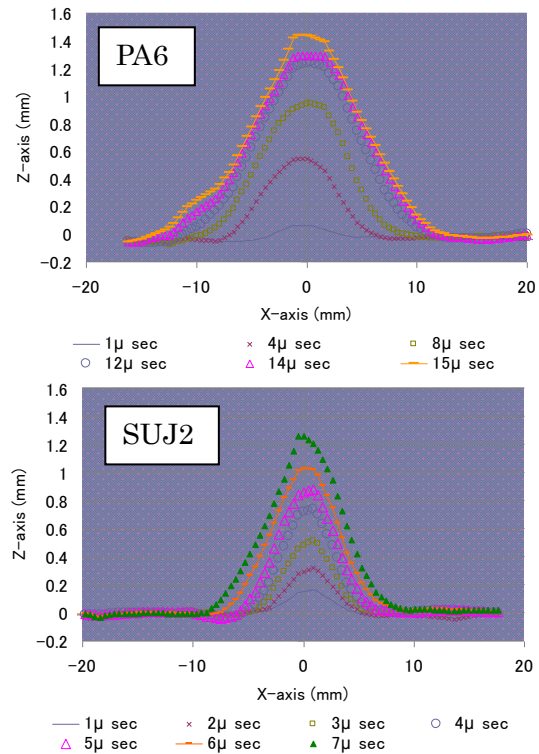


図 2 試料の変形挙動の一例

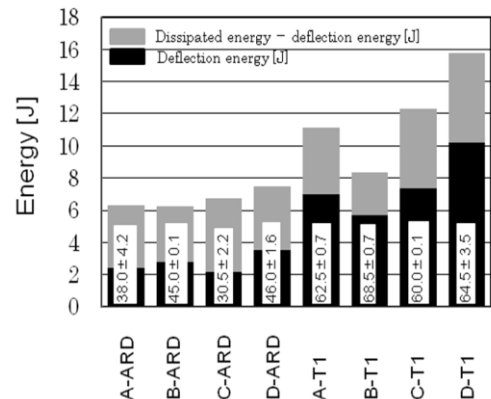


図 3 散逸エネルギーと撓みエネルギー

(2) 穿孔実験

まず、はじめにドリル刃の形状とスラスト力について検討した。その結果、先端角が小さくてねじれ角が大きなドリル刃でスラスト力が低く、先端角が大きくてねじれ角が小さな刃でスラスト力が高くなる傾向が認められた。しかし、先端角が大きくてねじれ角が小さいにもかかわらず、同程度のスラスト力を示すドリル刃もあり、加工条件(回転数、送り速度)の更なる検討が必要であることが分かった。しかし、全条件について検討を加えることは時間的にも難しいため、航空機の機械加工で一般的とされている前述条件を用いて、穿孔実験を行うこととした。

繊維がことなる2種類のCFRPについて、2種類のドリル刃を用いて行った結果を図4に示す。ドリル刃(形状)によって、スラスト力の最大値は変わってくるが、ARD繊維を用いたCFRPの方が、T1繊維を用いたCFRPよりもスラスト力が大きくなった。ARD繊維は弾性率が高く、硬いと考えられる。前述の実験結果を含めた詳細については、今後の検討課題であるが、炭素繊維の硬さと加工性について詳細な検討が必要である。

