

Application News

マイクロフォーカスX線CTシステム inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus
位相コントラストX線CTシステム Xctal™ 5000

2種類のX線CT装置を用いたゴム製の疲労試験片の観察

右田 かよ 佐藤 渉

ユーザーベネフィット

- ◆ マイクロフォーカスX線CTシステムを用いることで、ゴムの微小な欠陥一つ一つの体積や形状を詳細に観察できます。
- ◆ 位相コントラストX線CTシステムを用いることで、微小な亀裂の大まかな位置・大きさを効率的に検査できます。
- ◆ 疲労試験の各サイクル数において、ゴムに発生した欠陥や亀裂の進行状況を比較できます。

■はじめに

ゴム製品は、自動車のタイヤや工業製品、医療機器など広い分野で使用され、重要な役割を果たしています。しかしながら長期間使用すると、疲労や劣化により機能が損なわれるおそれがあります。そのため、ゴムの耐久性評価は重要な課題です。

使用過程での欠陥の進行を評価するには、破断前に検査を行う必要があります。切断しても検査可能ですが、復元できない、切断面しか評価できないなどのデメリットがあるため、非破壊での検査が有効です。

X線CT装置を用いることで、内部欠陥の検出や、三次元的な観察が可能です。X線の可視化方法には、一般的な手法として物質に吸収されたX線量を可視化する「吸収イメージング」や、従来とは異なる新しい手法としてX線の位相変化を可視化する「位相イメージング」があります。本稿では、可視化方法の異なる2種類の装置を用いて、ゴムの疲労試験片を観察しました（表1）。

表1 使用装置と特長、ポイント

装置名	本事例における特長	本事例の観察ポイント
inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus	吸収イメージングにより高拡大撮影で微小な欠陥の輪郭を鮮明に観察可能	欠陥の体積、形状、個数割合
Xctal 5000	位相イメージングにより広視野撮影で微小な亀裂を効率的に検査可能	亀裂の位置・およその大きさ

■撮影対象

今回は、図1(a)に示す4つのゴム疲労試験片を撮影しました。試験片の概要・試験条件を表2に示します。サイクル数の多いワーク1、2を屈曲させると、目視でも外側の亀裂を確認できます（図1(b））。（サンプル提供：化学物質評価研究機構様）

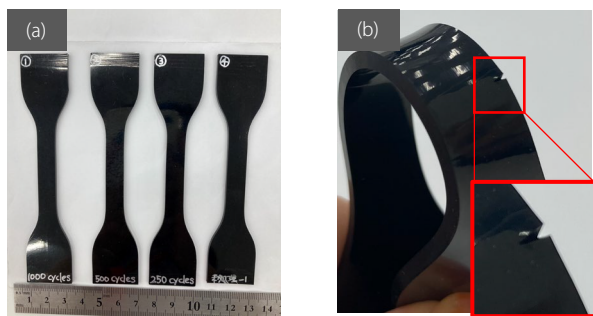


図1 疲労試験片
(a) 左からワーク1, 2, 3, 4 (b) ワーク1亀裂部

表2 疲労試験片の概要

	1	2	3	4
材質	カーボンブラック配合加硫アクリロニトリルゴム			
変位	200 mm（切断時伸びの約50%）			
サイクル数	1000サイクル	500サイクル	250サイクル	—

■inspeXio SMX-225CT FPD HR Plusを用いたゴム疲労試験片の撮影

inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus（図2）は、マイクロフォーカスのX線CTシステムです。一般的な可視化手法である吸収イメージングを用いて、部品の内部構造などを高分解能で可視化できる装置です。検出器で取得したX線量をそのまま画像化するため、微小部を観察するには高拡大で撮影する必要があります。

今回の撮影条件を表3に示します。図1(b)に示した通り、外側の亀裂を視認するにはワークを屈曲させる必要があるため、本ワークに生じた欠陥のほとんどは塞がった状態であると考えられます。塞がった欠陥は空気の部分がほとんど存在せず、欠陥部を通過するX線量がごくわずかなため、そのままでは検出が困難です（図3(a））。そこで今回は、図3(b)に示す治具を用いて、ワークを10mm伸長しながら撮影しました。（治具提供：化学物質評価研究機構様）

さらに、微小な欠陥を観察するためには拡大撮影が有効ですが、試験片平行部の幅に合わせて拡大すると平行部の長さ三分の一程度しか撮影視野に入りません。そこで、連続スライス機能を用いて3回に分けて拡大撮影し、それらのデータを結合しました。



