

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18041

研究課題名(和文) 微粒子を複合化した制振用ゴム材料の減衰特性コントロールに関する研究

研究課題名(英文) Study on control of damping characteristics of damping rubber material with composite particles

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)・助教

研究者番号：40736427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究においては天然ゴムと繊維状、板状微粒子の複合ゴムを製作し、動的粘弾性評価を行うことで微粒子複合化に伴う減衰特性への影響を調査した。製作した複合ゴムにおいては微粒子の配合量および粒子のアスペクト比が大きいくほど、損失係数は増加することを把握した。また、ひずみ振幅方向と繊維長手配向が一致する場合に顕著なひずみ振幅依存性が現れることを把握した。さらに、損失係数の変化はフィラー/マトリックスの界面効果の一つであるすべりが関係しており、その動摩擦力はひずみ振幅の2乗に比例すると仮定することで簡単な力学モデルで損失係数を再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：It was found that the loss factor of fiber composite greatly changes with the strain amplitude, and the strain amplitude dependence becomes stronger when the strain amplitude direction and the longitudinal direction of fiber particle are close. A dynamic model for fiber composite rubber was constructed. This model assumed that dynamic friction force is proportional to the square of the strain amplitude. The loss factors show good correlation with the recalculated and experimental results; the loss factor can be expressed assuming that the energy dissipation amount owing to the slip is proportional to the square of the strain amplitude.

研究分野：機械力学・振動工学

キーワード：物性評価 微粒子複合化 粘弾性材料 制振材

### 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題を背景として機械・構造物の軽量化に関する研究開発が進められている。しかしながら、軽量化によって振動応答倍率は増加するため、振動や騒音の抑制が快適空間創成には非常に重要である。そこで、自動車などの輸送機器では制振材を用いて振動や騒音を抑制する研究が進められている。これまで制振材は石油由来の合成ゴムを用いた製品が多いが、昨今では更なる環境負荷低減の観点からバイオマス材料の利用が注目されている。しかしながら、バイオマス材料は石油由来の合成ゴムと比較して、減衰特性が小さいという短所を有する。減衰特性が小さい材料の使用は質量・体積増加につながり、バイオマス制振材の普及を阻害する要因となっている。さらに昨今では、機械・構造物の軽量化や小型化が進み、制振材を配置する十分なスペースがないという問題が起こっている。そのため、問題となっている振動や騒音の周波数帯域に対して、より効果的に制振性能を発揮することのできる高機能な制振材を設計する必要がある。

減衰特性を改善する方法として、微粒子を複合化する方法がある。この方法は、制振材中の微粒子の配合比率を操作することで、不均質な制振材を作成することができ、特定の周波数帯域に減衰性能を持つような材料設計への実現が期待されている。これまで微粒子が複合された制振材に関する研究は、全体を均質なものとして減衰特性を評価したものが多く、配合条件によって高機能な減衰特性を実現するような主旨の研究事例はない。この実現には微粒子の複合化による減衰特性発現メカニズム解明が必要である。

### 2. 研究の目的

そこで本研究においては以下の2つの課題を明らかにすることを目的とする。

(1) 微粒子複合制振材における減衰特性に対する支配因子の解明

配合の条件(粒子形状、配合量、配向、界面接着性)を変えた制振材を製作し、減衰特性に対する支配因子の特定を行う。特に振動振幅によって減衰特性にどのような影響が現れるのかに着目する。また、制振材自体の引張破断面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察し、微粒子の界面接着性を調査する。

