

令和 6 年 4 月 3 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03751

研究課題名（和文）FBGセンサと電気インピーダンス法を併用した層間強化CFRPの穿孔損傷挙動の解明

研究課題名（英文）Characterization of drilling damage behavior of CFRP toughened with interlayers using FBG sensing and electric impedance method

研究代表者

黄木 景二 (Ogi, Keiji)

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：70281194

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：CFRP積層板を穿孔加工する際、ドリル刃出口側に層間はく離（POD）が発生する。本研究では穿孔加工中のPODのリアルタイム検出を行った。PODが発生する臨界スラスト力を知るために、CFRP擬似等方性積層板に埋め込んだFBGセンサと治具のひずみによって穿孔周りの内部ひずみとスラスト力をモニタした。さらに、CFRP上下表面に電極を設置し、穿孔中の電気インピーダンス変化をリアルタイム測定した。ring/circle電極を用いることにより、PODが小さい場合でもインピーダンス変化からPOD発生を検出できた。ただし、層間強化型CFRPは層間の軟化により、明瞭な変化が測定できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRP積層板は航空宇宙機や自動車の構造部材として用いられているが、接合のための穿孔加工を必要とする。穿孔加工時には出口側に層間はく離（POD）が発生するが、これによってCFRPの強度が低下する懸念がある。加工後の非破壊検査によってPODは検出できるが、加工中のどの段階でどれ位の大きさのスラスト力でPODが発生するのは明らかにできない。本研究は電気インピーダンス法によりPOD発生の瞬間を検知する手法を開発したものであり、研究成果は、層間はく離が発生しない加工条件の探索につながり、CFRP構造の強度信頼性向上に役立てることができる。

研究成果の概要（英文）：During drilling of CFRP laminates, delamination (POD) occurs on the exit side of the drill blade. In this study, POD was detected in real time during drilling. To determine the critical thrust force that causes POD, the internal strain around the drilled hole and the thrust force were monitored by an FBG sensor embedded in a CFRP quasi-isotropic laminate and using the strain of a fixture jig. In addition, electrodes were formed on the upper and lower surfaces of the CFRP to measure the electrical impedance change during drilling in real time. By using ring/circle electrodes, the occurrence of POD could be detected from the impedance change even when the POD was small. However, for interlaminar reinforced CFRP, the change was not clearly measurable due to softening of the interlayer.

研究分野：複合材料工学

キーワード：CFRP 層間はく離 穿孔加工 電気インピーダンス FBGセンサ 層間強化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量高強度という特徴を生かして、航空機の主翼・胴体を含む一次構造部材として適用されている。特に層間樹脂層を含む層間強化 CFRP は層間破壊じん性が従来型 CFRP より高く、面外衝撃に対する層間はく離の発生が抑制された CFRP である。CFRP 部材どうしあるいは金属部材との接合には、接着だけでなく、機械接合も施されるため、穿孔加工が必要になる。

(2) CFRP の穿孔時の加工損傷の一つに出口付近のプッシュアウト層間はく離 (POD) がある。POD の発生位置と大きさは加工後の非破壊検査により判明するが、穿孔後の検査や観察では穿孔中のひずみ、層間はく離発生のタイミング、および層間はく離が発生しないスラスト力 F の上限値 (臨界スラスト力) を知ることが困難である。

(3) CFRP の穿孔加工モニタリングの研究例は世界的に見ても非常に少なく、電気インピーダンス法を適用した例は見当たらない。POD の発生により、CFRP の孔まわりの電気インピーダンスは直流抵抗成分だけでなく、キャパシタンス成分も変化するため、電気インピーダンス法の適用が有効であると申請者は考えた。また、加工損傷の抑制が期待される層間強化 CFRP に関する穿孔損傷挙動に関する研究例もほとんどない。

2. 研究の目的

本研究の計画当初の目的は以下のとおりである：

(1) CFRP の穿孔損傷である層間はく離の発生を FBG センサで測定したひずみと電気インピーダンス変化から *in-situ* で検知できる手法を確立する。