図2 inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus

表3 撮影条件

項目	条件
管電圧	200 kV
管電流	70 μ A
ビュー数	2400
アベレージ数	2
FOV（撮影視野）	15.4 mm
ボクセルサイズ	0.015 mm
撮影時間	60分（20分×3回）

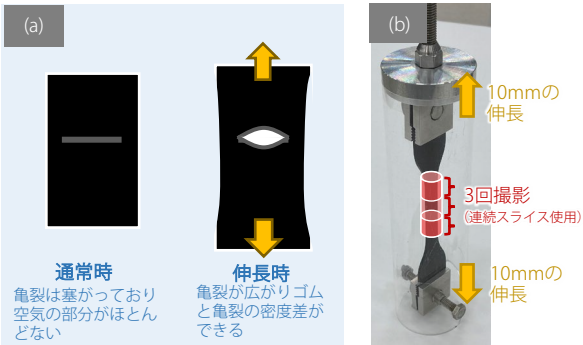


図3 ゴムに発生した亀裂の撮影における注意点
(a) 塞がった亀裂の可視化イメージ図 (b) 治具

■ inspeXio SMX-225CT FPD HR Plusによる撮影結果

VGSTUDIO MAX（オプションソフトウェア）を用いて、欠陥解析を行いました。各ワークについて、最大欠陥付近の断面画像を図4に示します。なお、ワーク4（試験なし）は欠陥が検出されなかったため、除外しています。ワーク1～3の断面を比較すると、サイクル数によらず欠陥は薄い円盤形状であることが分かります。

次に、ワーク1～3において、欠陥を黄色に色付けした3D画像を図5に示します。サイクル数が増えるごとに、矢印に示す大きな亀裂が目立って見えますが、この図では小さなものは判別困難です。

さらに、欠陥解析の数値結果を表4に、体積の個数割合を解析した結果を図6に示します。表4から、サイクル数が増えると、内部の欠陥数、内部欠陥の総体積および最大欠陥の体積が増えることが分かります。一方で、サイクル数が増えると比較的小さな欠陥（図6オレンジ部）の割合が減少しています。このことから、サイクル数の増加により、内部に生じた小さな欠陥が徐々に大きくなると推測できます。

このように、inspeXio SMX-225CT FPD HR Plusで撮影したデータから、試験片内部の微小な欠陥一つ一つを解析できるため、異なるサイクル数での欠陥個数や体積の比較が可能となります。今回はサイクル数が異なる試験片を複数用意しましたが、同一の試験片に対してサイクル数を増やすごとにCT撮影を実施し、欠陥や亀裂の進行を比較することも可能です。