(2) 微粒子複合制振材における減衰特性発現メカニズム解明

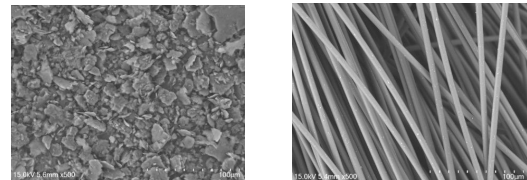
減衰特性の発現メカニズムを解明するため、力学モデルを構築する。このモデル化によってエネルギー散逸がどの部分で発生するのかを調査する。さらに、各配合条件の減衰特性に対する影響度を分析することにより、減衰特性発現メカニズムを解明する。解明したメカニズムを基に、特定の周波数帯域の減衰特性を大きくするなど、減衰特性をコントロールする材料設計指針を提案する。

### 3. 研究の方法

(1) 微粒子複合制振材における減衰特性に対する支配因子の解明

母材は天然ゴム(以下、NR)、複合する微粒子としてPET系合成繊維を選択した。まず、天然ゴムの利用はバイオマス比率の高い制振材の実現を見据えたためである。微粒子については、粒子形状をコントロールしやすいものを選択した。

NRはリブドスモークドシート(RSS)1号を使用し、ゴム用配合剤としてはステアリン酸、酸化亜鉛、硫黄、加硫促進剤(スルフェンアミド系促進剤BBS)を用いた。なお、配合比率についてはJIS K 6352に記載の標準配合(純ゴム配合2)に準じた。図1にPET微粒子のSEM(SU3500, 日立ハイテクノロジー社製)による観察図を示す。PET微粒子は繊維状微粒子(繊維長3mm)と板状微粒子(平均粒径62.5 $\mu$ m)の2種類を用意した。なお、微粒子のアスペクト比は繊維状、板状それぞれ、42.8, 1.38であり、NRに対する重量比2%, 5%の割合で配合することとした。



(a) 板状 (b) 繊維状

図1 PET微粒子

PET微粒子とNRの複合化は、密閉式混練機(ラボプラストミル10C100型, 東洋精機製作所製)を用い、得られた複合ゴムは図2のオープンロール(日本ロール製造製)によりシート出しを実施した。これにより、シートには圧縮およびせん断流が作用するため、シート出し方向(以下、0°方向)に微粒子が配向することになる。このシートを圧縮成形機にて150 $\square$ で所定時間加硫し、厚さ2mmの制振材シートを作製した。この制振材シートより幅5mmで切り出したものを試験片とした。



図2 オープンロールによるシート成形

図3に示すような動的粘弾性測定装置(Rheogel-E4000HP, ユービーエム社製)において貯蔵弾性率 $E'$ 、損失弾性率 $E''$ 、損失係数 $\eta$ を同定する。試験片は厚み2mm、幅5mm、チャック間距離20mmとした。加振周波数を10Hz、常温(24~26 $\square$ )、初期ひずみをチャック間距離の5%とし、ひずみ振幅を変化させた場合の貯蔵弾性率、損失弾性率および損失係数を測定した。

