一方向 AS4/PEEK の高温における非主軸非弾性挙動と そのマイクロメカニクス解析*

河井昌道^{*1}, 川瀬裕子^{*2}
根岸りえ子^{*2}, 益子誉一^{*2}

Off-Axis Inelastic Behavior of Unidirectional AS4/PEEK at High Temperature and Its Micromechanical Analysis

Masamichi KAWAI^{*3}, Yuko KAWASE,
Rieko NEGISHI and Yoichi MASUKO

^{*3} University of Tsukuba, Institute of Engineering Mechanics and Systems,
Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

Nonlinear stress-strain behavior of a unidirectional carbon fiber-reinforced composite AS4/PEEK under various off-axis loading conditions at high temperature was examined with particular emphases on the rate and loading-mode dependence of the response. Monotonic tensile stress-strain curves at high temperature accompanied marked nonlinearity for all off-axis angles except $\theta=0^\circ$. Permanent strains were clearly observed for all kinds of off-axis specimens after unloading. The off-axis permanent strain remaining after unloading became larger as the applied maximum stress increased. The strain and stress rates have appreciable influences on the flow stress of the off-axis nonlinear stress-strain relationships. These observations indicate that the off-axis nonlinear deformation of this composite involved an irrecoverable inelastic part and it was characterized by a viscoplastic deformation mechanism. In view of these experimental results, a simple micromechanics model for predicting the off-axis rate-dependent nonlinear stress-strain behavior of unidirectional AS4/PEEK was developed using the Aboudi's cell method for homogenizing composite behavior and the Chaboche's viscoplastic constitutive model for describing the rate-dependent inelastic behavior of the matrix material. The primitive calculations using the micromechanics model developed favorably reproduced the off-axis rate-dependent nonlinear behavior for the unidirectional AS4/PEEK at high temperature.

Key Words: Unidirectional Composite, Off-Axis Loading, Nonlinear Behavior, Inelastic Deformation, Rate Dependence, Unloading Behavior, High Temperature, AS4/PEEK, Micromechanics

1. 緒言

航空・宇宙機器用の高分子系複合材料には、室温以下の低温から 300°C 程度までの温度範囲で利用できることが要求される⁽¹⁾。このため、このような用途に対する耐熱性高分子基複合材料については、室温における非線形挙動だけでなく、高温における非線形挙動と使用温度の上昇に伴うその変化についても十分に考慮しなければならない。さらに、高温条件下では、高分子マトリックスの時間や速度に依存する変形応答が室温条件下におけるよりもいっそう顕著になる⁽²⁾。高分子系複合材料の高温条件下における非線形挙動を議論することは、航空・宇宙機器用の耐熱性高分子基複合材料に対してだけでなく、汎用の高分子系複合材料に

対しても同様に重要となる。その理由は、汎用の高分子系複合材料も、実際にはガラス転移温度以下のある高温条件で使用されることが多いからである。これらのことから、高分子系複合材料を用いた高温用機器の信頼性の高い設計を行うためには、高分子系複合材料の高温における非線形応答ならびにその速度・時間依存性を理解し、これらに対する工学的な予測方法を確立することが重要な課題となる。

高分子系複合材料の非線形変形挙動の理解とモデル化の重要性はすでに多くの研究者によって指摘されており、一方向強化複合材料の非主軸試験片を用いた基礎的な実験の結果が報告されている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。複合材料の非線形変形挙動における非弾性的な性質を深く理解するためには、一般に、負荷-除荷-再負荷挙動を知ることが重要となる。しかし、従来の実験的研究においては、主に引張負荷あるいは圧縮負荷による単調変形挙動が議論されており、非主軸負荷条件下で繰返し負荷を受ける複合材料の非線形挙動については十分に調

* 原稿受付 2000 年 4 月 25 日。

^{*1} 正員、筑波大学機能工学系 (☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。

^{*2} 筑波大学大学院。

E-mail: mkawai@kz.tsukuba.ac.jp

べられていない。高分子系複合材料の高温条件における単調な非主軸非線形挙動についても、Ha ら⁽³⁾、Gates と Sun⁽⁴⁾、Yoon と Sun⁽⁵⁾、Sun ら⁽⁶⁾ および著者ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾ による研究を除けば、まだ多くは報告されていない。さらに、高温において応力を制御する柔らかい負荷条件下の非主軸非線形応答を調べた研究もほとんど見当たらない。したがって、高分子系複合材料の非主軸非線形応答に内在する非弾性的な機構と負荷様式の違いによる影響については、まだ不明なことが多い。高分子系複合材料の非主軸非線形挙動の本質を理解し、これに合理的な定式化を与えるためには、これらの事柄についても実験的に明らかにすることが重要である。

