UV リソグラフィを用いた単繊維の軸方向圧縮試験片の作製と 圧縮試験に関する一考察*

堀川 教世^{*1}, 野村 幸弘^{*2}, 北河 享^{*2}, 春山 義夫^{*1}
境田 彰芳^{*3}, 今道 高志^{*4}, 上野 明^{*5}, 川野 優希^{*6}

Fabrication of Micro-Sized Specimen for Axial Compressive Strength Evaluation of Single Fiber Using UV Lithography and Its Testing Method

Noriyo HORIKAWA^{*1}, Yukihiro NOMURA, Tooru KITAGAWA, Yoshio HARUYAMA,
Akiyoshi SAKAIDA, Takashi IMAMICHI, Akira UENO and Yuki KAWANO

^{*1} Toyama Prefectural Univ. Dept. of Mechanical Systems Engineering
Kurokawa 5180, Imizu-shi, Toyama, 939-0398 Japan

In this paper, a newly developed process to fabricate micro-sized specimen for axial compressive strength evaluation of single fiber using ultraviolet (UV) lithography was proposed. Technique of UV lithography, which was used in semiconductor production, was adopted to fabricate a test specimen that fiber was partially embedded in a photo-polymer. The photo-polymer SU-8 was used as a resist for high aspect ratio test specimen. A PBO fiber, which has excellent characteristics in tensile strength, tensile modulus and chemical resistance, was used as a test fiber material. Direct axial compression test was performed using the micro-compression testing machine with a flat indenter of 50 μm in diameter and two camera units. Finite element analysis was carried out to compute the internal stress distribution in the fiber under compression and to determine the optimum fiber length. The results showed that the proposed specimen fabrication method using UV lithography was demonstrated to be effective for direct measurement of the compressive strengths of PBO fibers. Finite element analysis revealed that the PBO fiber length in the compression test should be at least 20 μm to avoid the influence of fiber rooting in the resin. The experimental values obtained for the compressive strengths of PBO fibers exhibited Weibull distribution with a mean of 217 MPa, which is lower than the values generally obtained by other test methods such as the loop test or resin embedment test.

Key Words : Material Testing, Micro Material, High Polymer Materials, Compressive Strength, UV Lithography

1. 緒 言

高分子繊維の中でも芳香族環の分子鎖の伸びきり鎖構造を持つ繊維は非常に高い引張強度と引張弾性率を有するものが多いが⁽¹⁾, 圧縮強度については, 引張強度に比べて非常に低く, 特に高分子系繊維は炭素繊維よりもその傾向が顕著である⁽²⁾. こうした高分子繊維を複合材料の強化繊維として使用した場合, 複合材料の特性は強化繊維の特性に大きく依存するため全体としての圧縮強度は低くなる. また, 光ファイバーケーブルのテンションメンバのように繊維をストランド(繊維束)の形態で使用した場合には, 繊維を屈曲させた際に圧縮側に生じる

* 原稿受付 2011 年 11 月 30 日

^{*1} 正員, 富山県立大学工学部機械システム工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

^{*2} 東洋紡績(株)総合研究所 (〒520-0292 滋賀県大津市堅田)

^{*3} 正員, 明石工業高等専門学校 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町)

^{*4} 正員, 滋賀県商工観光労働部 (〒520-8577 滋賀県大津市京町)

^{*5} 正員, 立命館大学理工学部マイクロ機械システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路町)

^{*6} 学生員, 富山県立大学大学院工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: horikawa@pu-toyama.ac.jp

キンクバンドと呼ばれる圧縮損傷により強度低下を引き起こすため正確な圧縮強度を求めることが重要となっている。

現在までに圧縮強度を実験的に求めるいくつかの方法が考案されている。一つは単繊維を樹脂に包埋した試験片を圧縮する方法で、樹脂試験片を圧縮することで界面を通して繊維を間接的に圧縮する方法⁽³⁾である。この方法では顕微鏡観察により圧縮中に繊維に生じたキンクバンドを検出し、その時の圧縮ひずみから圧縮強度を求めている。また、この試験片を用いた別の方法として、試験片に曲げ変形を与え、圧縮側の繊維に生じたキンクバンドの間隔（平均破断長さ）を計測し、別の方法で求めた界面のせん断強さと平均破断長さから繊維の圧縮強度を求める方法⁽⁴⁾もある。これらの方法では、前者は引張弾性率と圧縮弾性率を等しいと仮定していること、後者では界面のせん断強さは測定方法により値にばらつきがあるため、正確さに欠ける問題がある。また、繊維が樹脂に包埋されているため、表面欠陥が樹脂によってふさがれることや樹脂硬化の際の収縮により繊維が圧縮されることが考えられ、得られる圧縮強度にはこうした要因が含まれている⁽⁵⁾。

