

【リリース日時】  
令和元年 12 月 17 日(火)14 時  
【解禁日時】  
令和元年 12 月 17 日(火)19 時  
【本件リリース先】  
文部科学記者会、科学記者会、  
筑波研究学園都市記者会

令和元年 12 月 17 日

報道関係者各位

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

## 航空機用構造材料(CFRP)の破壊はどこから始まるか —放射光X線顕微鏡を用いたナノレベル観察—

- ・ 航空機用構造材料 CFRP に応力がかかりき裂が発生・進展する様子を、放射光 X 線顕微鏡を用いて三次元・非破壊・高空間分解能 (~50 nm) で観察することに初めて成功。
- ・ CFRP の強度設計のための情報として欠けていた、破壊の初期現象である 2 種類のき裂発生メカニズムを、初めてナノスケールで解明。
- ・ 放射光 X 線顕微鏡法は、接着界面、3D プリンターによる材料創製等の新分野への波及が期待できる。

### 【概要】

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の木村正雄教授、渡邊稔樹研究員、武市泰男助教、丹羽尉博技師、の研究グループは、航空機の機体や翼の構造材料として用いられている炭素繊維強化樹脂 (Carbon fiber reinforced plastic : CFRP) \*1 複合材料内に、き裂が発生・進展する様子を放射光 X 線顕微鏡\*2 を用いて空間分解能 50 nm 程度で観察することに初めて成功した (図 1)。

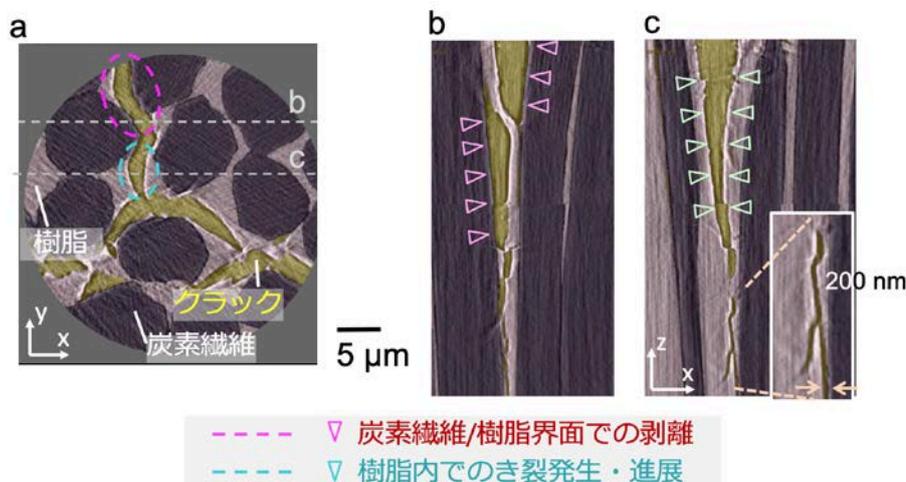


図1 応力印加下でのX線顕微鏡観察により解明されたCFRP内部のき裂進展  
(得られた三次元データをa X-Y段面、b,c Z-X 断面のそれぞれで二次元表現)

本研究では、CFRP 試料に応力を印加した状態で X 線を照射し X-CT 法<sup>\*3</sup>により内部の状態を非破壊で三次元観察した。その結果、(A)樹脂内でのき裂発生（図 1 中の水色部分）と、(B)炭素繊維/樹脂界面での剥離（同 ピンク色部分）、が競合して、き裂が発生するということが（起点の特定）、さらにその三次元での進展過程が初めて解明された。

ナノスケールでのき裂の発生・進展挙動は、CFRP のマルチスケール強度設計のための力学モデルの構築に必要とされながら、実験が困難であるため不明であった破壊の初期現象である。それを解明としたことは破壊力学での学術的意義に加え、航空機産業の材料分野への工学的意義が大きい。