一方、高分子材料をマトリックスとする一方向強化複合材料の非線形挙動を巨視力学的に定式化する試みは、初期の段階においては非線形弾性の問題として検討された⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。その後、金属材料に対して発達した塑性モデルおよび粘塑性モデルを修正して一方向強化複合材料の非線形挙動を記述する方法が Sun ら^{(4)~(6)(11)} によって提案されている。同じ問題に対して、マイクロメカニクスを用いた試みが Ha ら⁽³⁾ によって報告されている。Ha らは、Tsai-Hahn のマイクロメカニクス⁽¹²⁾ に基づいて一方向プライに対する粘塑性的な構成モデルを提案した。しかし、より一般的な Mori-Tanaka⁽¹³⁾ および Aboudi⁽¹⁴⁾ の均質化法を応用して高分子系一方向強化複合材料の非主軸非線形挙動をモデル化する試みおよびその実験的な検証については、まだ多くは報告されていない。したがって、これらの均質化法と構成材料に対するより精密な構成式の組合せがこの問題に対してどの程度の有効性を示すかについては、十分に明らかにされていない。

本研究では、一方向炭素繊維強化プラスチック複合材料の高温における非主軸非線形挙動の特徴を実験によって調べ、それを記述するためのマイクロメカニクスモデルについて検討する。このため、一方向炭素繊維強化プラスチック AS4/PEEK を取り上げ、高温条件における非主軸応力-ひずみ関係の非線形挙動とそのひずみ速度依存性について基礎データを求める。また、一定応力速度条件下の高温非主軸引張試験を行い、ひずみ制御条件下で求めた結果と比較することによって負荷様式の違いによる影響を観察する。さらに、非主軸負荷条件下における負荷-除荷-再負荷挙動を高温において調べる。続いて、高分子系複合材料の非線形速度依存挙動に対してマイクロメカニクス解析を試みる。ここでは、一方向プライに対する一般的な弾・粘塑性マイクロメカニクスモデルを開発する

ための最初の段階として、複合材料の均質化法に Aboudi モデル⁽¹⁴⁾ を、またマトリックスの非線形速度依存挙動を記述する構成式に Chaboche モデル⁽¹⁵⁾ をそれぞれ応用する。最後に、このマイクロメカニクスモデルを用いて基礎的なシミュレーションを行い、実験結果との比較に基づいてその適用性を明らかにする。

2. 試験片および試験方法

2.1 試験片 供試材は、炭素繊維(AS 4, Hercules)と熱可塑性 PEEK 樹脂(ICI)を組合わせたプリプレグ(APC-2/AS 4)を 16 枚積層した一方向強化複合材料 AS4/PEEK([0]₁₆)である。AS4/PEEK の繊維体積含有率は $V_f=61.0\%$ である。

非主軸引張試験片として、繊維配向角 θ (荷重軸と繊維軸のなす角度)が $\theta=0, 10, 30, 45, 60, 90^\circ$ となる 6 種類を用意した。JIS K 7073⁽¹⁶⁾ に準じた短冊形平滑試験片を用いるものとする。すべての繊維配向角について、試験片の長さ $L=200$ mm、標線長さ $L_0=100$ mm とした。試験片の幅は、繊維方向($\theta=0^\circ$)については 10 mm、その他の繊維配向角については 20 mm とした。試験片の厚さは約 2 mm である。試験片の両端には、つかみ部を保護するためアルミニウム合金製の長方形タブ(長さ 50 mm、厚さ 1.0 mm)をエポキシ系接着剤(ARALDITE)を用いて貼付した。

2.2 試験方法 3 種類の非主軸負荷試験を 100°C で行う：(A)一定変位速度の非主軸単調引張試験；(B)一定荷重速度の非主軸単調引張試験；(C)一定変位速度の非主軸負荷-除荷試験。

