

CFRP/Ti ハイブリッド積層板の内部損傷の3次元イメージングを 対象とした放射光ラミノグラフィの最適化 Optimization of Synchrotron Radiation Laminography for 3-D Imaging of Internal Damage in CFRP/Ti Hybrid Laminates

中谷 隼人^a, 梶原 聖太郎^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

放射光ラミノグラフィによる CFRP/Ti 積層板の面外衝撃損傷の非破壊探傷において、各損傷モードに適した測定パラメータについて評価した。模擬損傷を導入した試験片を用いることで再構成図における各損傷モードの見え方を確認した。主に評価対象と X 線 CCD との距離により、炭素繊維による X 線の屈折に起因する縞模様を調節することで観察が容易になることを示した。さらにこのことを利用することで、以前よりも明瞭な 3 次元イメージング結果が得られた。

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：

Boeing 787 や Airbus A350XWB といった民間航空機だけでなく、一般自動車への適用も進む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、構造の軽量化が図れることから、航空機や自動車の運用における省エネルギー化に貢献している。CFRP はその構造上、外来物の飛来による面外衝撃により内部に発生する層間はく離等の特有の損傷が、衝撃負荷後の強度低下を引き起こすことで知られる。この衝撃負荷における CFRP 構造の信頼性の確保のために、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。FML は繊維強化プラスチック(FRP)と金属を交互に積層したハイブリッド材料であり、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損傷許容性を示す[1]。

FML においては、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、面外衝撃により発生する内部損傷の十分な観察が不可能なため、このような報告はこれまでにほとんどみられない。そこで筆者らは、これまで非破壊探傷が困難とされていた CFRP とチタン(Ti)を積層した FML の衝撃損傷[2]について、放射光を光源としたラミノグラフィによる非破壊観察が有力な探傷方法であることを明らかにし[3]、航空機等の実構造への適用に向けた、FML の内部損傷評価技術や、これに基づく損傷発生・進展シミュレーション技術の精緻化の可能性を示した。しかしながら前回の課題では、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、比較的激しい損傷を付与した試験片を用いたことにより、材料に発生する各損傷モードの区別が困難であった。また、ビームエネルギー、X 線検出器位置等のセッティングやスライスイメージの再構成方法など、最適化すべき測定パラメータが多く残った。

そこで今回の課題では、CFRP/Ti 積層板に面外衝撃を負荷することで材料内に発生する各損傷モード(CFRP の炭素繊維破断、母材き裂、CFRP 層間はく離、Ti のき裂、CFRP と Ti の界面はく離)を予め模擬的に導入したモデル試験片を用い、各損傷モードに適した測定パラメータを探し出す。そしてこれを基に、各損傷モードが複雑に発生する実衝撃損傷の 3 次元イメージングの精度を向上させ、より明瞭なイメージング結果の取得を目的とする。

実験方法：

1. 試験片作製と模擬損傷または面外衝撃損傷の付与

本課題で用いる CFRP/Ti 積層板は、炭素繊維/エポキシプリプレグ(0.15 mm/ply, 東レ)と純 1 種純チタン箔(厚さ 0.05 mm)を積層し、オートクレーブ成形により作製した。基本の積層構成は [45/0/Ti/-45/90]_{2S} とし([]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), この場合の板厚は約 2.6 mm であった. 各模擬損傷の導入方法を表 1 に示す. はく離の模擬としてのテフロンシートの挿入は, 他の研究でも頻繁にみられる手法である. また, はく離の位置についてはこれまでの CFRP/Ti 積層板の衝撃損傷の実験的評価結果に基づき決定した. 実衝撃損傷の付与には落錘衝撃試験機を用い, 試験片単位板厚あたりの衝撃エネルギーとして 6 J/mm を負荷した.

表 1. 模擬損傷の導入について

損傷モード	積層構成等	導入方法
チタンき裂模擬	[45/0/Ti/-45/90] _{2s}	成形前にチタンに切れ込み
炭素繊維破断模擬	[45/0/Ti/-45/90/45/0/Ti/-45/90/90/-45/Ti/0/45/90/-45/Ti/0/45]	成形前に灰色で示す各層に繊維と直角方向に切れ込み
母材き裂模擬	[0 ₂ /Ti/90 ₄ /Ti/90 ₂] _s	成形後 0°方向に約 1.5 % のひずみを付与し 90°層に繊維方向に沿ったき裂を発生
CFRP 層間はく離模擬	[45/0/Ti/-45/(PTFE)/90/45/(PTFE)/0/Ti/-45/(PTFE)/90/90/-45/Ti/0/45/90/-45/Ti/0/45]	積層時(PTFE)で示す層間の半分にテフロンシート挿入
CFRP-Ti 界面はく離模擬	[45/0/(PTFE)/Ti/-45/90/45/0/(PTFE)/Ti/-45/90/90/-45/(PTFE)/Ti/0/45/90/-45/(PTFE)/Ti/0/45]	積層時(PTFE)で示す層間の半分にテフロンシート挿入
	[90 ₅ /Ti/0 ₅ /Ti/90 ₅]	成形後の 3 点曲げ試験により 90-Ti 間にはく離導入
実衝撃損傷	[45/0/Ti/-45/90] _{2s}	落錘による面外衝撃負荷 (衝撃エネルギー 6 J/mm)