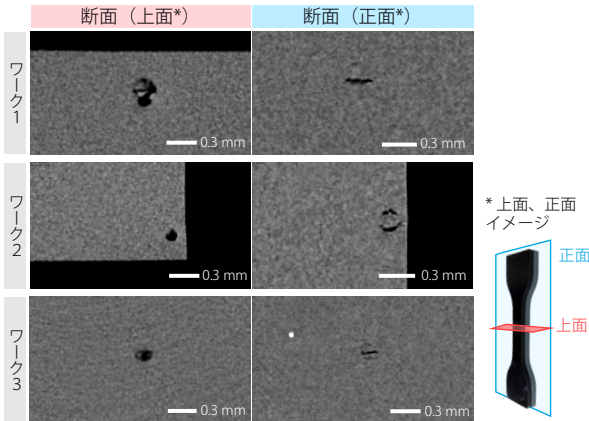


図4 断面画像（最大欠陥付近）

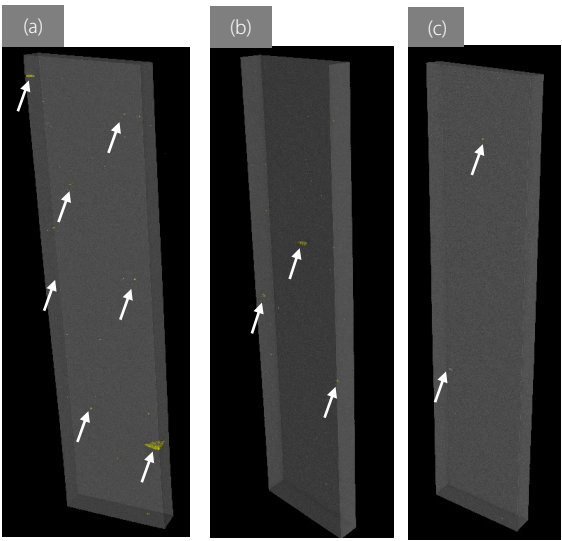


図5 3D画像（欠陥に色付け）
(a) ワーク1（1000サイクル） (b) ワーク2（500サイクル）
(c) ワーク3（250サイクル）

表4 欠陥解析結果

ワーク	1	2	3	4
サイクル数	1000	500	250	—
外側の亀裂数	10本	4本	—	—
内部欠陥数	32個	30個	16個	—
内部欠陥総体積	$5.6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	$3.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	$1.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	—
最小欠陥体積	$2.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$	$2.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$	$2.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$	—
最大欠陥体積	$1.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$	$6.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$	$5.0 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$	—

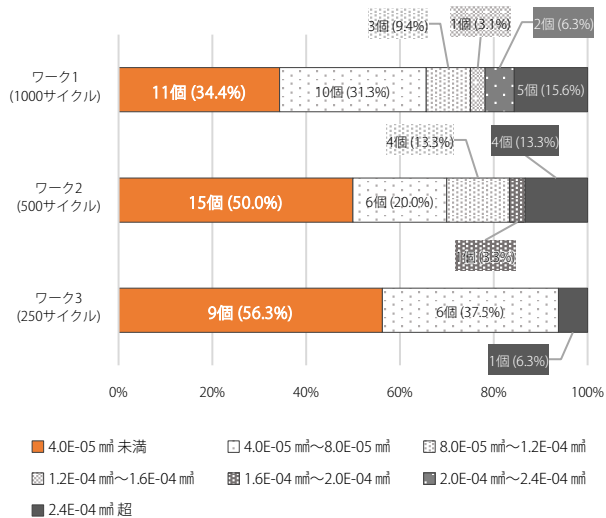


図6 欠陥体積の割合

■ Xctal 5000を用いたゴム疲労試験片の撮影

次に、Xctal 5000（図7）での撮影事例について紹介します。本装置は、X線の位相変化を可視化できる装置です。一般的なX線検査装置では不可能であった、広視野での微細構造群の観察や、軽元素材料の高感度撮影が可能です。詳しい原理は参考のアプリケーションニュース（[01-00568-JP](#)）をご覧ください。

今回は、ワーク1（1000サイクル）について、透視像と断面画像を取得しました。撮影風景を図8に示します。本装置では、ワークを伸長させずにそのまま立てて撮影しました。



図7 位相コントラストX線CTシステムXctal™ 5000

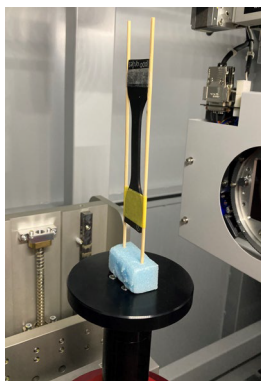


図8 Xctal 5000による撮影風景

先述の通り、本装置での可視化方法（位相イメージング）は、一般的な可視化方法（吸収イメージング）とは異なります。吸収イメージングでは、検出器で取得したX線量の値を「吸収像」としてそのまま画像化しますが、位相イメージングでは、回折格子を移動させ複数枚の透視画像を取得し、そこから計算した結果として「散乱像」や「屈折像」を得ます。

吸収像のコントラストは物体で吸収されたX線量に基づいて決定されます。そのため、解像度未満の微小な亀裂は背景のコントラストに隠れてしまい可視化が困難です（図9(a)）。一方で位相イメージングで得られる散乱像では、X線の散乱量に基づいてコントラストが決定されます。微小な亀裂はX線が散乱しやすいため、解像度以下の大きさであっても母材とのコントラスト差が得られ可視化できます（図9(b)）。これにより、広視野と微小な亀裂の観察を両立しています。

したがって、ワークを伸長させる必要がなく、図8のように2本の棒で挟んで固定するシンプルな設置が可能です。また、広視野でも微小な亀裂を観察できることから、拡大撮影も不要です。

