

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630009

研究課題名(和文) ポリマー系素材の先端力学機能発現・劣化機構に関する分光・熱力学的アプローチ

研究課題名(英文) Spectroscopy and Thermomechanical Approach for Advanced Mechanical Functions and Their Degradation of Polymer Materials

研究代表者

北條 正樹 (Masaki, Hojo)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70252492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ポリマー材料の力学機能の発現において重要である材料内部構造変化と機能特性との相関を評価する実験・解析手法の確立を目的とした。特に、形状記憶樹脂の形状変化機能を対象として、熱力学的負荷時の特性変化を蛍光浸透分光分析により実験的に評価する手法を検討するとともに、分子動力学モデルに基づく動的粘弾性シミュレーションを構築した。その結果、熱力学的負荷に伴う初期の内部構造変化を材料内部への蛍光剤浸透量により検出できることが示された。また、動的粘弾性シミュレーションにより、ポリマー内部のハードセグメントの凝集構造の粘弾性特性への影響が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The present study aims at establishing experimental and numerical methods to evaluate the relationship between microstructural change and functional properties of materials, which is important for mechanical functions of polymer materials. Specifically, focusing on shape change functions of shape memory polymers, we developed fluorescence spectroscopy for evaluating property change under thermomechanical loadings and dynamic viscoelastic simulations based on molecular dynamics. Results indicated that initial structural changes with thermomechanical loadings could be detected by the immersion of fluorescence dyes into the materials. Dynamic viscoelastic simulations clarified the effect of aggregated structures of hard segments inside the polymers on viscoelastic properties.

研究分野：材料力学

キーワード：高分子材料 蛍光分光法 力学機能 形状記憶 分子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

先端機械システムの極限環境で使用されるポリマー系材料は、その化学組成やメゾスケールの高次構造の精密制御、繊維強化などによって、材料の力学的機能（強度・弾性率）のみならず、ポリマー特有の機能性（軽量性、成形性、耐熱性、形状回復性等）を付与することができることが特徴である。航空宇宙分野での耐熱性ポリマーや、宇宙展開構造等で期待されている形状記憶樹脂及びその複合材料では、ガラス転移温度近傍の領域で繰返し変形を受ける。この機能特性の発現・劣化とそのメカニズムは未解明な部分が多い。

このような背景の下、上記の形状記憶を示す熱可塑性樹脂やその複合材料を題材に取り上げ、力学的負荷下における蛍光浸透法をベースにした分光分析と熱力学的手法を組み合わせた実験技術を新たに開発するとともに、熱力学的負荷とサブミクロンオーダーのモルフォロジー変化との関係について粗視化分子動力学に基づく理論解析を実施し、機能性発現・劣化機構を理解するための基礎を確立することを本研究の目的とした。特に、本研究では、形状記憶ポリマーのガラス転移温度近傍の変形に適用して研究を遂行した。

2. 研究の目的

ポリマー系材料の先端力学機能発現メカニズムは階層的で複雑であり、特に、熱力学的環境におけるサブミクロンオーダーのモルフォロジー変化が、疲労等の損傷累積や、状態変化に伴う機能発現をもたらす温度依存性粘弾性現象を支配すると考えられている。本研究では、熱力学的環境下での高分子材料の挙動をサブミクロンオーダーで把握するために、航空機部品検査などでよく知られている蛍光浸透法に、分光分析による定量測定を新たに組み込むことを提案した。

機能性ポリマー素材としてポリウレタン系形状記憶樹脂を対象に、熱力学的負荷により変化する形状変化の計測を行うとともに、蛍光浸透分光分析の有効性について検討した。ここでは、形状変化特性に関して、アニーリングに伴う形状変化と形状記憶過程における形状変化が同一のメカニズムであることが分かってきており、その知見に基づき、アニーリング時間の制御により、材料の形状変化量を制御できることを示した。また、形状変化量について熱サイクル試験を用いて調べ、それらの形状変化量を蛍光浸透分光分析による結果と比較し、蛍光分光の定量分析結果と形状変化との相関について検討した。

