

ラミノグラフィによる Ti/CFRP ハイブリッド積層板の内部損傷の
非破壊観察および 3 次元イメージング方法の確立
Establishment of Nondestructive Observation and 3-D Imaging Method for
Internal Damages in Ti/CFRP Hybrid Laminates by Laminography

中谷 隼人^a, 梶原 堅太郎^b, 秋田 貢一^c, 荻原 慎二^d
Hayato Nakatani^a, Kentaro Kajiwara^b, Koichi Akita^c, Shinji Ogihara^d

^a大阪市立大学, ^b(公財)高輝度光科学研究センター, ^c(独)日本原子力研究開発機構, ^d東京理科大学
^aOsaka City University, ^bJASRI, ^cJAEA, ^dTokyo University of Science

チタンと CFRP を積層したファイバメタル積層材の面外衝撃負荷による内部損傷に対し、放射光を用いたラミノグラフィによる非破壊観察を実施した。得られた再構成スライス画像より、チタンおよび CFRP の各層における損傷モードの面内分布が観察できた。さらに、スライス画像を 3 次元的に再構成することで、内部損傷の 3 次元イメージングが可能であることを示した。これより、ファイバメタル積層材の内部損傷評価における放射光ラミノグラフィの有用性を確認した。

キーワード： 炭素繊維複合材料, チタン, ファイバメタル積層材, 内部損傷, ラミノグラフィ

背景と研究目的：

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fibre Reinforced Plastics; CFRP) は比強度・比剛性に優れるため、構造物の軽量化が図れることから、近年では航空宇宙機への適用が進んでいる。2011 年に就航した Boeing 787 では重量にして 50% もの CFRP が使用され、航空機の運用における省エネルギー・低コスト化に貢献している。しかし CFRP はその構造上、鳥や雹の衝突や工具の落下等による面外衝撃によって、層間はく離といった特有の損傷が発生し、これによる強度低下が構造の致命的な破壊につながるということが知られている。このため、衝撃負荷における CFRP 構造の信頼性の確保は重要な課題となっている。

この問題の解決方法のひとつとして、繊維強化プラスチック (Fibre Reinforced Plastics; FRP) と金属を交互に積層したハイブリッド材料であるファイバメタル積層材 (Fibre-Metal Laminates; FML) の研究・開発が進んでいる。FRP の耐疲労性と金属の耐衝撃性の組み合わせによる優れた疲労特性と損傷許容性を示すことから、これまでにいくつかの軍用・民間航空機に適用された実績がある[1][2]。FML の面外衝撃負荷を扱う報告も多く発表されている。しかしながらそのほとんどは衝撃負荷により発生する内部損傷の評価について、衝撃負荷後の積層板の切断面から観察した結果に基づくものばかりであり[3][4]、内部損傷の 3 次元的分布を評価したものはみられない。このため、FML の破壊メカニズムや、有限要素法等の数値解析による損傷発生シミュレーションの有効性が十分に評価できないままとなっている。この傾向は特に最近盛んに報告されているチタン (Ti) と CFRP を積層した FML である Ti/CFRP 積層板を扱う研究では顕著である。これは主に FML が、吸収係数が大きく異なる材料の積層構造であること原因で、実験室的なラジオグラフィや X 線 CT 装置では、内部損傷の十分な観察が不可能なためである。

本課題はこのような材料を用いても 3 次元的内部損傷を非破壊観察できる可能性の高い放射光による放射光ラミノグラフィ技術を適用する。イメージング結果と実際の損傷の対応を考察することで、内部損傷の非破壊観察が可能であることを確認する。また、これらの結果をもとに、FML における損傷の発生・進展挙動や破壊メカニズムの更なる評価に向けた、内部損傷の最適イメージング方法の確立に向けた知見を得ることを目的とする。

実験方法：

1. 試験片作製と面外衝撃損傷の付与

本課題で用いる Ti/CFRP 積層板は、炭素繊維/エポキシプリプレグ (0.15 mm/ply, P3252S-15, 東レ) と純チタン箔 (厚さ 0.05 mm, (株)住友金属直江津) を積層し、オートクレーブ成形により作製

