

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04349

研究課題名（和文）動的X線CTによる微粒子複合ゴムの振動減衰メカニズムの解明

研究課題名（英文）Research on damping characteristics of fine particle composite rubber by dynamic X-ray CT

研究代表者

松原 真己（Matsubara, Masami）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：40736427

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ゴム材料は減衰材として利用されることから、動的粘弾性試験から得られる損失係数と微細構造の関係が明らかになることでより高性能な減衰材の開発に繋がると考えられる。本研究では動的X線CT手法を構築し、動的条件下の材料内部の変形挙動を直接評価する手法を確立することを目的とした。その結果、加振1Hz、空間分解能0.5  $\mu\text{m}$ における4D-CTを実現した。得られた各位相におけるX線CTから局所ひずみを求め、局所ひずみ振幅として変形挙動を評価した。配合条件によって局所ひずみ振幅の分布曲線が変化すること、微粒子複合に伴い局所ひずみ振幅の分布曲線のピークが下がり、分布が広域化することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動工学においては、制振材の減衰特性を実験的に評価し、解析モデルと実験式モデルを組み合わせたSemi-Physicalなモデルの構築に注力してきた。このとき、対象物を均質材料として考えており、取り扱いを簡易にしており、配合条件によるエネルギー散逸機構の違いを明確にできない。本研究では動的X線CTを用いることで「定常加振下における材料内部の微視的な変形挙動」を把握し、「エネルギー散逸の原因」および「配合条件と減衰特性の関係」を明らかにする。

研究成果の概要（英文）：Since rubber materials are used as damping materials, clarification of the relationship between loss factor and microstructure obtained from dynamic viscoelastic tests will lead to the development of higher performance damping materials. In this study, a dynamic X-ray CT method was developed to directly evaluate the deformation behavior of materials under dynamic conditions. As a result, 4D-CT with 1 Hz excitation and 0.5  $\mu\text{m}$  spatial resolution was realized. Local strain was obtained from the X-ray CT at each phase, and the deformation behavior was evaluated as the local strain amplitude. It was found that the distribution curve of the local strain amplitude changed depending on the compounding conditions, and that the peak of the distribution curve of the local strain amplitude decreased and the distribution became wider as the fine particles were compounded.

研究分野：機械力学

キーワード：X線CT ゴム材料 制振材

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

輸送機械や電化製品などの機械構造物では環境負荷低減、高機能化、利便性や携帯性を目的として、小型化・軽量化が進められている。これに伴い、振動に対する感度が増加するという問題が発生している。そのため、適切に振動を抑えることは必要不可欠であり、その対策として制振材の役割は重要である。制振材としては一般にゴムなどの粘弾性材料が用いられており、動的エネルギーを熱エネルギーに変換することでエネルギー散逸を促す傾向が強い。さらに、図 1 のように粘弾性材料に微粒子を複合化すると、減衰特性が更に向上するという特異な特性が現われる。微粒子界面における摩擦、微粒子による変形阻害等が要因であると指摘されているが、直接観察した事例はなく、そのメカニズムは未解明である。

この解明には材料内部の構造を立体的に可視化できる X 線断層撮影 (X 線 CT) による観察が有用であると考えられる。これは試験片を回転させながら透過した X 線強度のコントラストを断層像として取得する方法である。しかしながら、回転中に試験片が状態変化するような動的条件下での X 線 CT (動的 X 線 CT) による計測は難しい。そのため、準静的条件下での X 線 CT がよく利用されている。一方、制振材の減衰特性評価は定常加振下で行われており、動的条件下での X 線 CT 手法の構築が必須である。

### 2. 研究の目的

本研究では定常加振下の動的 X 線 CT 手法を構築し、材料内部の変形挙動を直接評価することで振動減衰のメカニズム解明に取り組む。減衰特性はエネルギーの散逸が発生した巨視的な結果として現れる。そのため、微粒子/ゴム界面状態、ひずみ分布を観察することでエネルギー散逸機構が明らかになれば、粘弾性材料に複合化する微粒子の形状、量や配向などの配合条件から所望の減衰特性を持つ制振材を設計できる。

一般的に X 線 CT は対象物を回転させながら計測するため、動的条件下での観察には不向きである。一方、制振材の減衰特性評価では定常加振下の挙動を計測していることに着目した場合、回転中に 180 度の断層像を全て撮影する必要はない。そこで、撮影タイミングと定常加振の位相タイミングを変えて撮影し、位相タイミングが一致している断層像を集めて立体像化を行うことで、動的 X 線 CT を実現する。このとき同時に試験片の表面ひずみ分布を計測することで、ミリオオーダー構造体における変形挙動とナノ・マイクロオーダーのひずみ分布 (X 線 CT より取得) の関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### 【材料】