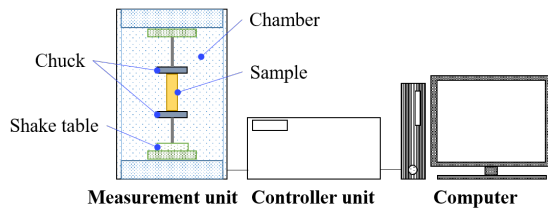


図3 動的粘弾性試験機の概略図

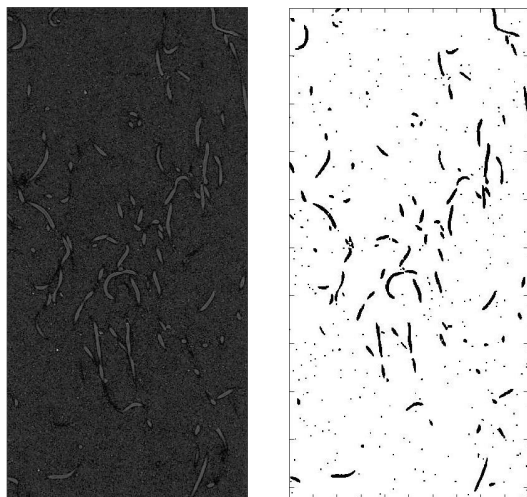
(2) 微粒子複合制振材における減衰特性発現メカニズム解明

詳細については後述するが、特にひずみ振幅依存性を示した繊維状微粒子(配向 $0^\circ$ )を対象とした力学モデルの構築について検討した。NR単体の制振材の場合においてはひずみ振幅依存性が見られなかった。このことから、加振周波数、温度が一定であれば線形則の力学モデルで十分であることが分かった。そこで、損失係数をVoigtモデルと摩擦散逸機構を有する要素数の少ない力学モデルで表現し、減衰特性発現メカニズムについて調査する。

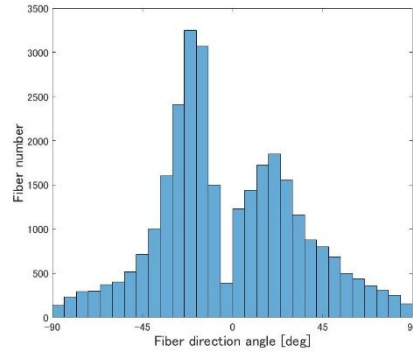
4. 研究成果

(1) 粒子配向の評価

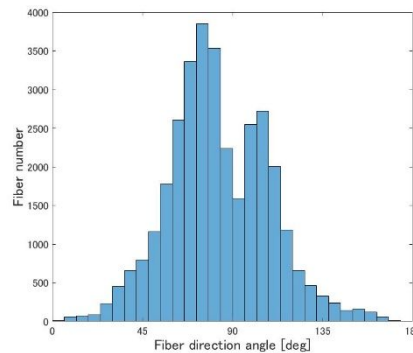
X線CT画像を取得することで、微粒子の配向状態の確認を行った。図4(a)に取得したX線CT像を示す。なお、撮影については高輝度放射光施設SPring-8において実施した。図4より、母材と微粒子の境界面が観察でき、また微粒子を判別できることがわかる。図4(b)は図4(a)より微粒子のみを画像処理を行って抽出した図である。この画像に対して、微粒子一つ一つの境界に対して楕円近似することによって、その配向を評価した。図3に示したシート成形方向を $0^\circ$ として、それと直交する方向を $90^\circ$ として試験片を切り出し、それぞれX線CT像を取得分析を行なった。その結果を図5に示す。この結果より、微粒子配向を制御して制振材を製作できていることを確認した。



(a) 全体図 (b) 微粒子  
図4 PET微粒子



(a)  $0^\circ$  成形



(b)  $90^\circ$  成形

図5 微粒子配向の頻度分布

(2) 微粒子界面の観察

繊維状微粒子、配向 $0^\circ$ で引張前後の平面画像を観察した。その結果、図に示すように引張によって繊維端においてボイドの成長を確認することができた。このことから、微粒子と母材は繊維端で剥離がしており、摩擦によるエネルギー散逸が起こっている可能性を見出した。このことについては今後、継続的に調査する予定である。

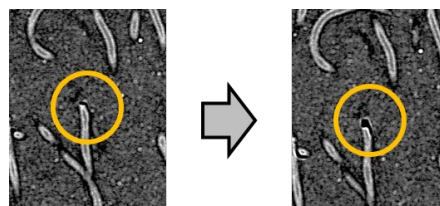


図6 繊維端におけるボイドの成長

(3) 微粒子の形状の影響

図7にNRのみ、板状微粒子、繊維状微粒子を配合した制振材における損失係数の比較を示す。NRのみ、板状微粒子においてはひずみの大きさにかかわらず損失係数の値は一定であるのに対し、繊維状微粒子を配合した制振材ではひずみ振幅が大きくなるにつれ損失係数が大きく変化することがわかる。