(2) *in-situ* 穿孔モニタリングと穿孔後の損傷観察により、従来型 CFRP と層間強化 CFRP の穿孔損傷メカニズムを明らかにする。

(3) 臨界スラスト力 F_c と材料物性 (特に、層間破壊じん性 G_{IC}) との関係性を明らかにし、破壊力学に基づく F_c の予測式を提案する (従来型 CFRP に対する破壊力学モデルでは、 F_c は G_{IC} の 0.5 乗に比例)。また、予測式を数値解析により検証する。

3. 研究の方法

(1) 試験片 層間強化をしていない従来型 CF/Epoxy プリプレグを擬似等方積層板 ($[45^\circ_2/90^\circ_2/-45^\circ_2/0^\circ_2]_s$) を、オートクレーブを用いて作製した。積層板を 80 mm 角の正方形に切り出し、ワークとした。ワークの穿孔周りの厚さ方向のインピーダンス Z (大きさ $|Z|$ および位相角 θ) を測定するために、図 1 に示すように、ワーク上面と下面の穿孔周りに導電性接着剤を用いて電極を形成した。電極形状として、上面、下面とも円環状の ring/ring 電極 (図 1 右) と、上面は円環状、下面は円状の ring/circle 電極 (図 1 左) を選んだ。

加工中の穿孔近傍の内部ひずみを測定するために、穿孔縁付近に高屈曲タイプ FBG センサを埋め込んだ。FBG センサの温度補償を行うために、ワーク下面の穿孔近傍に熱電対を接着した。図 2 にワーク固定治具と測定系の模式図を示す。金属治具とワーク C の間に樹脂製の押え板 B と当て板 D を挟んでワークをボルトで固定した。穿孔中のスラスト力 F を推算するために、当て板 D の下面の孔周りにひずみゲージを貼付し、スラスト力校正ひずみ ε_{th} を測定した。

(2) 穿孔深さとスラスト力の測定 各ドリル変位 (穿孔深さ d) で加工を中断したワークのカット断面を研磨し、光学顕微鏡により d を実測した。次に、加工後のワークを図 2 の穿孔試験用治具にとりつけたまま万能試験機にセットし、先端半球半径 3 mm の鋼製円柱治具を穿孔に押し込むことにより、さまざまな d に対する ε_{th} と F の関係を求めた。

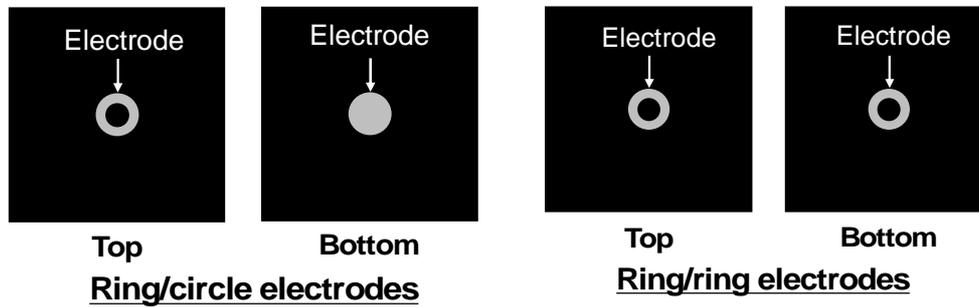


図1 孔周りの電極の形状。円環/円形電極（左）と円環/円環電極（右）¹⁾

(3) 材料除去とスラスト力によるインピーダンス変化 ring/circle 電極の時,穿孔に伴う材料除去,および F による Z 変化を調べるために以下の2種類の試験を行った。まず, d を未加工から貫通直前まで変化させたワークの無負荷状態での Z 変化を LCR メータを用いて測定した。次に,穿孔加工を中断したワークを治具にセットしたまま,万能試験機を用いて円柱治具を穿孔に押し込んだ時の F と Z 変化の関係を測定した。

(4) 穿孔モニタリング ワークをセットした治具を Z ステージに取り付け,これを卓上ボール盤のテーブルに置き,ドリルチャック部の上下位置を固定したまま, Z ステージを一定送り速度 v で上昇・下降させることにより穿孔加工を施した。加工条件は条件 I ($v=0.6$ mm/s, $N=540$ rpm) と条件 II ($v=0.1$ mm/s, $N=2610$ rpm) の2種類である。加工ツールとしてダイヤモンド被覆された CFRP 用ドリル刃 ($\phi=6.0$ mm) を用いた。