この研究成果は、12 月 17 日 10 時（日本時間 12 月 17 日 19 時）に Nature Publishing Group の電子ジャーナル *Scientific Reports* に掲載されます。

### 【背景と本研究のユニークな点】

CFRP材料は、産官学をあげて、その特性の高機能化や製造プロセスの容易化・高度化等の研究が進められている高機能材料である。CFRPは小さなき裂が発生してもそれが致命的なサイズに進展しなければ材料全体として安全に使用できる材料であり、き裂発生や進展のメカニズムはCFRPを安全に使うために不可欠な情報である。CFRP内のき裂の観察（モニタリング）は、材料内部まで探査可能な超音波や放射線を用いて広く行われているが、その空間分解能は数mm程度に限られる。高空間分解能での測定には、光学顕微鏡、電子顕微鏡等が用いられるが、測定が材料の表面もしくは薄膜（<1 μm）に限定されるため、実際の材料内部で生じるき裂の発生を観察するのが困難であった。そこで、試料の透過能が高いX線・放射光を用いたX-CT法による観察が活用されてきたが、その分解能も数μmが限界であった。

本研究では、X線を集光・結像する光学素子を活用したX線顕微鏡（図2）を用いて、従来のX-CT法の空間分解能を20倍以上高めた。また、CFRPは、炭素繊維と樹脂という密度差が小さい2つの材料から構成されており、従来の吸収法では明瞭な像が得られないという課題があった。そこで、密度差だけでなく界面を強調して測定することが可能な位相コントラスト法<sup>\*4</sup>を用いて明瞭な像を得て、さらにその画像回復と解析に工夫を凝らして、明瞭な三次元像を得ることに成功した。

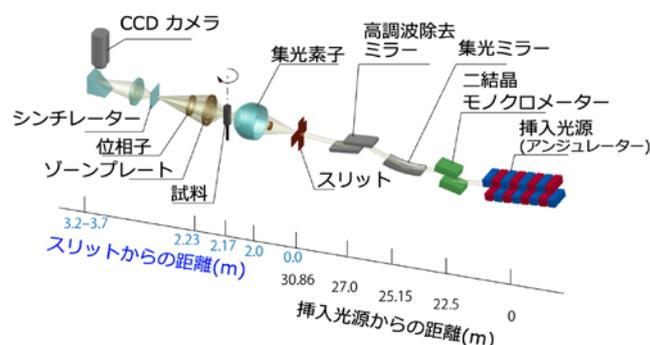


図2 本研究に用いたX線顕微鏡の概要（模式図）

本研究の大きな特徴は、試料に応力印加しながら、X線顕微鏡による高分解能観察を実現した点である。試料の形状、加工法、応力印加方法等を試行錯誤し、50 nmという

高分解能での三次元観察を行いながら、圧縮・引っ張り等の応力下での観察に成功した（図3）。

分解能を上げると視野が小さくなるのが、顕微鏡の本質的な特性である。そこで本研究では、高分解能での測定と合わせて、低分解能・広い視野でのX-CT法の観察を合わせて行い、マルチスケールでCFRPの観察を実施した。これにより、き裂が発生し伝搬して大きなクラックに成長するまでのメカニズム検討を行った。