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. 測定レイアウトは前回の課題[3]と同様であるが, 試験片と X 線 CCD までの距離と X 線エネルギーの組み合わせを, 距離 700 mm・X 線エネルギー 25 keV, 距離 200 mm・X 線エネルギー 35 keV のふたつとした(図 1). X 線投影イメージは試験片を 1.2 deg/sec の速度で回転させながら, 露光時間 100~150 msec.のもと取得した. なお, 各実験のはじめに X 線視野に入るものがない状態の X 線直接投影イメージを取得し(露光時間 30~60 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.

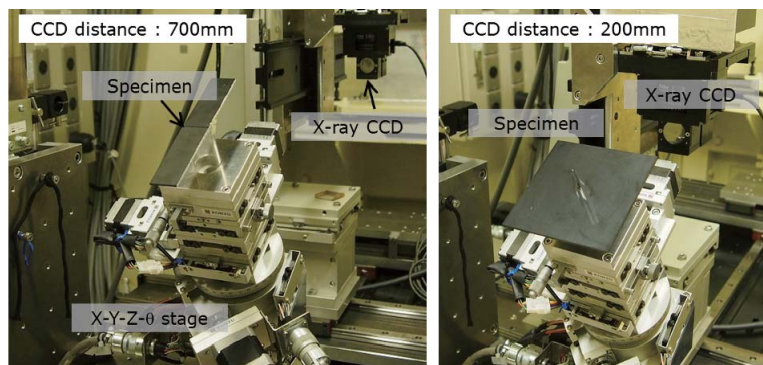


図 1. 放射光ラミノグラフィの測定レイアウト

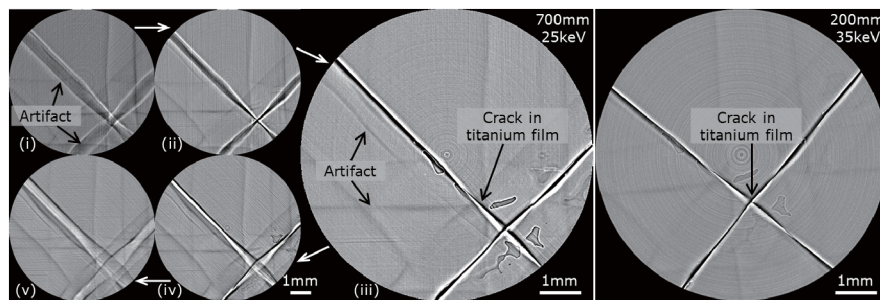
結果および考察:

チタンき裂模擬の再構成スライス画像を図 2(a)に示す. チタンのき裂についてはどちらの測定条件(CCD 距離-X 線エネルギー)においても見え方に変化はなかった. ただし, チタンのき裂付近を厚み方向に等間隔にスライスした画像(図の(i)~(v))より, ラミノグラフィ特有のアーチファクト(白色や灰色のすじ模様)がチタンのき裂を起点として発生し広がっていることがわかった. ここでは図で注目している×型のき裂だけでなく, 次に積層したチタンに導入した十字型のき裂からのアーチファクトも確認できる. 繊維破断模擬の再構成スライス画像を図 2(b)に示す. まず, 炭素繊維の配向を示す縞模様が, 200 mm-35 keV の場合に薄くなった. 紙面の都合上により省くが, このことは X 線エネルギーを変えずに CCD 距離を短くすることだけで発生することが今回の実