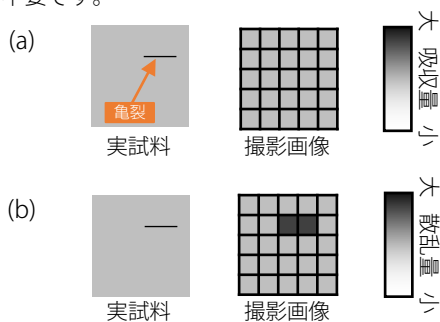


図9 吸収イメージングと位相イメージング（散乱）の違い
(a) 吸収イメージング (b) 位相イメージング（散乱）

■ Xctal 5000による透視撮影

透視撮影の条件を表5に示します。また、図10(a)にワーク1の吸収透視画像、図10(b)に散乱透視画像、図11に亀裂部の拡大図をそれぞれ示します。

吸収像では、欠陥は白く、母材より密度の高い介在物は黒く表示されます。このことから、図11(a)において介在物（青矢印）は確認できますが、欠陥は判別困難であることがわかります。一方で、散乱像ではX線の散乱が起きやすい小さな亀裂と介在物がどちらも黒く表示されるため、図11(b)だけでは介在物（青矢印）と亀裂（黒矢印）の区別はつきません。そこで、吸収像と比較することで介在物と亀裂を区別し、散乱像で亀裂位置やおよその大きさを観察可能にします。

このように撮影視野に対し極めて微小な亀裂であっても、散乱像によって容易かつ鮮明に検出することができます。今回は細長いワークを撮影していますが、ワークサイズによらず同じように亀裂を検出できるため、拡大撮影ができない大きいワークに対しても有効です。

表5 透視撮影条件

項目	条件
管電圧	40 kV
管電流	800 μ A
格子角度	0°
積算回数	10
FOV（撮影視野）	40.9 mm
解像度	0.018 mm
撮影時間	7分

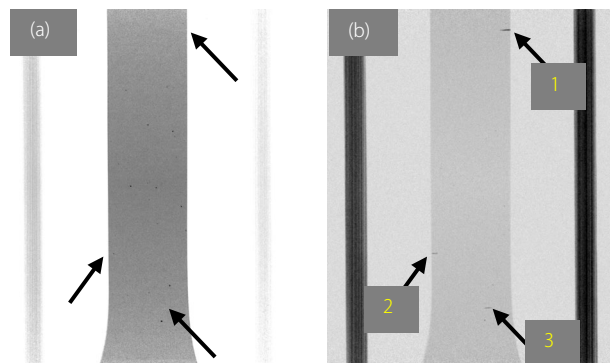


図10 ワーク1 透視画像
(a) 吸収像 (b) 散乱像

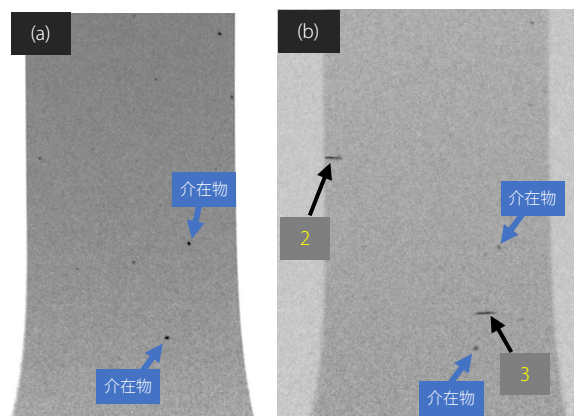


図11 ワーク1 透視拡大画像（デジタルズーム）
(a) 吸収像 (b) 散乱像

■ Xctal 5000によるCT撮影

最後に、Xctal 5000でCT撮影を行いました。CT撮影の条件を表6に示します。

CT撮影結果である正面断面画像と側面断面画像を図12、13にそれぞれ示します。本装置では吸収像と散乱像を同時に取得できるため、同一断面を並列に表示しています。断面画像では図10で示した透視画像における“3”の亀裂が見えます（図12、13の丸印）。透視画像と同様に吸収像では亀裂が低コントラストである一方で、散乱像では高コントラストに亀裂を観察できます。断面画像では、ある断面に存在する亀裂しか観察できないため、一度にすべての亀裂を検知できません。しかしながら、側面の断面画像が得られるので、亀裂の深さを観察することができます。

今回はワーク1の撮影事例のみを紹介しましたが、同一試験片に対してサイクル数を増やすごとに透視やCT撮影を行うことで、亀裂の大まかな位置、数、深さなどを観察し比較することも可能です。