試験(A)においては、2 種類の一定(公称)ひずみ速度 $1.0\%/min$ および $0.01\%/min$ による単調引張試験を行う。試験(B)においては、2 種類の一定(公称)応力速度 $100\text{ MPa}/min$ および $1.0\text{ MPa}/min$ による非主軸単調引張試験を行う。なお、 $\theta=10^\circ$ については、試験片数の制限から一定応力速度 $100\text{ MPa}/min$ の引張試験のみを行った。試験(C)においては、非線形応力-ひずみ挙動が現れる応力レベルまで負荷した後に除荷-再負荷を挿入する試験を行う。この試験では、除荷直前の応力レベルを変えて負荷-除荷のサイクルを静的に 4 回挿入し、その後試験片が破断するまで引張負荷を与えた。ひずみ速度は $1.0\%/min$ とした。

試験には、耐熱仕様の油圧グリップを装備した油圧サーボ式材料試験機を用いた。また、試験片の加熱には、室温から約 350°C までの範囲で任意の温度にデジタル設定することのできる環境槽を利用した。試験

片のひずみは、試験片中央部の両面に貼付したひずみゲージにより測定した。

3. 試験結果およびその検討

3・1 非主軸ヒステリシス挙動 図1(a)～(c)に、負荷-除荷試験(100°C, 1.0%/min)から求めた非主軸応力-ひずみ関係を繊維配向角 $\theta=10, 30, 60^\circ$ について示す。これらの図の第1象限が荷重方向(x 軸)の応力とひずみの関係を、また第2象限は参考のため

Fig. 1 Off-axis loading-unloading behavior of unidirectional AS4/PEEK at 100°C

荷重方向の応力と横方向(y 軸)のひずみの関係をそれぞれ示している。

まず、いずれの繊維配向角に対しても、除荷後に永久ひずみの現れることを明らかに観察することができる。このことは、 $\theta=45, 90^\circ$ の場合(図省略)についても同様であった。したがって、非主軸応力-ひずみ関係に現れる非線形性は非弾性的な機構の影響を強く受けていると推測することができる。

次に、非主軸条件下の負荷-除荷-再負荷に対応してヒステリシス現象が現れることを明らかに観察することができる。このようなヒステリシス挙動はすべての繊維配向角について認められた。ヒステリシスの幅は繊維配向角に依存して異なる。一つの繊維配向角について見た場合、除荷直前の応力レベルが増加するほどヒステリシス幅の大きくなる傾向が認められる。

除荷過程の応力-ひずみ関係(除荷曲線)は非線形性を有しており、完全除荷によって線形弾性的な除荷の場合よりも大きなひずみ回復が起きる。このような現象は、金属材料に対して観察されている Masing 挙動⁽¹⁷⁾に類似している。

非主軸ヒステリシス応答において、除荷開始応力レベルまで再負荷したときの全ひずみが除荷開始時のそれよりもわずかに大きくなる傾向を示す。このことから、繰返し負荷条件下において、金属の場合と同様なラチェット現象の起きることが予想される。

なお、非主軸ヒステリシス挙動に関するこれらの観察結果は、これまでにほとんど報告されていないものであり、一方向強化複合材料の非線形変形挙動のモデル化において考慮すべき新しい問題を提起している。

3・2 非主軸単調引張挙動のひずみ速度依存性

まず、一方向 AS4/PEEK の 100°Cにおける流動応力のひずみ速度依存性を調べる。図2(a)～(f)に2種類の一定ひずみ速度条件(1.0%/min, 0.01%/min)に対して求めた非主軸応力-ひずみ関係を繊維配向角ごとに重ねて示す。1.0%/minの結果が破線で、また 0.01 mm/minの結果は実線で示されている。

低ひずみ速度における流動応力は、予想されるように高ひずみ速度におけるそれよりも小さくなる。具体的には、軸ひずみ 1.0%において、低ひずみ速度での流動応力が高ひずみ速度の場合に比べて 8%(10°), 20%(30°), 15%(45°), 8%(60°)低下している。 $\theta=45^\circ$ の試験から求めた材料主軸に関するせん断応力-せん断ひずみ関係(図省略)の場合、ひずみ速度の違いによる影響はせん断ひずみ 1.0%において約 16%であった。この差は、流動応力の低下と同程度である。