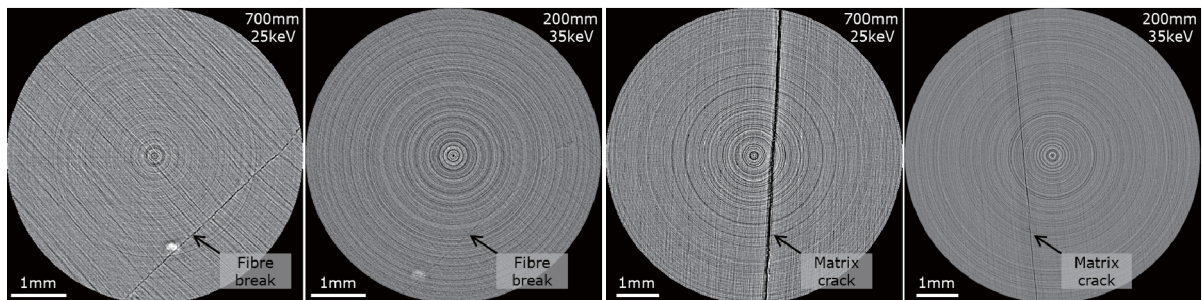
験で明らかとなった。これは、炭素繊維により X 線が屈折することが原因であり、CCD 距離が長いほど屈折の影響が大きくなるものだと考えられる。繊維破断によるアーチファクトはほぼみられず、700 mm-25 keV において鮮明にき裂が観察できた。これに対して母材き裂(図 2(c))については、炭素繊維と平行に発生するき裂であるため、200 mm-35 keV として炭素繊維による縞模様を抑えた方が確認しやすい。また 700 mm-25 keV では母材き裂からのアーチファクトにより多少き裂先端がぼやけるが、チタンのき裂ほどアーチファクトは発生しない。このことから、CFRP/Ti 積層板に発生する各損傷モードにおいて、再構成図におけるアーチファクトの主な原因となるのはチタンのき裂であるといえる。

テフロンシートを挟むことにより模擬した CFRP 内の層間はく離(図 2(d))は、炭素繊維を含む領域から繊維を含まない領域に変化することで確認できるため、繊維の縞模様が発生しやすい 700 mm-25 keV の方が良い条件だといえる。これは CFRP-Ti 界面はく離でも同様であったが、この場合は、繊維を含まない領域はテフロンシートではなくチタンである可能性もある。そこで、成形後の 3 点曲げにより実際に CFRP-Ti 界面はく離を発生させた試験片の再構成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得られた断面図を図 3 に示す。図 3(a)には参考のために実際の試験片を端面から撮影した写真を示しており、破線で囲む領域(実際には端面でなく内部)を観察している。ここで CFRP の 0°層と 90°層においては、炭素繊維が紙面に平行、および垂直にそれぞれ配向している。図より界面はく離により発生した空間は、0°層での縞模様や 90°層での斑模様も何もない空間として観察できるが、隣接するチタンとの区別は困難であった。例えばチタンに前処理を施すなど、空間とチタンが区別できる再構成画像を得られるような工夫が今後は必要になると考えられる。

実衝撃損傷の再構成スライス画像を 3 次的に構成することで得られた 3 次元イメージングの結果を図 4 に示す。700 mm-25 keV では炭素繊維の縞模様が目立つため内部の損傷が隠れてしま

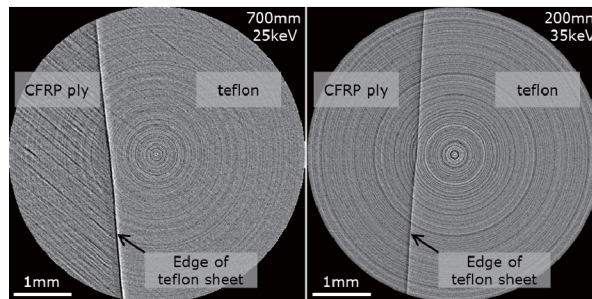


(a) チタンき裂



(b) 繊維破断

(c) 母材き裂



(d) CFRP 層間はく離

図 2. 放射光ラミノグラフィによる各模擬損傷の再構成スライス画像

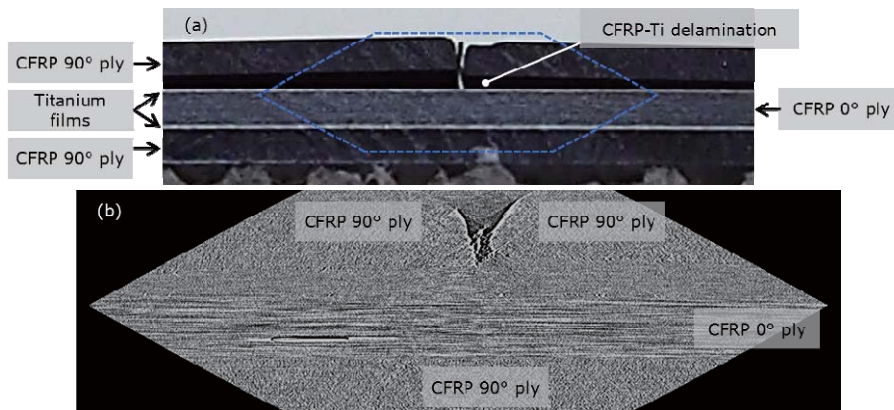


図 3. CFRP-Ti 界面はく離(断面スライス画像)