試験片としては天然ゴム単体 PET 繊維を複合化した天然ゴムを用意した。試験片形状は JIS 規格のダンベル試験片形状 (JIS K 6251 3 号) を 1/5 縮尺したものを使用する。繊維配向は引張方向と平行になるようにした。厚さは 1mm とし、断面全体が X 線 CT の撮像内になるように工夫した。

#### 【Phase locked loop を用いた動的 X 線 CT】

動的 X 線 CT の場合は変形を周期的に加えて、変形位相を変えながら X 線 CT 観察を行う方法をとる。このような方法は流体力学や音響学分野でよく利用される手法であり、それらの分野では Phase locked loop (PLL) による計測と呼ばれている。本研究では、PLL を利用した動的 X 線 CT 法として、sin 波加振下において回転位相と加振位相の同期をとった状態で透過像を得ることで振動曝露下の X 線 CT 像を構成する手法を採用した。Fig.4 に動的 X 線 CT 法の概略を示す。ある回転位置で 1 加振周期あたり、N 分割したタイミング (加振位相) で撮影を行う。次にその撮影動作を各回転位置 (0~180deg) でくり返し行う。最後に得られた透過像を各加振位相に分類し、X 線 CT の再構成を行うものである。本研究では加振周波数 1Hz, N=10, 0.5deg 刻みとした。撮影枚数は 9000 枚である。動的 X 線 CT では通常の X 線 CT に対して N 倍の撮影時間・撮影枚数となる。計測対象がゴムの場合、X 線曝露による材料物性の変化が懸念される。そこで、本試験では撮影時以外の曝露をさけるため、メカニカルシャッターを導入し、露光時間を短くすることで材料物性変化が起こりにくい状況を構築した。

#### 【特徴点追跡法による局所ひずみの算出】

減衰特性への影響として、材料内部のひずみが関係するものと考えられる。これを検証するために X 線 CT より得られた引張前後の 3 次元データを用いて評価した。高分子材料は X 線透過像のコントラストが付きにくく、単純には変形挙動を判別できない。そこで、画像内に点在する輝度の高い点をマーカー点とする。なお、この点は X 線分光法の結果、加硫促進助剤として利用される酸化亜鉛であることを確認している。変形前後のマーカー点を追跡することで、定常加振下における内部ひずみ分布を評価した。変形前後のマーカー点から線形 4 面体要素を構築し、線形有限要素法の理論に基づきひずみ量を算出した。ヒストグラムおよび 3 次元散布図として

図示することで分布を評価した。

#### 4. 研究成果

##### 【動的条件下の再構成画像】

再構成した画像を図 1 に示す。静的、動的条件下において X 線 CT した結果の比較を示している。なお、それぞれ、粒子が確認でき、繊維状微粒子については Z 方向に繊維が配向されていることがわかる。以上のことからマイクロオーダーにおける動的 X 線 CT の実施が実現できたと言える。

##### 【局所ひずみマッピング】

局所ひずみは 4 つの特徴点から四面体の有限要素を構成し、約 10000 要素のデータで評価した。図 2 に繊維状における引張方向の垂直ひずみに関する局所ひずみマッピング結果を示す。この結果より、一様にひずみが発生しているわけではないことが確認できる。

##### 【局所ひずみ分布の特徴】

図 2 の局所ひずみマッピングより、各位相によって局所ひずみの大きさは異なる。動的 X 線 CT では sin 波による加振を加えていることから、局所ひずみも同様に sin 波で応答していることがわかる。先行研究では、損失係数の違いが局所ひずみ分布の違いになって現れることが報告されている。そこで、各局所ひずみの sin 波振幅がその局所ひずみにおける変形特性を評価する指標になるものと考え、振幅同定を行った。ある四面体要素の z 方向の垂直ひずみに対して、三角関数のカーブフィットを行い、その振幅を同定した。この振幅の同定を全ての要素に対して行い、ヒストグラム化したものを図 3 に示す。この結果より、振幅の分布曲線は単峰性であり、天然ゴム、板状複合、繊維状複合の順にピークの高さが下がり、分布は広がる傾向にあることがわかる。特に微粒子複合化による変化は顕著である。以上のように、微粒子複合化された材料は母材単体の材料と比較して、振動曝露下の局所ひずみのひずみ振幅が不均一になる傾向を示すことがわかった。