負荷-除荷試験の結果から非主軸非線形挙動を支配

する因子としてマトリックス材料の非弾性応答を推測した。異なるひずみ速度に対する上記の試験結果は、マトリックス材料の非弾性応答がさらにひずみ速度にも依存することを示している。したがって、PEEK 樹脂の非線形挙動が粘塑性的な特徴を有すると結論することができる。

次に、非主軸応力-ひずみ関係の初期こう配について検討する。初期線形域の傾きは、 $\theta=0^\circ, 10^\circ$ の場合を除けば、低ひずみ速度のほうが小さくなる傾向を示

す。具体的には、 $\theta=30^\circ$ に対して約 26%，その他の繊維配向角に対しては約 0.2%~6.5% 小さくなる。ひずみ速度 0.01%/min に対する $\theta=45^\circ$ 試験片のせん断応力-せん断ひずみ関係から評価したせん断弾性係数 G_{12} は 5.4 GPa であり、ひずみ速度 1.0%/min の場合に比べて約 8% 小さい。この差は、室温と高温におけるせん断弾性係数の値 (5.8 GPa, 5.9 GPa) の差よりも大きい。このような弾性特性の速度依存性は高分子材料において観察されている⁽¹⁸⁾。実際、類似の傾

Fig. 2 Rate-dependent stress-strain responses of unidirectional AS4/PEEK at 100°C under off-axis tensile loading conditions

向が PEEK-150 P 樹脂の応力-ひずみ関係においても認められる⁽³⁾。したがって、AS 4/PEEK における弾性特性の速度依存性は PEEK 樹脂における類似の特性に起因するものと考えられる。

なお、非主軸応力-ひずみ関係の繊維配向角依存性は、試験した異なるひずみ速度について同様であった。

3・3 非主軸単調引張挙動の応力速度依存性 一定応力速度 (100 MPa/min, 1.0 MPa/min) の単調引張試験から求めた非主軸応力-ひずみ関係を繊維配向ごとに一定ひずみ速度試験 (1.0%/min, 0.01%/min) の結果と重ねて図 2(a)~(f) に示す。各応力速度に対する試験結果は、記号 (○, △印) 付きの実線と破線で示されている。

応力速度を 100 倍低速にしたことによる流動応力の低下は、ひずみ速度を 100 倍低下させた場合よりもわずかに小さく現れる。また、応力制御試験とひずみ制御試験の結果に見られる相違 (負荷様式の違いによる影響) は、特に $\theta=90^\circ$ の場合に顕著となる。すなわち、 $\theta=90^\circ$ の場合、一定応力速度による破壊ひずみが一定ひずみ速度によるそれよりも著しく大きくなる。この結果は、トランスバース方向に対する応力-ひずみ関係の非線形性を観察したい場合、応力制御試験が有効であることを示している。ひずみの現れ方を強制的に指定しない応力制御形負荷の場合、材料は与えられた応力状態に対して自由に変形を起こすことで、局所的な応力の低いより安定な状態へ「逃げる」ことができる。このことは、局所的な破壊を遅らせる。また、応力制御条件下のほうが発生するひずみが大きくなることに対応する。

一定応力速度による非主軸応力-ひずみ関係の初期こう配は、応力速度が大きいほど大きくなる傾向を示す。この傾向は、一定ひずみ速度試験の結果と同様である。

Fig. 3 Unit cell for unidirectional fiber composites

4. 繊維の周期配列とマトリックスの粘塑性を考慮したマイクロメカニクスモデル

次に、高分子系一方向複合材料の非主軸非弾性挙動を予測する問題に対して、マイクロメカニクスのアプローチの適用性を検討する。本研究では、Aboudi の平均化手法⁽¹⁴⁾ と Chaboche の粘塑性構成式⁽¹⁵⁾ の組合わせた複合材料モデルを提案し、非主軸単調非線形挙動についてその有効性を調べる。