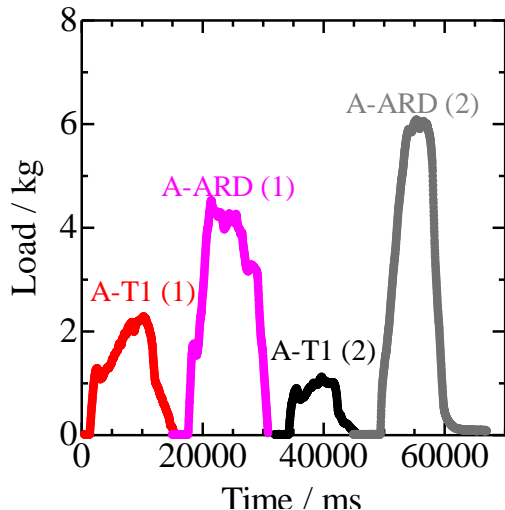


図4 繊維の異なるCFRPの加工性と加工性に与えるドリル刃の影響

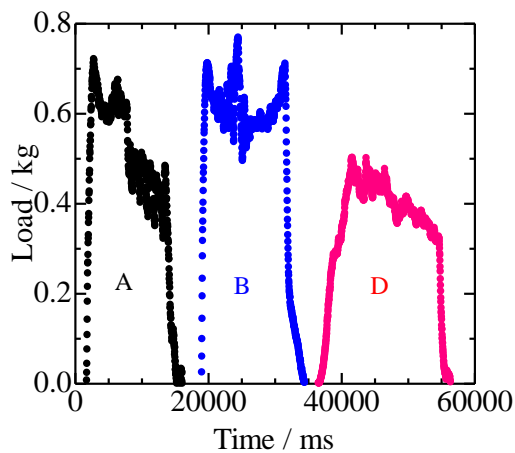


図5 樹脂単体のドリル加工時のスラスト力

図5に、樹脂A、B、Dの加工時のスラスト力を示す。樹脂Aは樹脂Bと比較して弾性率は小さい。しかし、スラスト力の差はそれほどない。同様に、樹脂Dの弾性率や強度は樹脂AやBと比較して遙かに小さいが、スラスト力の差は、それほどには大きくない。とはいえ、樹脂Aや樹脂Bよりは2割以上小さな値となっており、加工性に優れていることが示唆される。また、樹脂Bと樹脂Aとを比較しても、耐衝撃性に優れた図示Aのスラスト

ト力のごくわずかではあるが低い。これらのことは、耐衝撃特性を示す樹脂の加工性が高いことを示している。少なくとも、耐衝撃特性を向上させても加工性を劣化させることのない、CFRPを作製可能であることを実証することができた。

(3) まとめ

耐衝撃特性を向上させるためには、高強度・高破断歪み繊維を用い、その変形を阻害しない樹脂をマトリックスとするCFRPを作製する必要がある。このとき、過度の界面接着力の低下は逆効果となる。刃具形状や加工条件の詳細について把握できていない事項が多々残っているが、少なくとも、今回自作したマトリックス樹脂は耐衝撃性と加工性との両立が可能であった。

エポキシ系CFRPについて考えれば、三次元架橋構造が大きくは発達していない、主鎖が比較的長い樹脂であれば、耐衝撃性と機械加工性の両方の向上が見込めると推察される。

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4件)

①CFRPの構成要素が飛行体衝突損傷現象に与える影響: 田邊靖博, 山田昌義, 小林信介, 佐藤成道, 橋本雅弘; 日本複合材料学会誌, 39 (2013) 16-23, 査読有

②飛行体の材質がCFRPの飛行体衝突現象に与える影響: 山田昌義, 田邊靖博, 武田雄太, 平田修司, 佐藤成道; 日本複合材料学会誌, 38 (2012) 144-151, 査読有

③Impact Fracture Behavior of Ceramics and PR-fiber-reinforced Mortars: Y. Tanabe, M. Yamada, A. Sasoh, M. Kunieda, K. Sekine and T. Kumazawa; Key Engineering Materials vol.484,75-81 Advanced Engineering Ceramics and Composites IV (ISBN978-3-03785-181-4), Trans Tech Pub. (2011) Invited, 査読有

④Three-dimensional Measurement of CFRP Deformation under High-velocity Projectile Impact: M. Yamada, Y. Tanabe, A. Yoshimura and T. Ogasawara; The 29th Int'l Congress on High-Speed Imaging and Photonics, (2010) (Proc. ICHSIP-29, ISBN978-4-905149-01-9), 査読有

[学会発表] (計5件)

①繊維の違いから見る飛行体衝突によるCFRP変形挙動の3次元計測: 平田修司, 武田雄太, 田邊靖博, 橋本雅弘; 複合材料学会シンポジウム (H24.10.18-19) 名古屋市中小企業振興会館

②CFRPへの高速飛行体衝突現象のシミュレ

ーションと3次元計測の比較：吉村彰記，山田昌義，田邊靖博，岡部朋永，小笠原俊夫；複合材料学会シンポジウム（H24.10.18-19）名古屋市中企業振興会館

③軟衝突体の衝突によるCFRP損傷挙動の3次元測定：武田雄太，田邊靖博，平田修司，小笠原俊夫，吉村彰記；複合材料学会シンポジウム（H24.10.18-19）名古屋市中企業振興会館

④飛翔体衝突によるCFRPの3次元変形挙動の計測：田邊靖博；日本における超高速衝突実験の現状と将来展望（H23.12.12-13）神戸大学

⑤CFRP積層板に対する高速飛翔体衝突時の損傷挙動の解析：吉村彰記，山田昌義，小笠原俊夫，田邊靖博；複合材料学会シンポジウム（H23.10.20-21）東北大学

〔図書〕（計1件）

①飛翔体との衝突に伴うCFRPの破壊挙動：田邊靖博、山田昌義；「CFRPの樹脂含浸性向上と信頼性評価」、(株)技術情報協会（2010）333-345

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

テクノフェア名大発表3件

CFRPの特徴と乗り物への応用：田邊靖博；東海化学工学会会報、No.268（2010）7-13

6. 研究組織

(1)研究代表者

田邊靖博（TANABE YASUHIRO）
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70163607

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

梅原 徳次（UMEHAR NORITSUGU）
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70203586

佐宗 章弘（SASOH AKIHIRO）
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40215752