

微視的構造特性を考慮した高分子複合材料の巨視的粘弾性特性の評価

東北大学大学院	学生員	濱名 康彰
東北大学大学院	正 員	寺田賢二郎
東北大学大学院	正 員	山田 真幸
東北大学大学院	正 員	車谷 麻緒

1. はじめに

工業材料として利用されている高分子材料はほとんどがポリマーに充填材が混入された非均質材料となっている。このような高分子複合材料の巨視的粘弾性特性は、その微視的力学挙動を反映して発現すると言われている。本研究では、このようなミクロとマクロを考慮できる均質化法に基づくマルチスケール解析手法を適用することにより、ゴム材料の微視領域の幾何性状の違いがマクロ粘弾性特性に与える影響を調べることを目的とする。

2. 粘弾性マルチスケールによる数値材料試験法

2.1 ミクロ構造解析によるマクロ材料特性評価

均質化法によれば、マクロ構造の支配方程式とその微視的非均質性を特徴づける周期的に分布するミクロ構造(以下、ユニットセル)についての次の支配方程式が導出され、後者を解くことで前者の材料特性を評価する数値材料試験が可能となる。

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \operatorname{grad}_s \mathbf{u}, \quad \mathbf{u} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \mathbf{y} + \mathbf{u}^1 \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \sim \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{任意の粘弾性構成則}) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{y} はユニットセル領域 Y に設定した座標系であり、 $\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{u}$ はそれぞれミクロスケールの応力、ひずみ、変位である。また、 $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ はマクロひずみ、 \mathbf{u}^1 はユニットセル境界で周期的な変位成分である。なお、マクロ応力とマクロひずみは対応するミクロ変数のユニットセルである $\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle$, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle$ で定義されている。ここで、 $\langle \bullet \rangle$ はテンソル \bullet のユニットセル体積平均を表す。本研究では粘弾性構成モデルとして一般化 Maxwell モデルを採用する。

2.2 マクロ粘弾性特性の評価手順

上述の粘弾性モデルを導入してユニットセルに対する支配方程式 (1) を解くことになるが、得られるミクロ応力はやはり粘弾性応答を示すものと期待される。したがって本研究では、マクロ応答として得られる粘弾性構成則にも一般化 Maxwell モデルを採用する。マクロ応力緩和関数 $\tilde{G}_r(t)$ は、マクロひずみ $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\text{vol}} \mathbf{1} + \tilde{\boldsymbol{e}}$ を定数として、マクロ応力の一つの成分のみが値を持つようなミクロ解析を行うことで算出可能である。ただし、このようにして得られるマクロ応力緩和関数は時間的に離散データであるので、その時系列データから最小二乗近似により Prony 級数形の応力緩和関数を求め、マクロ損失係数を算定する。

3. マクロ動的粘弾性特性の評価結果

解析対象は図-1 に示されるような、ゴム材料のカーボン粒子の分散性及び体積分率をパラメータにとるミクロ構造である。純ゴム及びカーボンは図-1 に付記した材料特性を有する粘弾性体及び線形弾性体と仮定する。以下では、エネルギー損失性能を表す材料パラメータであるマクロ損失係数をマクロ粘弾性特性として評価した結果を示す。

まず、マクロ弾性特性がマクロ粘弾性特性に与える影響を考察に加えるため、マクロ均質化弾性係数の結果を表-1 にまとめておく。この表から、マクロ弾性率は等方的であり、フィラー体積分率が等しければ分散状況の差異に関わらずマクロ弾性率は等しく、体積分率の増加に伴いマクロ弾性率は高くなる。

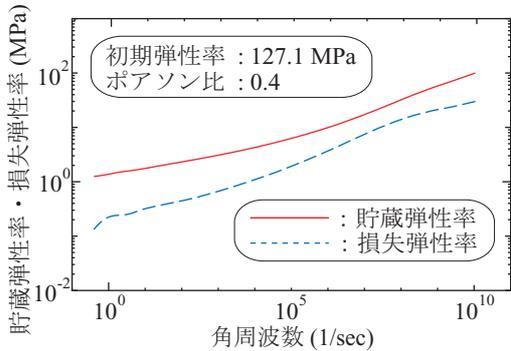
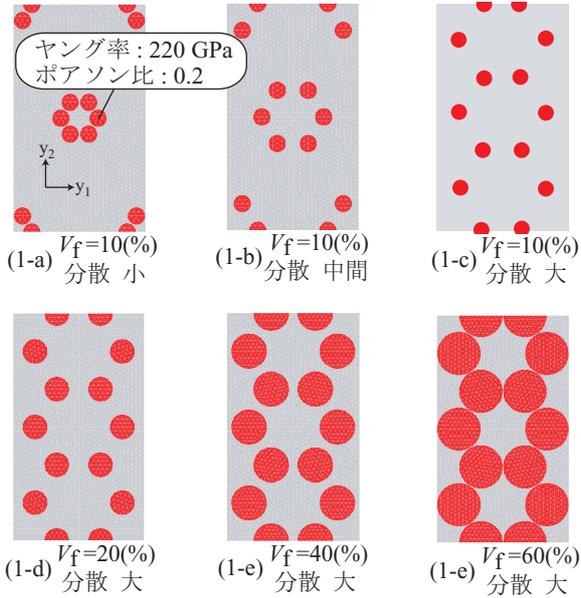
次に、数値材料試験結果から得られるマクロ緩和弾性率を図-2 に、マクロ損失係数を図-3 に示す。図-2(a) より、介在物の体積分率が等しければマクロ初期弾性特性に差異はなく、応力緩和挙動も類似している。これは表-1 より、フィラー体積分率が等しければ分散状況の違いはマクロ均質化弾性係数に反映されないことと関連しているものと考えられる。また、図-3(a) より分散状況の差異によるマクロ損失係数の違いはあまり見られない。これは分散状況の違いがマクロ初期弾性特性への影響に反映していないことと関連していると考えられる。