4・1 均質化方法 Aboudi のセル法においては、一方向繊維強化複合材料の内部構造が四角形のユニットセル (代表体積要素) の周期的な配列によって表され、ユニットセルは同形状のサブセルから構成される。最も簡単なユニットセルは、図 3 に示すように、繊維を表す一つのサブセル $[(\beta, \gamma)=(1, 1)]$ とマトリックスを表す三つのサブセル $[(\beta, \gamma)=(1, 2), (2, 1), (2, 2)]$ から構成される。Aboudi のセル法では、変位場および応力場がユニットセルおよびサブセルの境界に沿って平均的な意味においてのみ連続性を満たすと仮定される。この近似操作によって、複合材料全体の応力とひずみの関係および複合材料全体の巨視的なひずみとサブセルの局所的なひずみの関係を閉じた形式で表現することができる。

サブセルが完全接着されていることを仮定して導出された複合材料全体の応力速度とひずみ速度の関係は、Voigt 表記を用いて、

$$\{\dot{\sigma}\} = [B^*](\{\dot{\epsilon}\} - \{\dot{\epsilon}^p\}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

のように表現することができる。ここで、

$$[B^*] = \frac{1}{h\ell} \sum_{\beta, \gamma=1}^2 h_\beta \ell_\gamma [\tilde{C}^{(\beta\gamma)}] [A^{(\beta\gamma)}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\{\dot{\epsilon}^p\} = [B^*]^{-1} \left\{ \frac{1}{h\ell} \sum_{\beta, \gamma=1}^2 h_\beta \ell_\gamma [\tilde{C}^{(\beta\gamma)}] (\{\dot{\epsilon}^{p(\beta\gamma)}\} - [A^{p(\beta\gamma)}] \{\dot{\eta}_s^p\}) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式に含まれる $[\tilde{C}^{(\beta\gamma)}]$ はサブセル (β, γ) の弾性マトリックス、 $\{\dot{\eta}_s^p\}$ はサブセルの非弾性ひずみ速度ベクトル $\{\dot{\epsilon}^{p(\beta\gamma)}\}$ を縦に並べたユニットセル全体に対する非弾性ひずみ速度ベクトルを表す。このほかの $[A^{(\beta\gamma)}]$ と $[A^{p(\beta\gamma)}]$ はユニットセルの幾何学的形状 $h (=h_1+h_2)$, $\ell (= \ell_1+\ell_2)$ に関連した定数マトリックスを表す。以下の解析において、ユニットセルおよびサブセルの形状は正方形 ($h_\beta = \ell_\beta$) であると仮定した。なお、セル法の基礎関係式を誘導する方法は文献⁽¹⁴⁾ に詳細に記述されている。

4・2 マトリックスと繊維の構成モデル 金属材料の非弾性解析においては、Chaboche の構成モデル⁽¹⁵⁾ が極めて広範に利用されている。この理由は、

非線形挙動の記述能力が高く、しかも材料定数の決定が比較的容易であるためである。また、Chaboche モデルは、金属材料の非弾性挙動に対する連続体熱力学的な定式化の枠組にも適合した形式を有し、材料挙動の異方性や損傷の影響を容易に取り込むことができる⁽¹⁹⁾。ここでは、金属材料とは全く異なった物理機構に支配される高分子材料に対しても、その非線形性の記述に Chaboche の構成モデルが現象論的に利用できることを仮定する。なお、高分子系複合材料のマトリックス挙動を記述する目的に対して、Chaboche の構成モデルを利用した例はほかにはない。

Chaboche の構成モデルにおいては、材料応答の非線形性を記述するための内部変数として移動硬化変数 p_{ij} と等方硬化変数 r が用いられる。これらの内部変数に支配される粘塑性ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ は、

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \frac{3}{2} \dot{P} \frac{s_{ij} - p_{ij}}{\Sigma_e} \quad (4)$$

と表現される。ここで、 s_{ij} は偏差応力を、 Σ_e と $\dot{P}$ は、

$$\Sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} - p_{ij})(s_{ij} - p_{ij})} \quad (5)$$

$$\dot{P} = \left\langle \frac{\Sigma_e - r - r_0}{K} \right\rangle^n \quad (6)$$

のように定義される。式(6)に含まれる K 、 n と r_0 は材料定数である。角括弧 $\langle \rangle$ は Macaulay 括弧を表し、 $\langle x \rangle = x(x \geq 0)$ 、 $\langle x \rangle = 0(x < 0)$ のように定義される。