LCR メータを用いて周波数 1 kHz における穿孔加工中のインピーダンス Z を測定した。FBG センサからの信号は波長測定器を用いて取得し,ブラッグ波長シフト $\Delta\lambda_B$ とワークの温度変化から,穿孔近傍の平均ひずみを計算した。

(5) 加工損傷の評価 軟 X 線撮影装置を用いて,加工終了後の孔周りを撮影し,POD の大きさの指標として,調整デラミネーションファクタ (adjusted delamination factor)²⁾ を求めた。一方,刃先が貫通する前の数段階のドリル変位 w で加工 (条件 I と II) を中断し,穿孔中心を通るラインに沿って下側 45°層の繊維方向に平行にワークをカットした断面を研磨し,光学顕微鏡により各 w における損傷の発生と進展の状況を観察した。

4. 研究成果

(1) インピーダンス変化の要因 無負荷状態のとき,インピーダンス変化率 $|\Delta Z/Z_0|$ は穿孔深さ d に対して非線形的に増加したが,穿孔貫通時のインピーダンス増加率は約 2%であった。一方,さまざまな穿孔深さ d について,スラスト力に対するインピーダンス変化率(ピエゾ抵抗効果)は高々0.3%であり,無視できるほど小さかった。よって,インピーダンス変化の主要因は材料除去と POD 発生・進展であると考えられる。

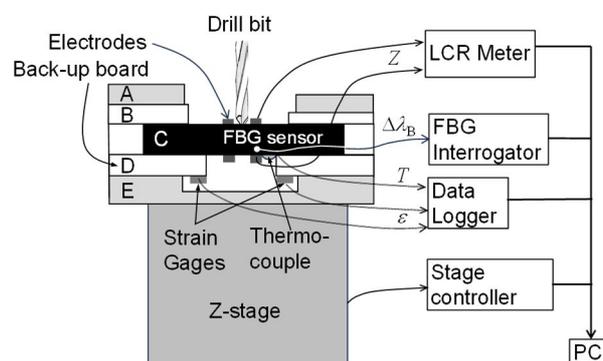


図2 穿孔モニタリング計測システム¹⁾

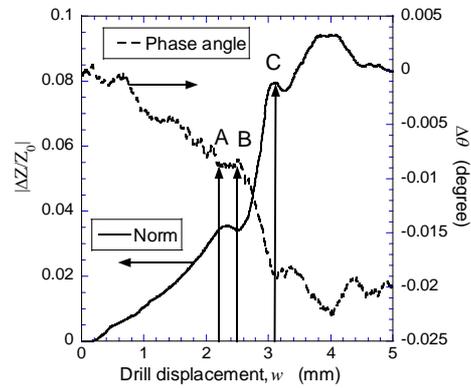
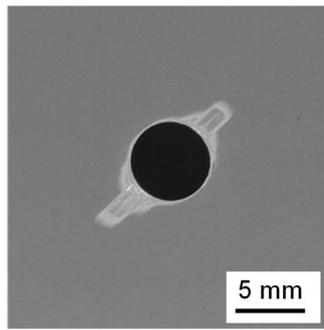


図3 条件 I における POD の様子とインピーダンス変化 (ring/ring 電極)¹⁾

(2) インピーダンスとスラスト力 図3に条件 I の場合の POD を表す軟 X 写真とドリル変位に対するインピーダンス変化 (ring/ring 電極使用) を示す。 $|\Delta Z/Z_0|$ は A 点までは材料除去と変形に伴い増加するが、その後、わずかに低下しプラトー域を示す。B 点から C 点までの急激な上昇は、POD 進展に対応している。一方、 $\Delta\theta$ は A 点までは徐々に低下する。A 点から B 点まではほぼ一定となり、B 点から C 点にかけて急激に低下する。以上の $\Delta\theta$ 低下は C 成分の増加に起因する。

一方、条件 II の場合の穿孔後の軟 X 線写真とインピーダンス変化 (ring/circle 電極使用) を図4に示す。断面観察によれば POD 発生時の POD 直径は穿孔径より小さく、最終的な POD 直径も孔直径とほぼ同じである。POD の小さい条件 II で ring/ring 電極を用いた場合、 F と Z 変化から POD 発生を検出することは難しい。一方、ring/circle 電極を用いた場合、POD 発生時である A 点において、インピーダンス変化量は小さいものの、その微分値は先鋭的なピークを示し、ring/ring 電極の約 2 倍のインピーダンス変化量を示した。ただし、 $\Delta\theta$ は POD 発生時に明瞭な変化を示さない。このように、POD 発生時の直径が穿孔径より小さい条件 II では、ring/circle 電極を用いれば、インピーダンス変化感度が向上し、POD 発生を検出できる。