一方、繊維を樹脂に埋め込まないループ法⁽⁴⁾やリコイル法⁽⁶⁾もある。ループ法は単繊維をループ状にし、破壊するときのループ径より圧縮強度を求める手法で、リコイル法は一定引張負荷状態の繊維を切断し、破碎するときの応力から圧縮強度を求める方法である。しかしながら、ループ法ではキンク損傷が観察しにくいことや、高分子繊維ではリコイル法では炭素繊維のように繊維が粉々に破壊せず、破壊の境界値が見分けにくいなどの問題がある。さらに、単繊維の圧縮強度を求める方法として、軸方向直接圧縮負荷による試験方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾がある。この方法は繊維を直接軸方向に圧縮するものであるが、分子鎖の伸びきり鎖構造を持つ繊維の多くは直径が $10\text{ }\mu\text{m}$ と非常に小さいため繊維の固定が難しく、さらに、エポキシ樹脂等で固定した場合には、図 1 に示すように、根元部において繊維表面の濡れによる樹脂の浮き上がりが見られる。この場合、浮き上がり部分の樹脂の影響を取り除くために繊維固定部からかなり離れた位置で圧縮強度を評価する必要があるが、繊維長さが長くなると長柱の座屈を起こしやすくなるため、正確な圧縮強度を求めることが困難となる。また、浮き上がり部分の樹脂形状にばらつきがみられることや繊維と樹脂の境界がはっきりしないこと等の理由により、FEM 等の数値解析によって固定部近傍の不均一な応力状態の範囲を決めることが困難であるという問題も抱えている。

このような背景のもと、本研究では加速度センサや半導体検査プローブといったマイクロ部品の作製に使用が検討されている UV リソグラフィ技術⁽⁹⁾に着目し、この技術を用いて単繊維の片側端部を樹脂に包埋し固定する方法を提案した。次いで、高分子繊維の中でも最も強度の高い繊維を用いて単繊維を固定する台（以下、単繊維固定台と記す）を作製し、その場観察を含めた単繊維の軸方向直接圧縮試験を行い圧縮強度の測定を行った。さらに、実験に使用した繊維に関して単繊維固定台の作製方法とこの固定台を用いた圧縮試験方法が有効かどうかについて検討を行った。

Fig. 1 Single fiber vertically fixed with resin by using conventional method

2. UV リソグラフィ技術を用いた単繊維固定台の作製方法

本実験で使用する繊維は単繊維であり試験機への固定が困難であるため、UV リソグラフィ技術を用いて単繊維固定台を作製した。繊維を固定する樹脂には厚膜用レジスト SU-8 (MICROCHEM 社製)、レジストを剥がしやすくするためのコート剤には OmniCoat (MICROCHEM 社製)、現像液には SU-8 Developer (MICROCHEM 社製)を使用した。図 2 に本研究で行った単繊維固定台の作製方法を示す。まず、 $15\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の大きさに切断した Si ウエハを準備し、ウエハ上にコート剤を塗布し、スピンコーターによってレジストを剥がしやすくする

Fig. 2 Fabricating process of pedestal to fix a fiber made of resin using UV lithography

Table 1 Fundamental properties of PBO fiber

Fiber	Tensile strength (GPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Density (g/cm ³)
PBO - AS	5.8	180	3.5	1.54

ための犠牲層を作製する (図 2 (a)). 次に, 犠牲層の上に一定量のレジストを塗布し, スピンコーターで厚さ約 $100\ \mu\text{m}$ の膜を作製する (図 2 (b)). 次に, かみそりを用いて先端を平滑に切断した単繊維をレジスト上に配置し, 再度, 繊維の上にレジストを塗布し繊維をレジスト中に埋め込む (図 2 (c)). この後, 65°C で 20 分, 95°C で 50 分のベーキング処理を行い, 樹脂を焼き固める. 次に, フォトマスク (Cr マスク) のマスク部分で繊維端部を覆い, マスクアライナーによって紫外線を照射し露光を行う (図 2 (d)). 露光後, 再び 65°C で 10 分, 95°C で 5 分のベーキング処理を行った後, 現像液に浸け, フォトマスクにより紫外線が遮断されていた部分のレジストを溶解・除去する. この時, フォトマスクにより紫外線が遮断されていた部分のレジストは除去され, 除去されなかったレジストから単繊維が飛び出している状態になる (図 2 (e)). 最後にエタノールで洗浄した後, ピンセットを用いてフォトレジストを Si ウエハから剥がし取る (図 2 (f)).

3. 単繊維圧縮試験方法

3・1 供試材料

フォトリソグラフィ技術を用いた単繊維の固定台作製工程では, 酸性の現像液を使用するため, それに暴露されても繊維が劣化しないことが必要である. そこで圧縮試験の供試材料には, 耐熱, 耐酸性に優れた特性を持つ PBO 繊維 (ザイロン[®]AS, 東洋紡製) を使用した. この繊維は約 300 本からなる繊維束の状態で供給されているため, 単繊維の固定台作製の際には繊維束から一本ずつ繊維を抜き取り使用した. 表 1 に繊維の機械的特性⁽¹⁰⁾を示す. 圧縮試験での繊維の長さは 4・3 節で行った解析結果を踏まえて約 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ とした.