非線形応力-ひずみ挙動の記述精度を高める方法として、異なる非線形性を有する複数の移動硬化変数を

$$\dot{p}_{ij} = \sum_a \dot{p}_{ij}^{(a)} \quad (7)$$

のように重ねる方法が提案されている⁽¹⁹⁾。移動硬化変数の成分の変化速度 $\dot{p}_{ij}^{(a)}$ は、

$$\dot{p}_{ij}^{(a)} = \frac{2}{3} H^{(a)} \left[\dot{\varepsilon}_{ij}^p - \frac{3}{2} \frac{L^{(a)}}{H^{(a)}} p_{ij}^{(a)} \dot{P} \right] \quad (8)$$

と表される⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾。ここで、 $H^{(a)}$ と $L^{(a)}$ は材料の硬化速度と軟化速度を特徴付ける材料定数を表す。

等方硬化変数 r の非線形な発展式は、通常、

$$\dot{r} = B(Q - r)\dot{P} \quad (9)$$

と表現される。ここで、 Q は等方硬化変数の飽和値を表し、 B は材料定数である。等方硬化変数の重ね合わせは移動硬化変数のそれと同様に考慮することができる。

一方、炭素繊維の挙動は完全線形弾性的と仮定する。ここでは、簡単化のため、弾性特性の変形に伴う変化は考慮しない。

5. 計算結果と実験結果の比較

5.1 材料定数の同定 PEEK 樹脂の基礎特性は、Ha ら⁽³⁾ の実験結果に基づいて決定した。Ha らは、この研究で用いた複合材料のプリプレグ APC-2 に使用されている PEEK 樹脂に最も近い挙動を示すとされている PEEK-150 P の引張応力-ひずみ関係を種々の試験温度とひずみ速度について詳しく報告している。ここでは、試験温度 121°C に対する試験結果を参考にした。Ha らの試験結果を再現すれば、図 4 のようになる。

まず、PEEK 樹脂が等方弾性であることを仮定し、図 4 に示された応力-ひずみ関係の初期こう配と他の文献⁽²⁰⁾ に報告されている値を参考にして、ヤング率とポアソン比をそれぞれ $E=4.4$ GPa、 $\nu=0.3$ と定めた。

なお、図 4 をよく観察すると、弾性係数がひずみ速度に依存しているように見える。しかし、簡単化のため、この研究では PEEK 樹脂の初期線形応答における速度依存性は考慮しないことにする。

次に、Chaboche モデルの応用に際し、非線形挙動を二つの移動硬化変数の重ね合わせによって表現した。したがって、決定すべき非弾性材料定数は K 、 n 、 r_0 、 H_1 、 L_1 、 H_2 、 L_2 の 6 個である。粘塑性挙動を特徴付けるこれらの材料定数は、文献⁽¹⁵⁾⁽¹⁹⁾ の方法に従って同定した。その結果、 $K=55$ MPa $^{-m}$ min $^{-1}$ 、 $n=12$ 、 $r_0=5$ MPa、 $H^{(1)}=200$ MPa、 $L^{(1)}=0.001$ 、 $H^{(2)}=3555$ MPa、 $L^{(2)}=200$ 、 $B=0$ MPa $^{-1}$ 、 $Q=0$ 。図 4 に、Chaboche モデルを用いて予測した PEEK-150 P の応力-ひずみ関係を実線で示す。

一方、炭素繊維 AS 4 の弾性特性は横等方性であると仮定する。AS 4/PEEK の繊維方向の弾性係数とポアソン比に対して複合則を適用し、PEEK 樹脂に対す

Fig. 4 Stress-strain curves for PEEK

る弾性特性を用いることで、AS 4 の長手方向の弾性係数 E_1 とポアソン比 ν_{12} を決定した。 E_2 と G_{12} については、複合材料の E_2 と G_{12} に近い値が得られるように決定した。ポアソン比 ν_{23} には文献値の平均を仮定した。計算に使用した AS 4 の工学弾性係数は次のようである。 $E_1=224$ GPa, $E_2=19.1$ GPa, $G_{12}=35$ GPa, $\nu_{12}=0.31$, $\nu_{23}=0.35$ 。