(3) 臨界スラスト力 臨界スラスト力 F_C は加工条件と加工ツールにも依存するため、 F_C の予測式として、Hochen and Tsao³⁾ の単純な破壊力学モデルを修正した次式を提案する：

$$F_C = f \sqrt{\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

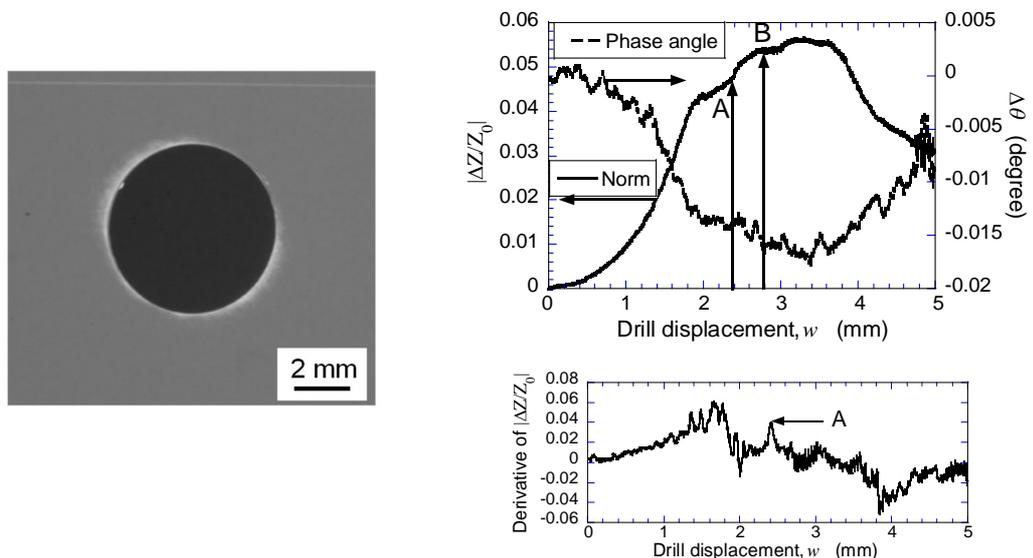


図4 条件 II における POD の様子とインピーダンス変化 (ring/circle 電極)¹⁾

ここで、 h はCFRP積層板の未加工厚さ、 G_{IC} 、 E 、 ν はそれぞれワークのモードI層間破壊じん性、ヤング率、ポアソン比である。 f は一般にドリル刃の形状による荷重分布および初期層間はく離長さに依存する係数であるが、本研究により、加工条件と加工ツールにも依存することが明らかになった。本研究で使用したCFRPの物性値と F_C の実測値を代入すると条件I、IIに対して、 $f = 2.3, 0.76$ である。

(4) 層間強化の効果 層間強化型CFRPを用いて穿孔試験を行った。加工条件は($N = 1600$ rpm $v = 0.05 \sim 0.4$ mm/s)であり、従来型CFRP積層板ではPODがほとんど発生しない条件である。色の濃い部分は出口付近だけでなく、様々な層間ではく離が発生していることを示している。このような損傷形態から、穿孔加工中に継続的に層間はく離が発生・進展していると推測され、前述の手法では層間はく離の瞬間の検出は難しいと判断される。このような多重層間はく離の発生は、加工中の摩擦熱による高温化の影響が考えられる。先行研究⁴⁾によれば、穿孔加工中の孔周りの表面温度は最高150に達しており、層間の熱可塑性樹脂層の軟化や劣化が考えられ、今後の継続研究課題としたい。



図5 層間強化CFRPの穿孔後の軟X線写真(左から $v = 0.05, 0.2, 0.4$ mm/s)