また、ガラス転移温度近傍のポリマー材料の温度依存性粘弾性現象をポリマー内部構造との関連で理解するため、分子動力学法に基づく解析法を構築した。これに基づき、ポリマー内部のハードセグメント・ソフトセグメントやその凝集構造と、形状変化に重要な力学特性との関係について検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 蛍光浸透による分光分析法の確立

本手法では、形状記憶樹脂フィルムに蛍光試料を浸透させ、その浸透量の違いを分光分析により検出することで、ポリマー内部の微視構造（モルフォロジー）変化について定量評価しようとする手法である。従来、非破壊検査で用いられている蛍光浸透法は、部品表面に蛍光剤を浸透させた場合、クラック位置で蛍光剤が選択的に浸透することでクラックの有無を可視化する手法であるが、本手法では、ポリマーの持つ自由体積構造による蛍光剤の材料内部への浸透を利用して、蛍光剤の浸透量を定量分析することを試みた。

分光分析には共焦点レーザー顕微鏡を用いた分光分析システムを利用した。これにより、試料深さ方向の分析結果が得られる。蛍光浸透がフィックの拡散法則に基づくと仮定すると、次式の基礎式に従うと考えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$c = 0 \quad -l < x < l \quad t \leq 0$$

$$c = c_1 \quad x = l, -l \quad t > 0$$

非定常状態での解は以下の式で与えられる。

$$c = c_1 - \frac{4c_1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp \left\{ -D \frac{(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \times \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2l} \quad (2)$$

この解について図1に示す。試料厚さ $2l$ が一定である場合、表面の濃度 c_1 、材料固有の拡散係数 D 、含浸時間 t によって蛍光浸透量（濃度 c ）が決定される。すなわち、深さ方向の分布を得ることで、ポリマー構造変化に起因する拡散に関する情報が得られると考えた。

蛍光試料については本実験装置のレーザー波長で励起し、かつ、ストークスシフトの大きい材料を用いることで、蛍光スペクトルの検出を容易とし、微小な変化を捉えることとした。具体的な実験方法は以下の通りである。

本実験では、ガラス転移温度 $T_g = 55^\circ\text{C}$ (SMP テクノロジーズ) の熱可塑性ポリウレタンペレット MM5520 から押出成形により作製し

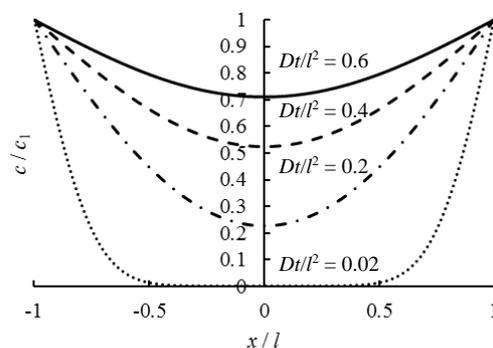


図1 フィックの法則により予測される試料内の濃度分布 ($-l < x < l$, 表面濃度 c_1)

た形状記憶ポリウレタンフィルム（約 50 μm 厚さ）を用いた。このフィルムは一軸延伸されている。実験には、ロールから 250 mm \times 15 mm の寸法の試験片を切り出して使用した。

アニーリングには、温度制御のための熱浴を利用し、熱浴はホットプレート (IKA C-MAG HP7) で一定温度に保った。熱浴の温度はデジタル温度計にて計測した。ポリウレタンは極性が高く、表面張力が大きいことや、フィルムが成形時に延伸されているため、高温時にフィルムがカールしてしまうことを防ぐため、試験片の片端をクリップではさみ、もう片端は低密度 (0.11 g/cm³) のバルサ材に固定し、過度な延伸がかからない程度に固定した。試験片の長さ変化を、試験片に記したマーカの寸法変化をデジタルマイクروسコープで観察することで測定した。