(a) $\theta=0^\circ, 90^\circ$ (b) $\theta=10^\circ, 45^\circ$ (c) $\theta=30^\circ, 60^\circ$

Fig. 5 Micromechanical predictions of the off-axis nonlinear behavior of unidirectional AS 4/PEEK at 100°C under constant stress-rate

5.2 計算結果 マイクロメカニクスモデルを用いて計算した一定応力速度条件(100 MPa/min, 1.0 MPa/min)に対する非主軸応力-ひずみ関係と対応する実験結果の比較を図 5(a)~(c)に示す。

各繊維配向角について、計算結果の特徴を観察する。 $\theta=0^\circ$ の場合、マイクロメカニクス計算では、弾性係数の増加を考慮していないので、ひずみが大きくなるほど、計算結果と実験結果の差が目立つようになる。しかし、このことによる両者の差の割合は全体としては大きくない。応力速度の違いによる影響は、実験結果と同様、計算結果においてもほとんど現れていない。これは、繊維の荷重分担が支配的であることによる。

繊維配向角 $\theta=10, 30, 45^\circ$ の場合、試験および計算によって求めた非主軸応力-ひずみ関係の流動応力は比較的良好に一致している。しかし、厳しく見た場合、ひずみが大きい範囲においては、計算によって求めた流動応力がひずみ速度に依らず過大に評価される傾向を示している。この傾向は、 $\theta=60, 90^\circ$ の場合に特に著しくなる。

流動応力の応力速度依存性を見た場合、マイクロメカニクスモデルの計算結果と実験結果は同程度であることがわかる。したがって、AS 4/PEEK に用いられている PEEK 樹脂の速度依存性が参照した PEEK-150 P 樹脂(図 4)のそれに近いと推測することができる。

Brockenbrough ら⁽²¹⁾ は、ユニットセルの取り方が弾塑性挙動に与える影響を有限要素法を用いて調べ、本解析に用いたような四角形のユニットセルを仮定した場合、繊維に垂直な方向の流動応力を他の形状のユニットセルを用いた場合よりも大きく評価することを見出している。本解析においても同様に、 $\theta=90^\circ$ に近いほど計算した流動応力が大きめに評価された。したがって、計算結果の予測精度が $\theta=60, 90^\circ$ に対して低下するのは、Aboudi モデルの平均化処理に四角形ユニットセルが仮定されていることに起因すると考えられる。このことは、一方向強化複合材料のトランスバース方向の非主軸非線形挙動をさらに精度よく予測したい場合の障害となるものである。しかし、実用的な積層板に対して非弾性解析を行った場合、大きなせん断応力を受ける構成プライの非線形挙動の影響が支配的となることを考慮すれば、上記の障害は本解析結果に見られるほど顕著なものにならないことが予想される。

AS 4/PEEK に対する上述の計算において、応力-ひずみ関係の折れ曲りの現れる応力レベルが計算結果

と実験結果でほぼ一致するように、初期降伏応力に相当する r_0 の値だけを図 4 に基づいて同定した値から 40 MPa に変更した。この変更は、試験温度と成形履歴等を考慮することに対応すると解釈できる。このほかの非弾性材料定数については複合材料の挙動にフィッティングさせる操作を行っていないので、全体としてはマイクロメカニクスの精神を最も尊重した素朴な解析であると考えることができる。したがって、このような素朴な計算の割には、全体的に有望な結果が得られていると判断することができる。

なお、上記のフィッティング操作を持ち込まないためには、成形過程も含めたマイクロメカニクス解析を行わなければならない。

6. 結 言

一方向炭素繊維強化複合材料 AS 4/PEEK の高温における非主軸非線形挙動に与えるひずみ速度の影響、応力速度の影響、ならびに負荷-除荷-再負荷条件下の非主軸ヒステリシス挙動を実験によって調べた。また、セル法に基づく弾・粘塑性マイクロメカニクスモデルを構築し、一方向 AS 4/PEEK の高温非主軸非線形挙動に対するシミュレーション結果と実験結果の比較に基づいてその適用性を評価した。得られた主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 一方向 AS 4/PEEK の 100°C における非主軸非線形挙動は、顕著な非線形性を呈し、ひずみ速度あるいは応力速度に大きく依存する。流動応力は速度が低いほど低下する。