した。積層構成は $[45/0/Ti/-45/90]_{2S}$ とした([]内の数値は炭素繊維の配向角度, 2は繰り返し数, Sは対称積層であることをそれぞれ示す)。また, 純チタン箔とエポキシの接着性を向上させるために, 積層前に純チタン箔に過酸化水素水による表面処理を施した。成形した Ti/CFRP 積層板を 100 mm × 100 mm に切り出し, これを試験片とした。Ti/CFRP 積層板の厚みは約 2.6 mm であった。

試験片を有孔($\phi 80$ mm)金属板 2 枚で挟み込み, これを二度打ち防止装置付き落錘型衝撃試験機(11M-18P, (株)米倉製作所)に設置し, 衝撃を負荷した。インパクトの先端は直径 10 mm の半球形であり, インパクト重量は 2 kg, 落下高さは 1000 mm とした。衝撃負荷後の目視観察から, 衝撃負荷面においては, 衝撃負荷点における局所的なへこみ(デント)と, 表面 45°層の炭素繊維の破断が一部でみられた。また, 衝撃負荷背面では層間はく離に起因すると思われるなだらかな凸形状を示した。衝撃負荷による Ti/CFRP 積層板の内部損傷としては, Ti 層でのき裂発生, CFRP 層内のき裂, CFRP 層間はく離, および Ti と CFRP の界面はく離が主な損傷モードである。これら損傷の 3 次元イメージングが本課題の目的である。

2. 放射光ラミノグラフィによる内部損傷のイメージング

放射光ラミノグラフィによる損傷イメージングは, 産業用ビームライン BL19B2 の第 1 ハッチで実施した。放射光を用いたラミノグラフィは BL19B2 で既に実施されており, 佐野らが厚さ数 mm のアルミ合金板内部の疲労き裂損傷の 3 次元イメージングを成功させている[5]。本課題でも基本的にはこれと同様の測定レイアウトとし, アクリルパイプの上端に設置した試験片と X 線 CCD までの距離は 700 mm, 試験片回転軸の傾きは 30°とした(図 1)。試験片は衝撃負荷面とアクリルパイプ上端が接するように両面テープで固定した。検出器としてビームモニタ(浜松ホトニクス AA40P, 焦点距離 50 mm, 蛍光体 P43, 蛍光体の厚さ 0.01 mm)と CCD カメラ(浜松ホトニクス C4880-41S, 焦点距離 105 mm)を組み合わせ使用し, ピクセルサイズは 11.24 $\mu\text{m}/\text{px}$ であった。今回の X 線エネルギーは 25 keV とし, X 線投影イメージは露光時間 100 msec.のもと 0.5°の回転刻みで取得した。また, 100°毎に試料ステージを下げ, X 線視野に入らない状態の X 線直接投影イメージを取得し(露光時間 40 msec.), これを X 線投影イメージから除することで, X 線強度の分布を補正した。