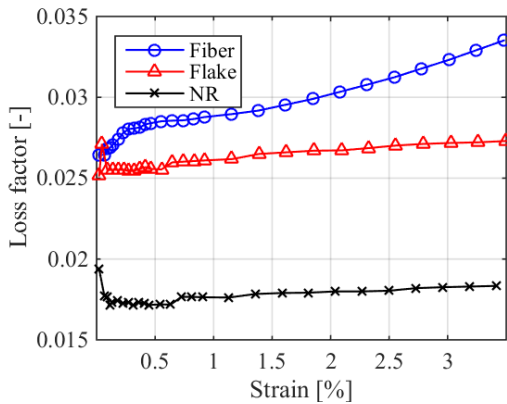


図7 異なる微粒子形状を複合化した天然ゴムの損失係数比較

(4) 微粒子の配合量の影響

図8に繊維状微粒子の配合量を変化させた場合の損失係数の変化を示す。図8より配合量を2wt%から5wt%に増加させると損失係数が増加することが確認できた。また、5wt%ではひずみが0.5%の付近を境に損失係数の増加傾向に変化が見られる。一方で、2wt%ではひずみが0.5%以降ではほぼ直線的に損失係数が増加しているのに対し、0.5%以下では5wt%のような増加傾向は見られないものの、損失係数の挙動に違いが見られる。これより、配合量が少ない場合でもひずみが0.5%の付近で損失係数の挙動に変化が見られる。

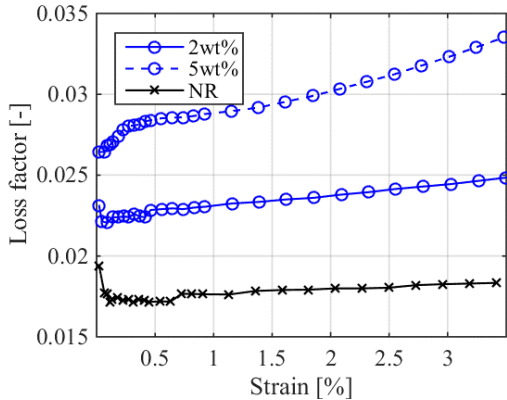


図8 異なる配合量で繊維状微粒子を複合化した天然ゴムの損失係数比較

(5) 微粒子の配向の影響

図9に繊維状微粒子の配合量5wt%の場合の配向の違いによる損失係数の変化を示す。図9より0°配向の試験片の方が90°配向よりも損失係数が大きくなり、ひずみ振幅依存性の現れ方が異なることがわかる。このことから、ひずみ振幅方向と繊維の長手方向が一致した場合にひずみ振幅依存性が強くなることがわかる。