熱力学的サイクルは、図 2 に示すような小型恒温槽内の引張試験機を用いて、温度制御の下、試験機のチャック部にフィルムを固定することで変位拘束により負荷を与えた。この小型試験機はマイクروسコープの下で観察可能としており、形状変化を正確に測定することができる。熱力学的サイクル試験は以下の手順で行った。まず、65 $^{\circ}\text{C}$ まで温度を上昇させる。フィルムの温度はデジタル赤外線温度センサ(キーエンス製 FT)によって測定し、内蔵するヒーターで一定温度に保った。その後、約 15(\pm 1) % の伸びをフィルムに与え、長さをデジタルマイクروسコープ(キーエンス製 VHX)により測定した。その後、室温 (27 $^{\circ}\text{C}$) までファンにより 10 分以内で冷却した。形状回復試験は 65 $^{\circ}\text{C}$ の湯浴で 10 秒間浸すことで行った。

上記の試験法に基づき、まず、形状変化特性の制御可能性を示すために、アニーリング時間の制御により、材料の形状変化量を制御できることを実験的に検証した。この検討を行った理由は、この制御が可能であれば、機能特性の制御につながるためである。

また、構造起因の特性と考えられる形状変化特性を、上記で提案した蛍光浸透分光分析の結果と関連付けることが可能であるかを検討するために、熱サイクル試験を施した試

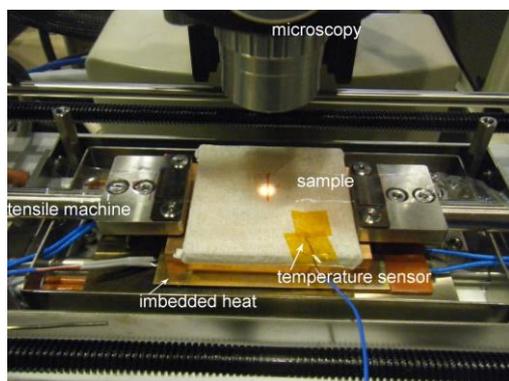


図 2 熱サイクル試験の様子 (Figure from Ying et al. (2014))

験片に対して、蛍光浸透および分光分析試験を実施した。ここでは上記同様の熱サイクル試験を施していないもの (0 サイクル)、熱サイクル試験を 1 サイクルおよび 5 サイクル施したもので比較を行った。

上記試験片に対して以下の手順により、蛍光浸透および分光分析を実施した。熱サイクル試験により機能特性 (形状変化特性) が変化したと考えられるサンプル (0 サイクル, 1 サイクル, 5 サイクル) の 1 グループをピラニン (Pyranine)・エタノール溶液 (5 $\mu\text{g}/\text{ml}$) に浸漬し、別の 1 グループをウラニン (Uranine)・エタノール溶液 (5 $\mu\text{g}/\text{ml}$) に浸漬した。2 種類の蛍光剤を用いた理由は蛍光剤の選択による影響の有無を確認するためである。浸漬は、ともに室温 (21 $^{\circ}\text{C}$, 30min) の条件で行った。エタノール溶液中でピラニン試薬とウラニン試薬の光吸収波長ピークはそれぞれ約 400 nm および 493 nm であり、得られた蛍光発光ピーク波長はそれぞれ、437 nm および 522 nm であり、十分なストークスシフトが得られることを確認した。試験片を浸漬後、試験片両面をエタノールで 2 度濯ぎ、試験片表面を拭いて分光分析用の試料とした。

次に、分光分析の方法について述べる。深さ方向の蛍光強度分布の測定は、共焦点レーザー顕微鏡 (オリンパス製 FV1000-D, NA=0.4) を用いて実施した。共焦点レーザー顕微鏡は円形な開口を持つピンホールを利用して散乱光の影響を低減し、深さ方向の焦点精度を向上したものであり、また焦点位置を深さ方向に動かしながら測定可能であるため、本実験の目的に適している。スキャン寸法は 313 μm 四方であり、その範囲の情報を平均化した値を測定値として採用した。レーザーの励起波長はピラニン試薬に対しては 405 nm, ウラニン試薬に対しては 473 nm を用いた。フィルム厚さ約 50 μm に対して、約 80 μm (表面より少し外側から反対側表面の少し外側まで) の領域を測定し、測定間隔は 5~10 μm とした。