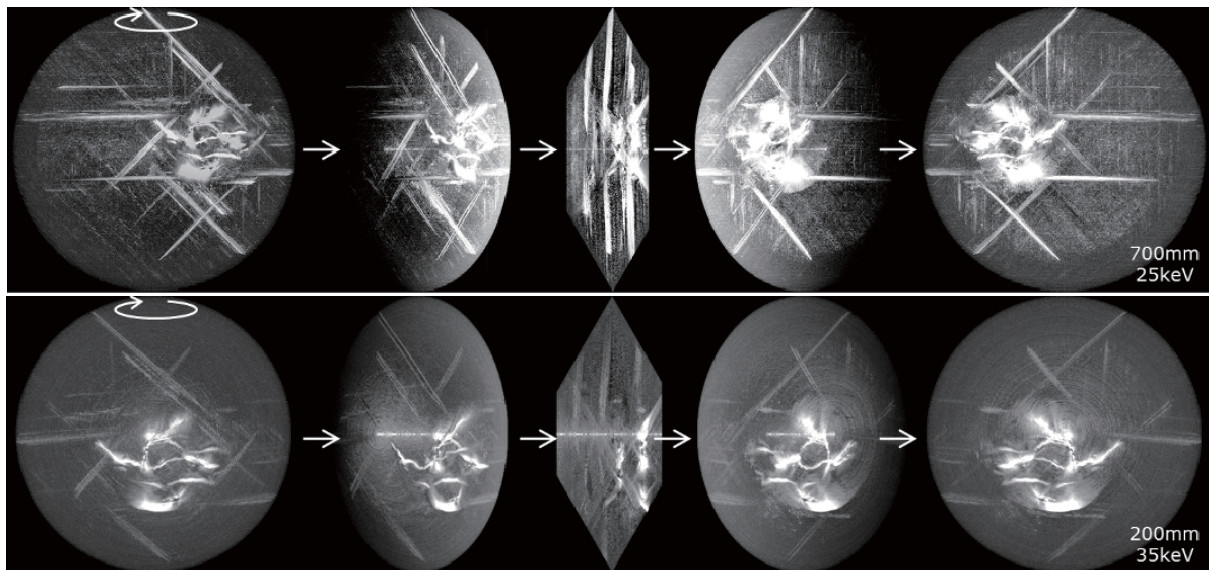


図 4. 放射光ラミノグラフィによる衝撃損傷の 3 次元イメージング

う箇所があるが、200 mm-35 keV では縞模様の影響が少ないため、損傷の分布が比較的明瞭に理解できる。以上のことから、内部損傷の全体的な 3 次元イメージングでは X 線 CCD の位置を近く設定すること、またスライス画像による損傷の観察には各損傷モードに適した条件のもと、場合によっては炭素繊維による縞模様の有無を利用することが望ましいことが明らかとなった。

まとめと今後の課題：

放射光ラミノグラフィによる CFRP/Ti 積層板の衝撃損傷の非破壊探傷において、より明瞭な再構成図を得ることを目的とし、測定パラメータについての評価を実施した。ビームエネルギーの違いの影響はみられなかったが、評価対象と X 線 CCD との距離によって、炭素繊維による X 線の屈折に起因する縞模様の程度に差が出た。この縞模様を観察対象とする損傷モード毎に調節することで観察が容易になるなど、積層板に発生する損傷モード毎に適した測定パラメータがあることを示した。

CFRP とチタンの界面はく離については、はく離による空間とチタンが隣接し、かつ炭素繊維による縞模様も利用できないため、これらの区別が困難であった。しかし、今回扱った FML の衝撃損傷においては、この界面はく離は重要な評価対象であることから、空間とチタンの区別が可能となるような手法について今後検討する必要がある。

参考文献：

- [1] J. Sinke, *Journal of Materials Science*, **41**, 6777 (2006).
- [2] P. Cortés, W.J. Cantwell, *Journal of Composite Materials*, **41**, 613 (2007).
- [3] 中谷隼人 他、平成 25 年度 重点産業化促進課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2013A1212).