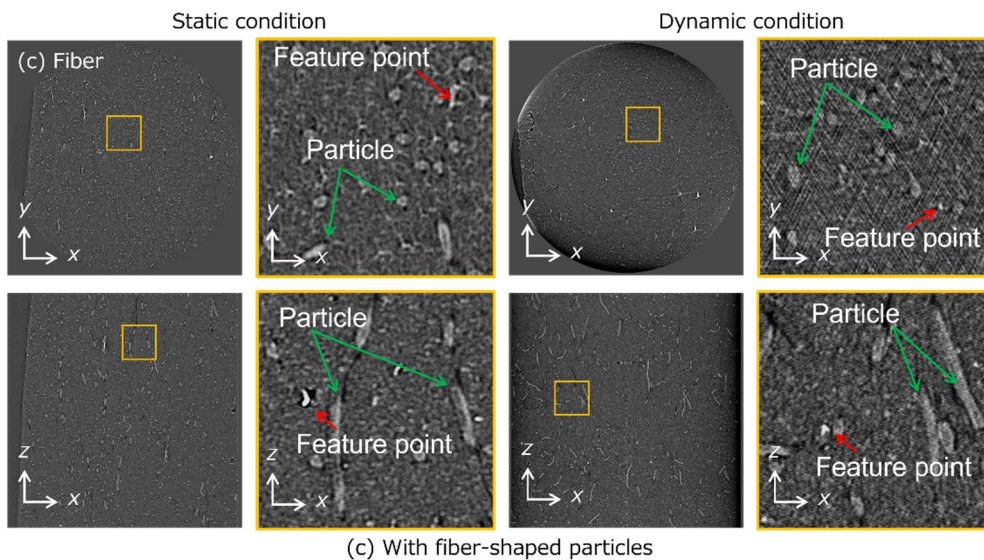


図 1：PET 複合化ゴムを対象とした静的・動的 X 線 CT の透過像結果

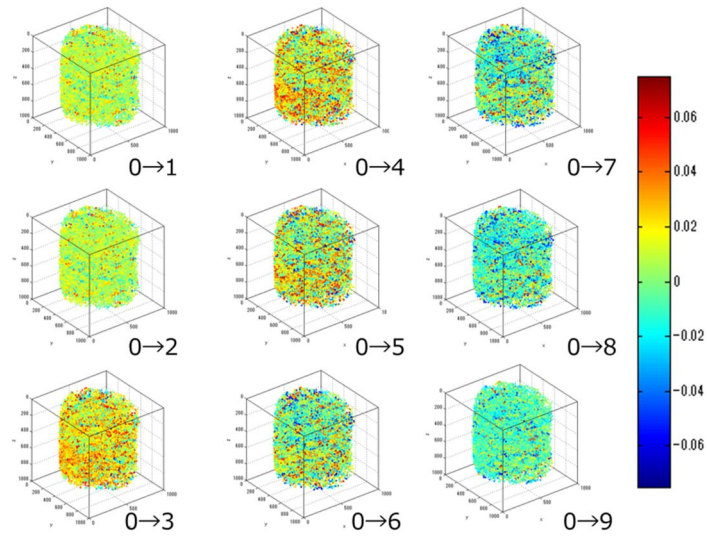


図 2 : 加振方向の垂直ひずみに関する局所ひずみマッピング

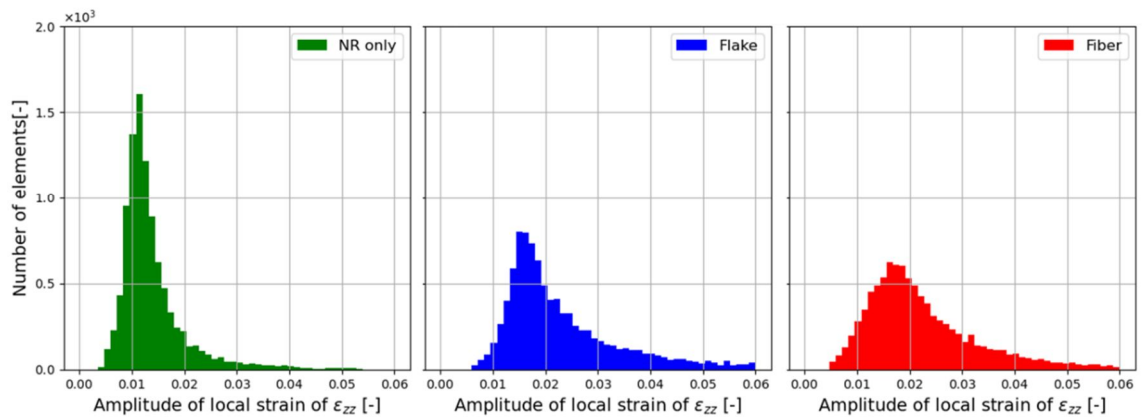


図 3 : 局所ひずみ振幅分布の比較 (天然ゴム, 板状状複合, 繊維状複合)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Matsubara Masami, Komatsu Taichi, Takara Ryo, Kobayashi Masakazu, Furuta Shogo, Uesugi Kentaro, Nagatani Asahiro, Kawamura Shozo, Tajiri Daiki	4. 巻 117
2. 論文標題 Dynamic observation of a damping material using micro X-ray computed tomography coupled with a phase-locked loop	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer Testing	6. 最初と最後の頁 107810 ~ 107810
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polymeresting.2022.107810	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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