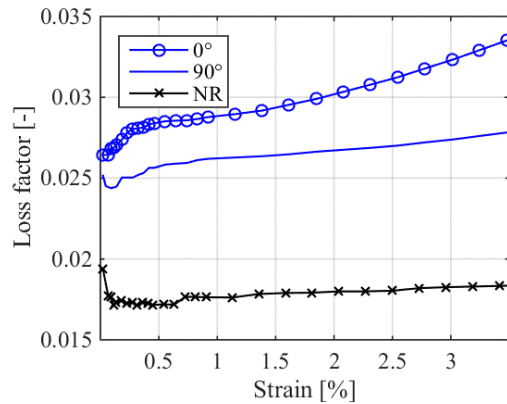


図9 異なる配向で繊維状微粒子を複合化した天然ゴムの損失係数比較

(6) 損失係数のモデル化

ひずみ振幅依存性を示した繊維状微粒子(配向0°)を対象とした力学モデルの構築について検討する。図4からわかるように、NRの場合においてはひずみ振幅依存性が見られない。このことから、加振周波数、温度が一定であれば線形則の力学モデルで十分であることを示している。そこで、NRをVoigtモデルでモデル化する。また、複合化に伴う損失係数の変化についてはCoxの短繊維複合材料に関する複合則を参考にし、さらに摩擦によるエネルギー散逸を模擬したすべり機構を有する力学モデルを構築した。図10に示す。なお、加振周波数 $\omega$ 、ひずみ振幅 $\varepsilon$ とし、NRの貯蔵弾性率 $E_m$ 、減衰定数 $c_m$ 、フィラー/マトリックスの界面接着効果を表す貯蔵弾性 $E_s$ 、減衰定数 $c_s$ 、すべり要素の動摩擦力は $\mu N_\varepsilon$ で表されており、ひずみ振幅 $\varepsilon$ を変数にもつ。なお、 $E_f$ 、 $V_f$ は微粒子の貯蔵弾性率、微粒子の体積含有率を表しており、 $\alpha$ は短繊維および配向の影響による剛性低下を表現するための係数である。

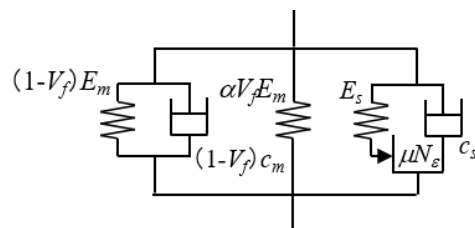


図10 すべり機構を有する力学モデル  
このとき、すべり機構が動作する前の損失係数は次式で表される。

$$\eta_{eq0} = \frac{1}{2\pi} \frac{\pi\omega(1-V_f)c_m\varepsilon^2 + \pi\omega c_s\varepsilon^2}{\frac{1}{2}E_{eq0}\varepsilon^2}$$

すべり機構が動作する場合は次式で表現できる。

$$\eta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{\pi\omega(1-V_f)c_m\varepsilon^2 + \pi\omega c_s\varepsilon_0^2 + 4(\varepsilon - \varepsilon_0)\mu N_\varepsilon}{\frac{1}{2}E_{eq0}\varepsilon^2 + \frac{1}{2}E_s(\varepsilon_0^2 - \varepsilon^2)}$$

すべり要素を用いた力学モデルの先行研究では動摩擦力を定数として扱っている(引用文献)。しかしながら、粘弾性体は一般に変形によらず体積一定を保つことから、一軸引張においては幅、厚み方向に圧縮力が働き、圧縮力はひずみ振幅の2乗に比例する(引用文献)。そのため、すべり要素の動摩擦力はひずみ振幅に応じて変化すると考えることができる。動摩擦力をひずみ振幅 $\epsilon$ に対して、一定、比例、2乗に比例する場合の損失係数を図11に示す。図11より、動摩擦力がひずみ振幅 $\epsilon$ の2乗に比例するものと仮定した場合に変曲点が現れてからもひずみ振幅に依存して損失係数は増加しており、繊維状粒子が複合化された場合と同様の傾向を示していることがわかる。

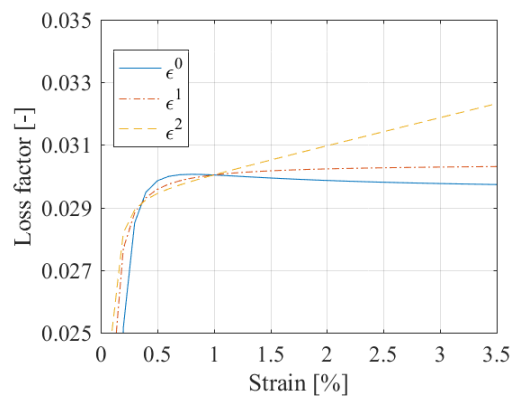


図11 異なる動摩擦力のモデル化における損失係数の変化

NRのデータと式(1)より $E_m$ と $c_m$ を算出し、繊維状微粒子のデータより $c_s$ 、 $\epsilon_0$ 、 $E_s$ 、 $\beta$ を同定する。なお、 $E_{eq0}$ は $\epsilon_0$ に対応する実験値である。図12は繊維状微粒子(配向 $0^\circ$ 、5wt%)の損失係数の実験値とそれらのデータを基に同定した解析値を比較したものである。シンボルを有する線が実験値、シンボルがない線が解析値である。この結果より、すべり要素を含むことで変曲点を含む損失係数の非線形性を表現できていることがわかる。以上より、力学モデルによる分析の結果、短繊維複合ゴムにおける損失係数の変化はフィラー/マトリックスの界面効果の一つであるすべりが関係しており、すべりによるエネルギー散逸量はひずみ振幅の2乗に比例すると仮定することで損失係数を再現できることを示した。