測定によって得られた波長分散スペクトルのベースラインが水平ではなかった。一つの原因として、レーザーの入射光による散乱光が蛍光スペクトルに影響したことが考えられた。そこで、蛍光強度値の指標として、FLH 値 (Fluorescence Line Height) を用いることとした。スペクトルピークの裾野の両側の波長を λ_1, λ_3 とし、 λ_2 を蛍光スペクトルの最大値を与える波長としたとき、蛍光強度値 I を次式で定義する。

$$I = I_2 - \left\{ \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} (I_1 - I_3) + I_3 \right\} \quad (3)$$

ここで、 I_1, I_2, I_3 は波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ における強度である。このデータ処理により、励起光の影響によるバックグラウンドの影響を低減し、蛍光強度値の深さ方向分布を得た。熱サイクル負荷を与えた試験片間で得られた蛍光強度分布の比較を行った。

(2) 分子動力学に基づく動的粘弾性シミュレーションによるポリマー内部構造と機能特性の関係の評価

ここでは、ポリマー材料の機能特性変化を分子構造レベルの解析を用いて理論的解釈を与える。過去の研究では、エネルギー緩和法に基づき、ガラス転移過程を評価する方法を構築し、繊維等のファイバー強化の影響について検討を行った。しかしながら、このエネルギー緩和法は、単純な分子動力学モデルで平衡状態を探索しており、局所的な平衡状態が探索されている可能性が高く、モデル依存性も強いものと考えられる。緩和時間の温度依存性について評価を行っていたものの、緩和時間の差が小さく、傾向の差が見えにくい課題があった。

具体的には、分子動力学モデルにおいて、力学負荷の周波数を変化させながら力学特性を評価する動的粘弾性計算法を新たに構築した。この手法により、形状記憶樹脂に見られるハードセグメント・ソフトセグメントの分布が機能特性に与える影響について解析を行った。具体的な解析方法は以下の通りである。

ガラス転移過程で著しく変化する形状記憶樹脂の力学特性は一見複雑に見えるが、過去の研究で連続体を基礎とした温度依存粘弾性モデルにより材料の形状変化特性を定量的によく評価できることが明らかとなってきた。ここで形状変化の解析に重要な材料特性は、特定周波数で温度変化を与えた動的粘弾性試験を用いておおよそ再現できてきている。また、特定周波数で温度変化を与えた動的粘弾性特性と、特定温度で周波数変化を与えた動的粘弾性特性とは相関があることが通説となっている。そこで、動的粘弾性測定 (Dynamic Mechanical Analysis, DMA) を再現した解析により、振動ひずみに対する応力応答を算出し、複数周波数について解析する手法を構築した。

用いた分子モデルの一例を図3に示す。簡単のため、ポリウレタン系形状記憶樹脂のハードセグメントの寸法を基準に粗視化したビーズスプリングモデルにより、解析を実施した。およそ20個の炭素原子骨格を1つの粒子とみなしたモデルとなっている。6~8粒子を1ブロック (セグメント) としてハードセグメントとソフトセグメントを分子鎖中に交互に配置し、基本モデルでは、粒子全体の50%をハードセグメントとした。力場としては、分子内相互作用として共有結合ポテンシャル、分子間相互作用として分子間力ポテンシャルを以下の式で定義した。

$$\Phi_{BS}(r) = \sum \left\{ k_r (R - R_0)^2 \right\} \quad (4)$$

$$\Phi_{LJ}(\vec{r}) = \sum 4\epsilon \left\{ \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right\} \quad (5)$$

用いたパラメータは得られる弾性率がおおよそ実際の材料値のオーダーに近くなるよ

うに選択して決定した。一例のモデルでは、粒子数24849 (ハードセグメント粒子12557)、一分子鎖あたりの平均粒子数は約150、分子鎖数は168、密度は1.14 g/cm³である。また、分子鎖が剛直である、水素結合による凝集が起きるといった、ポリウレタン系形状記憶樹脂のハードセグメントの特性を評価するため、共有結合の強さ k_r と分子間力の強さ ϵ の値をそれぞれソフトセグメントの2倍および5倍と選択した。後者は結合の凝集エネルギーを参考に、このオーダーの値を選択している。これにより、ハードセグメントの力学特性 (剛直性・凝集性) が粘弾性特性に及ぼす影響を評価することができる。