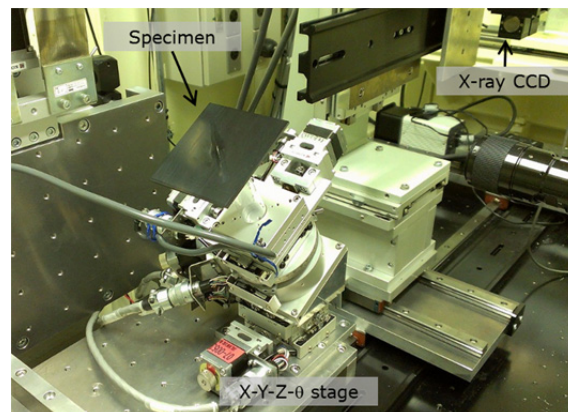


図 1. 放射光ラミノグラフィの測定レイアウト

結果および考察：

放射光ラミノグラフィにより得られた衝撃負荷後の Ti/CFRP 積層板の再構成スライス画像を図 2 に示す。図中の深さは衝撃負荷面側表面を基準とするが, 衝撃点付近の残留面外変形のため, 深さと積層板内部各層の位置は単純には一致しない。まず図 2(a)に示すように, CFRP 各層では炭素繊維の配向が縞模様で表現されるため, 繊維配向角が容易に識別できることがわかった。これは予想外の結果であったが, 今後の CFRP の非破壊探傷に向けて有用であるといえる。次に図 2(b)に CFRP 層内で炭素繊維に沿って発生する樹脂き裂(Matrix crack)を示す。図 2(c)の中央付近に見えるものは, 炭素繊維とほぼ垂直な鋸歯状のき裂であることから CFRP 層内における炭素繊維破断(Fibre breakage)である。この繊維破断付近には樹脂き裂も多く発生していることがわかる。Ti 層のき裂は図 2(d)で確認できるように, 比較的滑らかな曲線を示している。図 2(e)は衝撃負荷面から数えて 2 番目の Ti 層とそれに隣接する -45°層付近を示したスライス画像である。繊維破断が Ti 層のき裂とほぼ同じ場所に発生していることから, この繊維破断は Ti 層のき裂発生によって誘

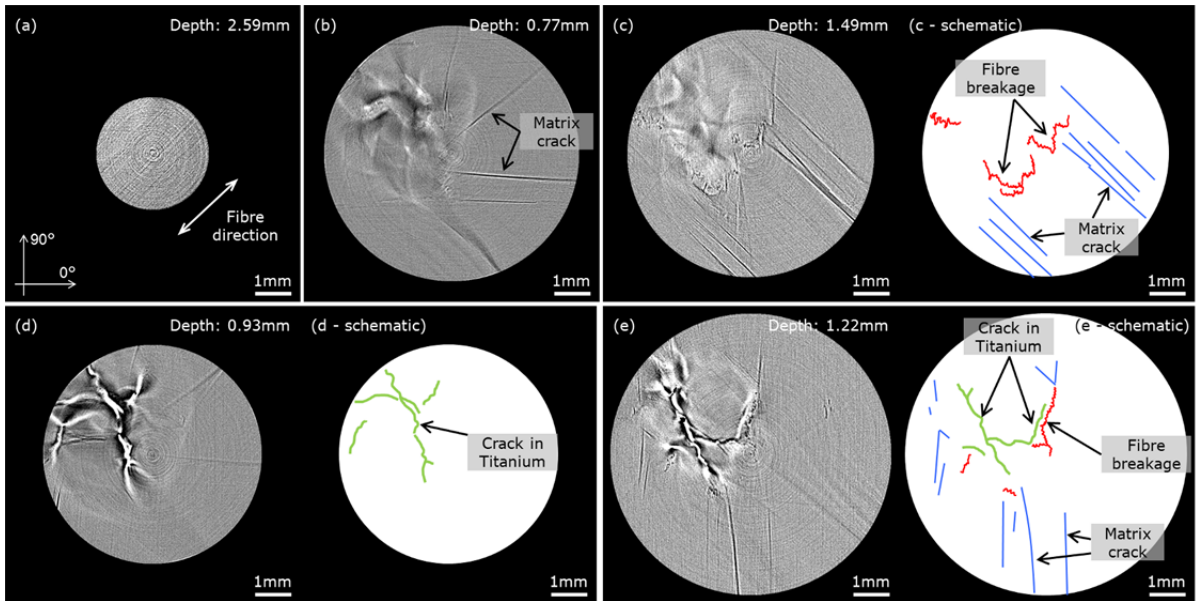


図 2. 各損傷モードを示す再構成スライス画像

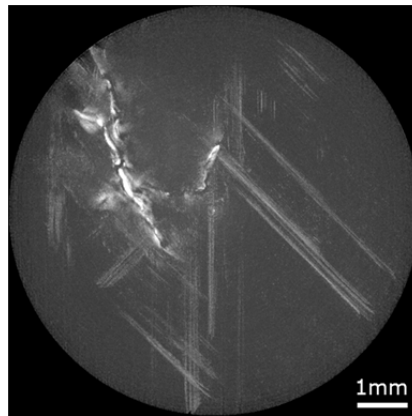


図 3. 再構成スライス画像の投影図

発されたものであると考えられる．図 3 は積層板の衝撃背面側半分のスライス画像を重ねて投影したものであり，各層のき裂の面内方向の位置関係がよくわかる．このような図は実験室レベルの X 線探傷では得ることが出来ない重要な結果である．