5. 結論

- (1) 電極形状を工夫することにより、CFRP積層板の穿孔損傷である層間はく離(POD)の発生をFBGセンサで測定したひずみと電気インピーダンス変化から検知できることを検証した。ただし、層間強化型CFRPでは同じ手法は適用できない。
- (2) 従来型CFRPと層間強化CFRPの穿孔損傷メカニズムを明らかにした。ただし、層間強化型CFRPでは多重層間はく離発生の原因を解明するための研究が必要である。
- (3) 加工条件と加工ツールに依存する係数の導入により、臨界スラスト力 F_C と層間破壊じん性 G_{IC} との関係を表す修正予測式を提案した。数値シミュレーションによる検証は今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 黄木景二, 高野椋生, 堤三佳, 水上孝一, 電気インピーダンス法による穿孔加工中のCFRP積層板の層間はく離検出, 材料, Vol.73, No.5 (2024) (in press).
- 2) J. Xu, N. Geier, J. Shen, V. Krishnaraj and S. Samsudeensadham, "A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling", Journal of Materials Research and Technology, Vol.24, pp.9677-9707 (2022).
- 3) H. Hocheng and C. C. Tsao, "The path towards delamination-free drilling of composites materials", Journal of Materials Processing Technology, Vol.167, pp.251-264 (2005).
- 4) B. Nasrullaha, K. Ogi and K. Mizukami, Seamless monitoring of internal strain during processing and drilling in a CFRP cross-ply laminate, Materials System, Vol. 37 (2020), 79-83.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MATSUDA Shinya, MURAMATSU Hoshihiko, YASHIRO Shigeki, OGI Keiji	4. 巻 49
2. 論文標題 Open-Hole Compressive Strength and Fracture Morphologies of Punched and Drilled CFRP Laminates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Composite Materials	6. 最初と最後の頁 48 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.6089/jscm.49.48	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuda Shinya, Mabe Kohei, Ogi Keiji, Yashiro Shigeki, Kakudo Yoshifumi	4. 巻 55
2. 論文標題 Characterization of piercing damage in CFRP cross-ply laminates after punch shear machining via impact loading	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 4111 ~ 4124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/00219983211031627	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 -

1. 著者名 Ogi Keiji, Yashiro Shigeki	4. 巻 216
2. 論文標題 Effect of the fiber cut angle on the shearing strength of unidirectional and cross-ply carbon-fiber-reinforced thermoplastic laminates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composites Part B: Engineering	6. 最初と最後の頁 108869 ~ 108869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesb.2021.108869	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 -

1. 著者名 黄木景二, 高野棕生, 堤三佳, 水上孝一	4. 巻 73
2. 論文標題 電気インピーダンス法による穿孔加工中のCFRP積層板の層間はく離検出	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 -
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 黄木景二, 劉 夢晨, 堤三佳
2. 発表標題 CFRP 積層板の穿孔過程におけるひずみ・損傷モニタリング
3. 学会等名 日本材料学会四国支部第19回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黄木景二, 劉 夢晨, 堤三佳
2. 発表標題 電気インピーダンスによるCFRP積層板の穿孔損傷モニタリング
3. 学会等名 日本材料学会第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiji Ogi, Mitsuyoshi Tsutsumi, Koichi Mizukami
2. 発表標題 Monitoring Hole-Drilling Damage in a CFRP Laminate by an Electrical Method
3. 学会等名 The 6th International Conference on Materials and Reliability (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinya Matsuda, Yuya Fujimoto, Keiji Ogi
2. 発表標題 Damage Accumulation Process and Electrical Impedance Response during the Punch Shear Machining of CFRP Laminates
3. 学会等名 The 6th International Conference on Materials and Reliability (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉 夢晨, 黄木 景二
2. 発表標題 FBGセンサと電気インピーダンスによるCFRPの加工モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keiji Ogi, Mitsuyoshi Tsutsumi, Koichi Mizukami
2. 発表標題 In-situ Monitoring of Delamination in CFRP Laminates during Drilling
3. 学会等名 International Conference on Composite Materials 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黄木景二, 高野棕生, 堤三佳
2. 発表標題 電気インピーダンス法による穿孔加工中のCFRP積層板の層間はく離検出
3. 学会等名 第48回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黄木景二, 尾崎良太郎, 水上孝一
2. 発表標題 CFRP積層板の厚さ方向導電率の数理モデル
3. 学会等名 第15回日本複合材料会議
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

愛媛大学 材料力学研究室
https://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikaisei/zairiki/Top_page.html

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------