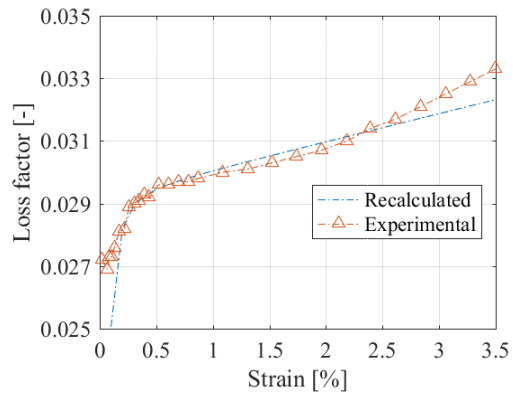


図12 実験値と解析値の損失係数比較

<引用文献>

吉田純司, 杉山俊幸, エネルギー吸収性能のひずみ依存性を考慮したゴムの超弾性-粘弾塑性ダメージモデル, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.1, 2015 pp.14-33.

13) 久保亮五, ゴム弾性[初版復刻版], 裳華房, 1996, pp.96-99.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計6件)

松原真己, 長谷朝博, 寺本真ノ将, 山田莉香子, 伊勢智彦, 河村庄造, 辻内伸好, 伊藤彰人, PET微粒子複合化天然ゴムの減衰特性に対する界面すべりの力学モデル化とX線CTによる直接観察, 第9回自動車用途コンポジットシンポジウム講演論文集, pp.1-4, 京都府(2017).

M. Matsubara, A. Nagatani, R. Yamada, T. Ise, S. Kawamura, N. Tsujiuchi and A. Ito, Viscoelastic model for composite materials focused on strain amplitude dependence, Proceedings of the 17th Asia Pacific Vibration Conference, 053.pdf, Nanjing, China, (2017).

松原真己, 長谷朝博, 山田莉香子, 浜口和也, 伊勢智彦, 河村庄造, 辻内伸好, 伊藤彰人, 微粒子複合化天然ゴムを用いた制振材料の動的粘弾性評価, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017 USB 論文集, Paper No.246, 愛知県(2017).

松原真己, 長谷朝博, 山田莉香子, 伊勢智彦, 河村庄造, 辻内伸好, 伊藤彰人, 微粒子複合ゴムの減衰特性に対する配向の影響と複合則の検討, 同志社大学先端複合材料研究センター2016年度末研究成果発表会資料集, p.76, 京都府(2017).

山田莉香子, 松原真己, 伊勢智彦, 河村庄造, 長谷朝博, 浜口和也, 辻内伸好, 伊藤彰人, PET微粒子複合ゴム材料の減

衰特性評価, 同志社ハリスフォーラム  
2016 先端複合材料研究 センターシン  
ポジウム 2016, 「先端複合材料の昨  
日・今日・明日」, p.59, 京都府 (2016).  
山田莉香子, 松原真己, 伊勢智彦, 河村  
庄造, 長谷朝博, 浜口和也, 辻内伸好, 伊  
藤彰人, PET 微粒子複合ゴム材料の減衰  
特性評価, 第 8 回自動車用途コンポジッ  
トシンポジウム講演論文集, pp.95-96, 京  
都府 (2016).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 真己 (MATSUBARA, Masami)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助  
教

研究者番号: 4 0 7 3 6 4 2 7