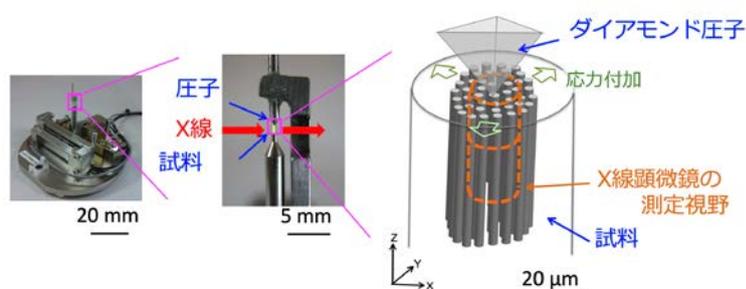


図3 応力印加下でX線顕微鏡観察するための実験方法の概要

その結果、(A)樹脂内でのき裂発生と、(B)炭素繊維/樹脂界面での剥離、が競合して、き裂が発生することが初めて明らかになった（図1）。単純に応力集中している場所からき裂が発生するのではなく、これら2つの過程の起こりやすさがき裂発生と進展に大きく関係していることも解明された。(A),(B)の2つのモードがき裂起点となることは、力学工学や材料力学の様々なモデル計算から予測されていたが、実際に測定されたのは初めてで、理論モデル計算の精度を大幅に上げることに大きく貢献した。また、単純に応力集中だけでなく、CFRPを構成する炭素繊維、樹脂、そして両者の界面、の強度のバランスが、実際のき裂の発生・進展を決めていることを明瞭に示した点で、材料設計の観点でインパクトが大きいと考える。

## 【本研究の意義、今後への期待】

今回解明されたナノスケールでのき裂の発生・進展挙動は、破壊の初期現象の解明として工学的・学術的意義が大きい。

CFRP材料の高機能化のために、樹脂の種類/構造の制御や、炭素繊維の表面改質による炭素繊維/樹脂界面の強度制御、が試行錯誤で進められている。ナノスケールでのき裂の発生・進展挙動を観察できる本アプローチ法は、そうした高機能化のために必要となる基礎的情報を提供することが可能であり、航空機産業の材料分野への貢献も期待できる。

また、本アプローチ法は、異相界面、接着界面でのき裂観察法として広く適用できる。近年、Additive manufacturing（3Dプリンターによる材料創製）が注目され、構造材料として使われる部材の製造も進められている。こうした材料では、接着界面での強度制御が重要であり、X線顕微鏡を用いた評価法の波及が期待できる。

<論文情報>

タイトル：Nanoscopic origin of cracks in carbon fibre-reinforced plastic composites

著者：Masao Kimura, Toshiki Watanabe, Yasuo Takeichi, Yasuhiro Niwa

掲載：Scientific Reports 9号（2019年12月17日）

<https://www.nature.com/articles/s41598-019-55904-2>

なお本研究は以下の支援を受けて実施された。

- ・内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)  
「革新的構造材料」(管理法人: JST) (ユニットD66)
- ・文部科学省・科学研究費助成事業 基盤研究(A) JP 19H00834
- ・KEK フォトンファクトリー共同利用実験課題  
2015S2-002, 2016S2-001, 2019S2-002

### 【お問い合わせ先】

<研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
物質構造科学研究所 教授 木村 正雄

Tel: 029-864-5608

Fax: 029-864-3202

E-mail: masao.kimura@kek.jp

<報道担当>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
広報室長 引野 肇

Tel: 029-879-6047

Fax: 029-879-6049

E-mail: press@kek.jp

## 【用語解説】

### \*1. CFRP (Carbon fiber reinforced plastic:炭素繊維強化樹脂)

直径数 $\mu\text{m}$ の炭素繊維と樹脂を組み合わせた複合材料。炭素繊維を一方向に揃えて樹脂で固めた薄い板 (prepreg) を、方向を変えて数十枚積層したものを目的とする形状に合わせて成形 (硬化) させる (図4)。軽量・高強度の構造材料として、航空機や自動車等に広くもちいられている。例えば、米・ボーイング社の787型ドリームライナー旅客機では、CFRP等の複合材料の使用比率(重量比)が50%にもおよび、翼や胴体といった大型部材に使用されている。