表6 CT撮影条件

項目	条件
管電圧	40 kV
管電流	800 μ A
格子角度	0°
ビュー数	1500
アベレージ数	4
FOV（撮影視野）	40.9 mm
ボクセルサイズ	0.040 mm
撮影時間	258分

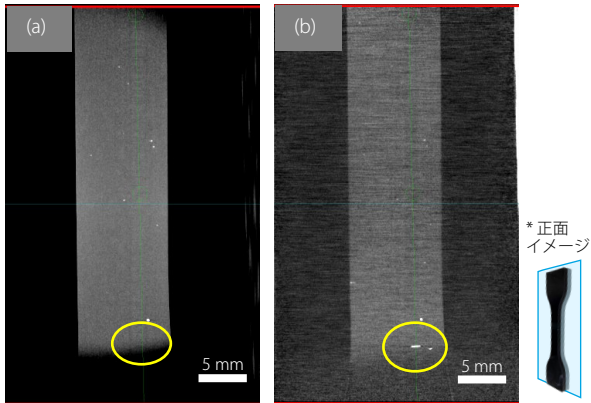


図12 正面断面画像 (a)吸収像 (b)散乱像

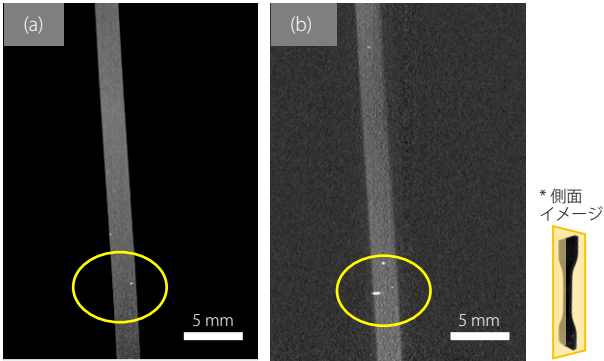


図13 側面断面画像 (a) 吸収像 (b) 散乱像

inspeXio、SMXおよびXctalは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

■ まとめ

マイクロフォーカスX線CTシステムと、位相コントラストX線CTシステムの2種類の装置を用いて、ゴムの疲労試験片を撮影しました。inspeXio SMX-225CT FPD HR Plusでは、ワークを伸長しながら拡大撮影することで、小さな欠陥まで詳細に観察でき、サイクル数ごとの欠陥体積や個数の比較評価ができました。Xctal 5000では、ワークの伸長や拡大撮影をしなくとも、微小な亀裂のおおよその向き、大きさ、深さを判別できました。どちらの装置も非破壊で検査できるため、同一の試験片を使用して、欠陥や亀裂の進行状況を任意のサイクル数で把握することが可能です。ゴムの疲労試験片の撮影・解析における各装置の特徴を表7に示します。

表7 各装置の特徴

	inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus	Xctal 5000
メリット	最小10^{-5} mm³オーダーの微小な欠陥の体積・個数などの詳細な解析が可能	- 撮影時のワークの伸長が不要 - 拡大撮影不要 - 微小な亀裂のおおよその位置や大きさを効率的に観察可能
必要な工夫が点	- 撮影時ワークの伸長が必要 - 細かい欠陥を解析するには、拡大撮影が必要	- 亀裂の形状や体積などの詳細な解析には向かない - 撮影時間が比較的に長い

<謝辞>

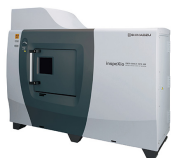
本アプリケーションの作成にあたり、化学物質評価研究機構様には、試料・治具のご提供や疲労試験条件のご教示など多大なるご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

<関連アプリケーション>

1. X線観察は新たなフェーズへ位相コントラストX線CTシステムの原理紹介 [Application News 01-00538-JP](#)

＞ アンケート

関連製品 一部の製品は新しいモデルにアップデートされている場合があります。



＞ inspeXio
SMX-225CT FPD HR
Plus
マイクロフォーカスX線CTシステム



＞ Xctal 5000
位相コントラストX線CTシステム

関連分野

＞ 工業材料・マテリアル

＞ ゴム - 工業材料/マテリアル

＞ 価格お問い合わせ

＞ 製品お問い合わせ

＞ 技術お問い合わせ

＞ その他お問い合わせ