スライス画像を重ね，これを板厚方向に平行に再びスライスすることで断面図が得られる．この一例を図 4 に示す．今回は明瞭な図が得られなかったため，図 5 に示す本実験で使用した Ti/CFRP 積層板の断面写真(放射光ラミノグラフィによる非破壊観察後に取得．菱形枠が図 4 の観察領域に相当)でみられるような，Ti 層のき裂，CFRP 層内の樹脂き裂と層間はく離，および Ti 層と CFRP 層の界面はく離といった損傷モードの区別が不可能であった．今後，より高分解能の検出器を使用することで，各損傷モードの明確な区別が可能になると期待できる．

さらに，スライス画像を 3 次元的に再構成することにより，内部損傷の 3 次元イメージングを試みた(図 6)．その結果，不鮮明な箇所もあるが，Ti 層のき裂および CFRP 層の樹脂き裂と繊維破断の 3 次元分布を評価できることがわかった．これは他ではみられない画期的な結果である．

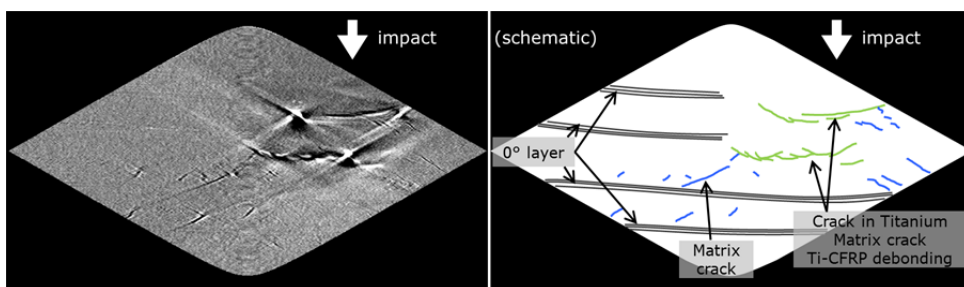


図 4. 断面スライス図

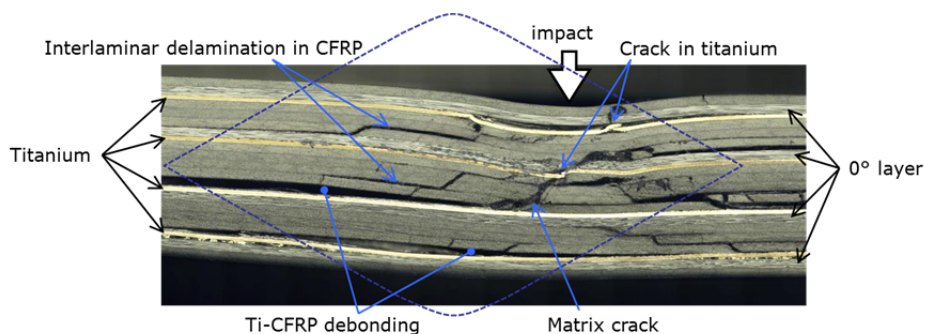


図 5. イメージングに使用した Ti/CFRP 積層板の断面観察

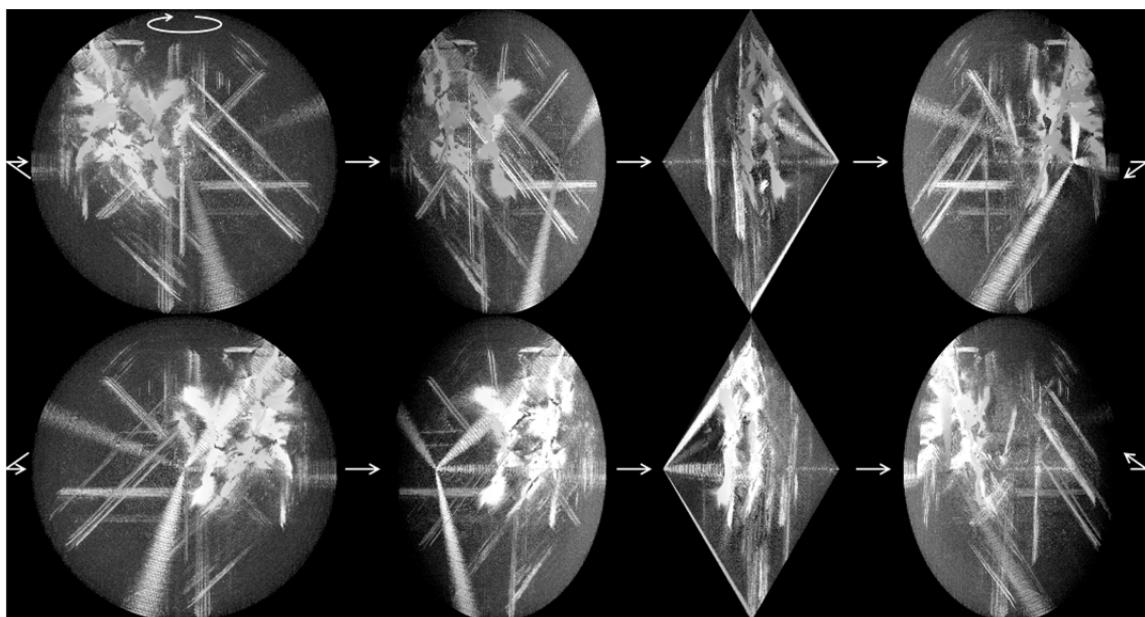


図 6. 内部損傷の 3 次元イメージング結果

より明瞭な結果を得るためには、X 線エネルギーや露光時間および再構成方法等の更なる最適化が必要であるが、Ti/CFRP 積層板のようなハイブリッド積層構造の内部損傷評価には、放射光ラミノグラフィが適していることが明らかとなった。

まとめと今後の課題：