モデル境界に周期境界条件を与え、NVTアンサンブルにより、解析を実施した。モデルのz軸方向に振動ひずみ $\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin \omega t$ を与え、応力応答を算出した。粘弾性体においては一般に、位相差 $\delta (0 < \delta < \pi/2)$ が生じる。この応力応答を基に、通常の動的粘弾性試験と同様に、貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' 、損失正接 $\tan \delta$ の周波数応答を求めた。

$$E'(\omega) = \sigma_1 / \epsilon_0 \quad E''(\omega) = \sigma_2 / \epsilon_0 \quad (6)$$

$$\tan \delta = E'' / E'$$

温度は300 K、時間ステップは周波数に応じて変化させた値0.1から2.0 fsを用い、引張ひずみに対するポアソン比を0.37とした。初期構造緩和を600 ps行った。なお、モデル間の相対比較を妥当な結果とするため、時間ステップの異なる結果に対して周波数軸方向に解析結果のシフトを行い、周波数応答のマスターカーブを作成することで、解析結果の検討を行った。

特に、ポリウレタン樹脂では、ハードセグメントが凝集した相構造を有することなども指摘されていることから、不均質性を考慮したモデルについて検討を行った。

なお、分子動力学が計算可能な時間のオーダーは現実のポリマー材料が有する緩和時間に比較した場合に極めて短い。本解析手法は、分子スケールの緩和に関する特徴時間がより大きなスケール緩和を支配している、と考えることによって、分子動力学計算をポリマー材料の機能特性評価に活用しようとする一つのアプローチに過ぎないことを付記しておく。すなわち、実際の材料特性との関連においては定性的な議論となる。

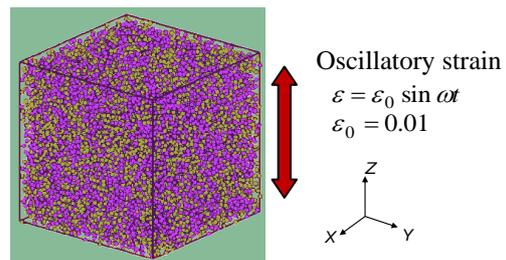


図3 動的粘弾性評価の分子動力学モデル

4. 研究成果

(1) 蛍光浸透による分光分析法の確立

まず、形状記憶樹脂の形状変化特性の制御可能性についての検討結果を述べる。形状記憶樹脂フィルムに対して、アニーリング温度を 65°C として長さ変化の時間履歴を計測し、カーブフィッティングを施した結果、長さ変化率 r に関して、以下の式が得られた。

$$r = -0.3379 \cdot \exp(-0.0287t) + 0.6237 \quad (7)$$

t はアニーリング時間である。この式により、任意のアニーリング時間に対して、アニーリングに伴う長さ変化率が得られると考えられる。アニーリングと形状変化特性について制御する例として、45% の最終長さ変化率を得る例について述べる。元の長さを l_0 とし、アニーリング後の長さを l_a とすると、引張変形を含むアニーリング後の長さは $(1+0.15) \cdot l_a$ であるから、45% の最終長さ変化率とするためには、以下の式に従ってアニーリング後の長さ l_a を制御すればよいこととなる。

$$(l_0 - (1+0.15) \cdot l_a) / l_0 = 0.45 \quad (8)$$

ここでは、純粋なアニーリングのみを考慮した。この式より、 $l_a = 0.478l_0$ となる。アニーリングによる長さ変化率 r は 0.522 となるので、これを式(7)に代入することにより、所望の形状変化特性を得るには、アニーリング時間を 41.7 秒とすればよいことが分かる。

アニーリングと形状回復過程は本質的に同じメカニズムにより生じるという過去の研究結果に基づき、アニーリングと形状回復に要するトータルの時間を 41.7 秒とすれば、所望の長さ変化率 45% が得られるものと期待される（時間のみを制御するという簡単な実証のためにこのような考え方とした）。そこで、3 サンプルに対して、アニーリング時間を 10 秒、20 秒、30 秒と変化した試験を行い、形状回復試験後の長さ変化率を測定したところ、概ねどの場合でも 45% に近い長さ変化が得られ、アニーリング時間による形状特性の制御可能性が示された。