(2) 応力制御形の負荷によって破壊までに生じるひずみは、ひずみ制御形の負荷によるそれよりも大きくなる傾向を示す。

(3) 一方向 AS 4/PEEK の非主軸応力-ひずみ関係の初期こう配は、 $\theta=0^\circ, 10^\circ$ の場合を除けば、ひずみ速度あるいは応力速度が低いほど小さくなる。

(4) 非線形挙動が現れるまで非主軸負荷を与えた後、応力を除荷すると永久ひずみが残る。この実験事実は、上記の速度依存性を併せて考慮すれば、非主軸非線形挙動が PEEK 樹脂の粘塑性的な性質に支配されていることを明らかにしている。

(5) 非主軸応力-ひずみ関係は、除荷-再負荷に対して顕著なヒステリシスを描く。

(6) マトリックス材料の粘塑性挙動を Chaboche モデルを用いて記述し、セル法と組み合わせることによってこれまでに議論されたものとは異なる弾・粘塑性

マイクロメカニクスモデルを構築した。

(7) 粘塑性マイクロメカニクスモデルは、 $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ については、非主軸非弾性挙動とその応力速度依存性を比較的良好に記述することができる。しかし、 $\theta=60^\circ\sim 90^\circ$ については、予測した流動応力の値は実験結果よりも大きくなる傾向を示す。

最後に、実験の一部についてご協力いただいた筑波大学大学院生・八戸敦司氏に感謝の意を表する。また、この研究の一部に対して文部省科学研究費 [基盤研究(C)(2), No. 10650072] の助成を受けたことを付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Morita, W. H. and Graves, S. R., *14th National SAMPE Technical Conference*, Oct. 12-14, (1982), 387-401.
- (2) 宮野靖・笠森正人・服部陽一, 材料システム, **10**(1991), 87-95.
- (3) Ha, S. K., Wang, Q. and Chang, F. K., *J. Compos. Mater.*, **25**(1991), 334-374.
- (4) Gates, T. S. and Sun, C. T., *AIAA J.*, **29**-3(1991), 457-463.
- (5) Yoon, K. J. and Sun, C. T., *J. Compos. Mater.*, **25**(1991), 1277-1296.
- (6) Sun, C. T., Chung, I. and Chang, I. Y., *Compos. Sci. Technol.*, **43**(1992), 339-345.
- (7) 河井昌道・谷嶋真一・高野洋一・八戸敦司, 機論, **64**-627, A(1998), 2838-2846.
- (8) 河井昌道・谷嶋真一・川瀬裕子・八戸敦司, 機論, **65**-632, A(1999), 791-799.
- (9) 福田武人, 材料, **38**-428(1989), 562-567.
- (10) Hahn, H. T. and Tsai, S. W., *J. Compos. Mater.*, **7**(1973), 102-118.
- (11) Sun, C. T. and Chen, J. L., *J. Compos. Mater.*, **23**(1989), 1009-1020.
- (12) Tsai, S. W. and Hahn, H. T. (藤井太一監訳), 複合材料の強度解析と設計入門, (1986), 297, 日刊工業新聞社.
- (13) Mori, T. and Tanaka, K., *Acta Met. Mater.*, **21**(1973), 571-574.
- (14) Aboudi, J., *Mech. Compos. Mater.*, (1991), 1, Elsevier Science Publishers.
- (15) Chaboche, J. L., *Bull. Acad. Polon. Sci., Ser. Sci. Tech.*, **25**-1(1977), 33-42.
- (16) JIS K 7073, 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法, (1988), 日本工業標準調査会.
- (17) Masing, G., *Proc. 2nd Int. Congress for Applied Mechanics*, (1926), 332-335, Zurich, Switzerland.
- (18) Nielsen, L. E. (小野木重治訳), 高分子と複合材料の力学的性質, (1976), 163, 化学同人.
- (19) Lemaitre, J. and Chaboche, J. L., *Mechanics of Solid Materials*, (1985), 1, Cambridge University Press.
- (20) Hull, D. and Clyne, T. W., *An Introduction to Composite Materials*, (1996), 31, Cambridge Univ. Press.
- (21) Brockenbrough, J. R., Suresh, S. and Wienecke, H. A., *Acta Met. Mater.*, **39**-5(1991), 735-752.