これまで非破壊探傷が困難とされていたファイバメタル積層材(Ti/CFRP 積層板)の内部損傷が、放射光を光源としたラミノグラフィにより評価可能であることを確かめた。各再構成スライス画像により各層内の損傷の面内方向分布を観察することができた。さらに、内部損傷の 3 次元分布図という画期的な結果を得た。3 次元イメージングには更なる最適化が必要だが、ファイバメタル積層材においては放射光ラミノグラフィが有力な探傷方法であることを示した。

今回は放射光ラミノグラフィの有効性の確認を容易にするため、比較的激しい衝撃損傷を付与した試験片を使用した。このため損傷が複雑であり、かつ積層板に面外変形も残留したため、各損傷モードの区別が困難な箇所があった。今後は、比較的単純な損傷を付与した試験片を用いた各損傷モードの観察方法の最適化をはじめに実施し、その結果に基づいた 3 次元イメージング精度の改善を試みる。

参考文献：

- [1] A. Vlot and J. W. Gunnink, *Fibre Metal Laminates : an introduction*, Kluwer Academic Publisher (2001).
- [2] J. Sinke, *Journal of Materials Science*, **41**, 6777 (2006).
- [3] J. F. Laliberté, P. V. Stranznicky, C. Poon, *AIAA Journal*, **43**, 2445 (2005).
- [4] H. Nakatani, et al., *Composites: Part A*, **42**, 772 (2011).
- [5] 佐野雄二 他, 平成 23 年度 SPring-8 重点産業利用課題成果報告書(2011B1861).