次に、繰り返し熱サイクル試験を実施して、形状変化特性を測定したところ、サイクル前後の長さ変化率はそれぞれ、1, 5, 10, 15 でそれぞれ 1.289, 1.01, 0.997, 0.993 となった（1 を超える値は形状回復前の長さで変化率

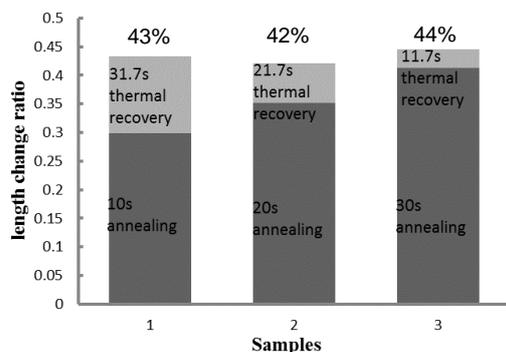


図 4 形状変化特性の制御に関する実験結果 (Figure from Ying et al. (2014))

を算出したためである)。5 サイクル目以降、長さ変化率がほぼ 1 に近い値となっており、形状変化特性が安定となっているのは、完全にアニーリングしたためであると考えられる。また、サイクルの進行に伴って、形状変化特性のわずかな低下も見られる。

予備試験として示差走査熱量測定 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) を実施した。過去の研究においても測定していたが、再現性の検討が十分ではなかったため、改めて検討を実施した。0 サイクルと 1 サイクルのサンプル間には T_g の低下がわずかに見られたものの、DSC 試験においては、十分にアニーリングされたサンプル間でのポリマー内部構造変化を確認することはできない。DSC では熱量を測定しているため平均的な測定となっていると考える。

本研究で提案した蛍光浸透分光分析による結果を次に示す。得られた蛍光強度スペクトルには波長 437 nm 付近に発光ピークが見られ、深さ方向測定で差異が確認された。このスペクトルを基に、深さ方向の FLH 値分布をプロットしたところ、試験片表面に対応する 2 つのピークが得られた。深さ方向の蛍光強度の分布形状は、図 1 の拡散濃度分布に類似しており、蛍光剤濃度に対応して得られているものと考えられる。

図 5 に熱サイクル試験の繰り返し数を変化させたサンプルに対する FLH 値分布の結果を示す。形状変化特性が比較的大きい場合にはより多く蛍光剤が浸透している結果と考えられる。すなわち、蛍光浸透分光分析法が高感度な手法であることが確認できた。

ただし、今回の結果がどのようなポリマー内部構造変化によるものかは議論が分かると考える。一つの考え方は、形状変化率の大きなサンプルでは、緩和のしやすい内部構造となっていると考えられる。定量性に関しては今後の課題である。なお、異なる蛍光剤（ウラン試薬）を用いた場合でも同様の傾向が得られることを確認しており、本実験に関しては蛍光剤の選択による影響は見られなかったことを付記しておく。

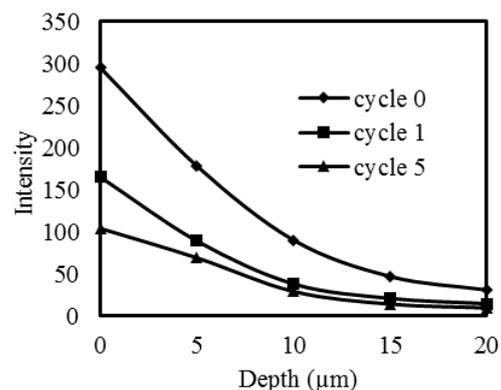


図 5 サイクル数の異なるサンプルに対する FLH 値分布の比較 (ピラニン試薬含有) (Data from Ying et al. (2015))