図-2(b) より、フィラー体積分率が大きいほどマクロ初期弾性特性は高い値を示す。これは表-1 から分かるようにマクロ均質化弾性係数の増加によるものであると考えられる。また、図-3(b) より、体積分率が大きいほど、マクロ損失係数は小さくなる傾向にある。これはマクロ初期弾性特性によるものであると考えられる。すなわち、弾性係数の大きくなるに従って直接マクロ損失係数を下げる役目を果たすと考えられる。しかし、それぞれのモデルで損失係数が最大値をとる角周波数は等しく、全体の挙動もあまり見られない。この傾向は図-2 で示したように、応力緩和挙動が類似していることから類推可能である。また図-3(b) より、 $V_f = 60(\%)$ のミクロ構造のマクロ損失係数が他と大きく異なる挙動をすることから、フィラーの結合によるトポロジーの変化がマクロ損失係数に影響を与えるものと考えられる。

以上より、動的粘弾性特性の代表パラメータであるマク

表-1 ミクロ構造の均質化弾性係数 (MPa)

V_f (%)	分散状況	D_{11}^H	D_{22}^H	D_{12}^H	D_{11}^H/D_{22}^H
10	小	315.2	315.2	55.36	1.0000
10	中間	310.0	310.0	53.88	1.0000
10	大	309.9	309.9	53.81	1.0000
20	大	358.7	358.7	64.81	1.0000
40	大	522.3	522.2	104.7	1.0002
60	大	2636	2574	617.2	1.0243



(2) 母材(純ゴム)の材料特性

図-1 解析対象となるミクロ構造

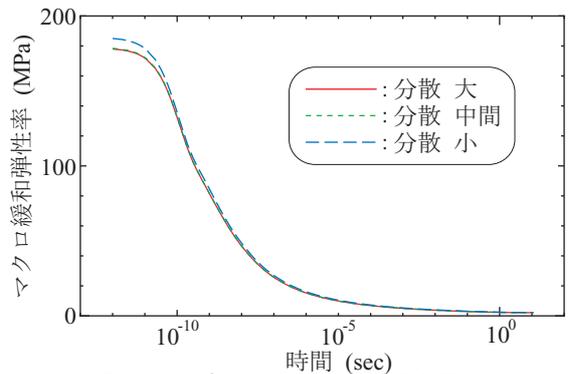
口損失係数は、対象とする構造物のマクロ初期弾性特性に依存すると結論付けた。

4. おわりに

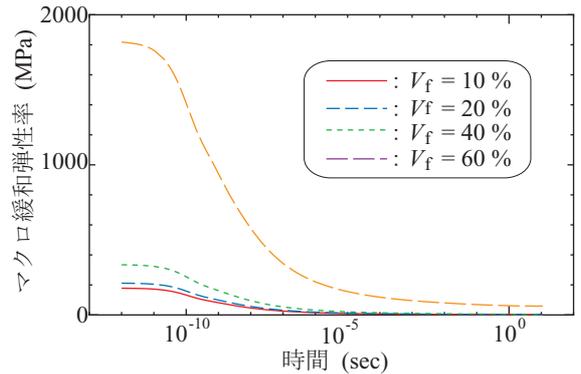
本研究では、均質化法に基づくマルチスケール解析手法を適用することにより、ミクロ構造特性を反映したマクロ粘弾性特性を評価した。その結果、フィラー分散状況の差異はマクロ損失係数の違いに反映されないが、体積分率の違いはマクロ損失係数の大小に関与することが分かった。

参考文献

- 1) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 丸善, 2003.
- 2) R.M. クリステンセン: 粘弾性力学の基礎, 雄松堂, 2000.

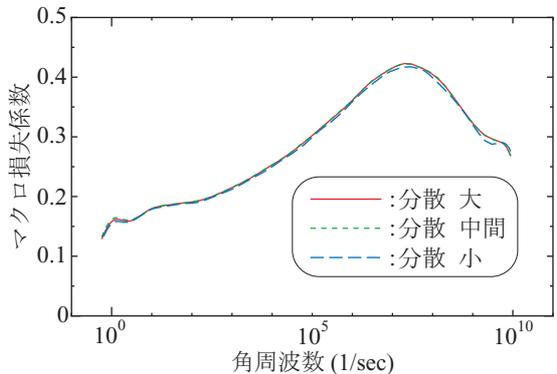


(a) 分散状況の違いによるマクロ緩和弾性率

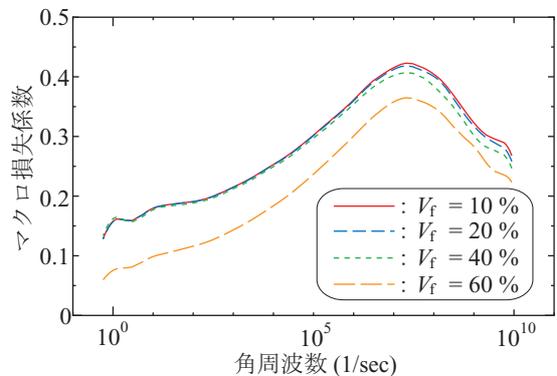


(b) 体積分率の違いによるマクロ緩和弾性率

図-2 マクロ緩和弾性率



(a) 分散状況の違いによるマクロ損失係数



(b) 体積分率の違いによるマクロ損失係数

図-3 マクロ損失係数