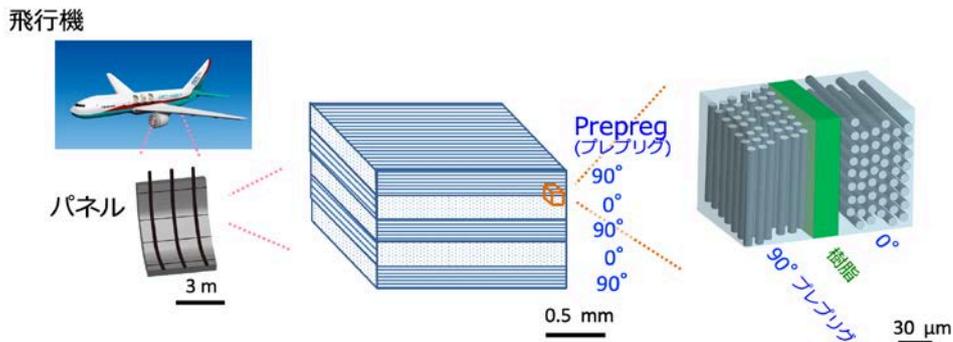


図4 CFRP複合材料の構造 (模式図)

### \*2. 放射光X線顕微鏡

光や電子はレンズを作製するのが容易であるため、光学顕微鏡、電子顕微鏡が広く使われている。それに対してX線 (放射光) はレンズの作製が困難で、本来顕微鏡に向いていない。しかし、材料を透過できる、材料中の原子の電子状態を観察可能、といったX線の特徴を活かしたX線顕微鏡に対するニーズが高まり、近年、内外の放射光施設ではその研究と応用が進んでいる。

放射光とは光速近くまで加速された電子の軌道が磁場で曲げられるときに生じる強力な光で、高精度でのX線分光やX線回折実験などの光源として利用される。

### \*3. X-CT法 (X-ray computed tomography: X線コンピューター断層撮影法)

試料をすこしずつ回転させて X線を試料に照射してその透過像 (吸収像) を測定し (図5)、得られた多数の透過像から、数学的に三次元像を再構成する方法。物体内部の欠陥や組織を非破壊で観察可能であるため、構造物の診断、医療等に広く活用されている。但し、一般的なX-CT法は、空間分解能が数 $\text{mm}$ ~数 $\mu\text{m}$ 程度で、かつ密度差が小さな組織の観察は困難である。

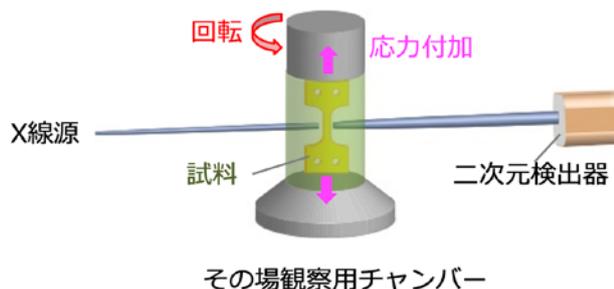


図5 X-CT法の測定模式図

#### \*4. 位相コントラスト法

従来のX-CT法は、X線の透過像（吸収像）を再構成して三次元像を得ている。そのため、密度差が小さな材料同士の界面を明瞭に観察することが困難であった。X線は直進性が大きいですが、僅かであるが界面で屈折し位相差が生じる（図6）。この特徴を利用した結像法が位相コントラスト法であり、密度差が小さな材料同士の界面を観察することができ、近年、生体材料を中心に応用が広がっている。

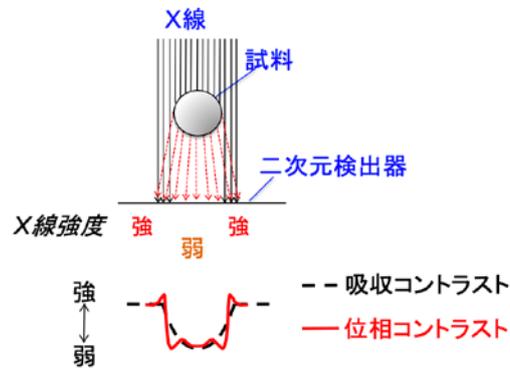


図6 位相コントラスト法の原理図