(2) 分子動力学に基づく動的粘弾性シミュレーションによるポリマー内部構造と機能特性の関係の評価

分子モデルを用いた動的粘弾性シミュレーションの結果、振動ひずみに対する応力応答により、高周波領域でのガラス状態、低周波領域でのゴム状態とその間のガラス転移の過程が再現されることが分かった。したがって、本手法がポリマー材料のガラス転移温度近傍の粘弾性特性を分子スケールから考察する一手法として有用であると考えられる。

また、ポリマー内部構造が粘弾性特性に与える影響について評価するため、ハードセグメントを球状凝集させた場合とモデル内に均一分散させた場合とでモデルを構築し、ハードセグメントの分率を変化させて、解析を行った。解析結果の一例を図6に示す。なお、横軸の周波数は分子間力の緩和時間 $\tau = \sigma\sqrt{m/\epsilon}$ を基に無次元化して示してある。これにより以下の結果が得られた。

- ・凝集により貯蔵弾性率は低下する
- ・弾性率の観点からのガラス転移過程が緩慢になる(形状変化機能の低下)
- ・凝集により $\tan\delta$ のピークが低周波側にシフトする(T_g が高温側にシフトすることを意味する)
- ・凝集はハードセグメントの剛性や粘性的な変形の効果を低減する(ハードセグメントの運動性や貯蔵エネルギーを小さくする)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Fluorescence Spectroscopy to Detect Structural Change in PU Shape Memory Polymer with Different Thermomechanical Cycles," Materials Research Innovations, (in press, Conference Paper to Journal Article).
2. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Relationship between Annealing and Shape Memory Effect of Shape Memory Polyurethane," Advanced Materials Research, vol.936, 2014, pp. 140-144, (Conference Paper to Journal Article).

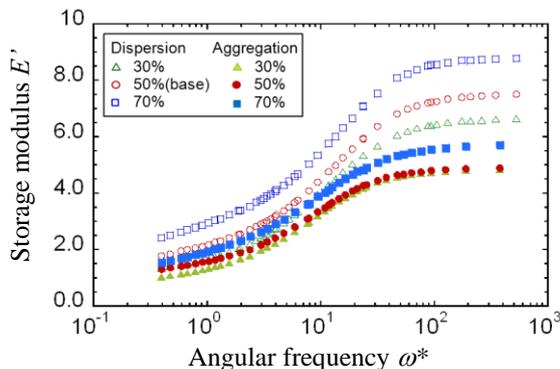


図6 ポリマー内部のハードセグメント分布の影響に関する解析結果の例

[学会発表] (計7件)

1. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Fluorescence Spectroscopy to Detect Structural Change in PU Shape Memory Polymer with Different Thermomechanical Cycles," International Conference on Materials Research and Engineering, 2015年1月31日, Shanghai, China.
2. 西川雅章, "粗視化分子シミュレーションを用いた高分子複合材料の粘弾性特性評価の研究", 第9回CMSI産官学連続研究会, 2014年11月20日, 東京都.
3. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Relationship between Annealing and Shape Memory Effect of Shape Memory Polyurethane," International Conference on Materials Science and Engineering Technology, 2014年6月29日, Shanghai, China.
4. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Evaluation of Micro-Damage Accumulation in Holed Plain-Woven CFRP Composite under Fatigue Loading," 2014 SPIE Smart Structures/NDE Conferences, 2014年3月12日, San Diego, USA.
5. Shimpei Matsuda, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Coarse-Grained Molecular Simulation for Viscoelastic Properties of Polyurethane Shape Memory Polymer," 3rd International Conference on Molecular Simulation, 2013年11月19日, 兵庫県.
6. Jia Ying, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, "Fluorescence Measurement to Investigate Microcrack Accumulation in Plain-Woven CFRP Composite under Fatigue Loading," 13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, 2013年11月12日, 愛知県.
7. 松田慎平, 西川雅章, 北條正樹, "分子モデルを用いた高分子粘弾性特性評価のためのシミュレーション," 第18回計算工学講演会, 2013年6月19日, 東京都.

[図書] (計0件)

[産業財産権] (計0件)

[その他] ホームページ

<http://ams.me.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北條 正樹 (京都大学)

研究者番号: 70252492

(2) 研究分担者

西川 雅章 (京都大学)

研究者番号: 60512085