3・2 軸方向直接圧縮試験

圧縮試験には微小圧縮試験機 (MCT-W500, 島津製作所製) を用いた. 図 3 に圧縮試験部の詳細を示す. 試験機には先端に直径 $50\ \mu\text{m}$ の平たん部を持つ角錐圧子を取り付けられており, この圧子で直接, 繊維を軸方向に圧縮する仕組みとなっている. また, 圧縮試験部には 2 台のカメラが単繊維に対して直交するように設置されており, 正面と側面から試験中の繊維の変形挙動を観察・録画することができる. 単繊維の固定台は L 字型の治具に貼り付けられ, 試験機のステージに固定されるようになっている. 試験機のステージは 2 軸傾斜ステージとなっており, 治具を試験機に固定した後, 2 台のカメラで繊維が垂直になるように観察を行ないながら角度を調節するようになっている.

Fig. 3 Experimental set-up

Fig. 4 Analysis model for FEM

Table 2 Mechanical properties for finite element analysis

	Young's moduli (MPa)			Poisson's ratios		
	E ₁₁	E ₂₂	E ₃₃	ν ₁₁	ν ₂₂	ν ₃₃
PBO fiber	180000	2400	2400	0.4	0.02	0.02
Resin	3200			0.4		

圧縮試験では、負荷速度 4.46×10^{-2} mN/s で行い、負荷開始直前から圧縮破壊に至るまでその場観察を行い、画像を記録した。圧縮強度を計算する際の繊維の直径は、繊維断面を円と仮定し、その場観察の画像データから測定した。その場観察には光学顕微鏡（倍率 1000 倍）を用いて行い、繊維の直径は画像データに繊維と一緒に撮影されている角錐圧子の平たん部の長さ（直径 $50 \mu\text{m}$ ）を基準として求めた。なお、光学顕微鏡を用いた場合、繊維側面の境界部分がぼやけるため誤差が生じる可能性がある。しかしながら、本研究では焦点の合わせ方及び繊維側面の境界部分の特定方法を統一することで直径の測定誤差を小さくした。数本の単繊維について本方法により測定した繊維直径と SEM によるそれと比較した結果、その差は平均で $\pm 0.17 \mu\text{m}$ であった。繊維直径を $10 \mu\text{m}$ とした場合、実験で得られる破壊荷重相当の圧縮応力に換算したときの差はおおよそ 3% となるため、本実験における直径の測定方法及び測定精度は十分であると考えられる。

3・3 FEM による繊維の応力解析

本研究で作製した単繊維の固定台では、繊維は樹脂によって固定されている。この繊維を軸方向に圧縮する場合、繊維の根元部分では応力が不均一になるため、圧縮負荷時における繊維固定部近傍の応力状態を把握する必要がある。そこで FEM により繊維上端面に均一な応力を作用させた場合の応力解析を行った。解析ソフトは MARC MENTAT を使用した。解析では、図 4 に示すように繊維長さ方向に水平な軸対象モデルを採用し、要素は 3 接点三角形要素、繊維は異方性材料とした。繊維直径は $10 \mu\text{m}$ とし、繊維長さは 5, 10, 20, 30, 40, $50 \mu\text{m}$ の 6 条件とした。なお、樹脂の寸法は繊維の圧縮に伴う樹脂形状の影響が出ないように十分に大きくした。表 2 に解析に用いた材料物性を示す。

4. 実験結果及び考察

4・1 UV リソグラフィ技術を用いた単繊維固定台の作製結果

図 5 に UV リソグラフィ技術を用いて作製した単繊維固定台の固定部近傍の SEM 写真を示す。図より、樹脂によって固定された繊維の表面には樹脂が付着しておらず、繊維と固定用の樹脂の境界は明確であることが分かる。また、図 1 に示したような繊維根元部分の樹脂の浮き上がりは見られていない。これらのことから本方法に

よって単繊維固定台の形状のばらつきをなくすことができ、樹脂の浮き上がりのない同一形状の固定台を作製することが可能であることが分かる。なお、繊維は縦方向に割れているが、これは SEM の電子線照射による熱によって観察中に生じたものである。これらのことから、本研究で提案した方法は単繊維の固定台作製において有効であることが分かる。

4・2 圧縮試験結果

図 6 に圧縮試験における荷重－変位線図の一例を示す。繊維の長さは $50\ \mu\text{m}$ である。図中の破線は圧縮負荷初期の荷重－変位線図を直線近似したものである。図より、圧縮負荷初期では荷重と変位の関係は破線で示すように直線で近似でき、その後、破線から外れる挙動を示した。

図 7 に圧縮試験中のその場観察結果を示す。図 7(a)～(d) はそれぞれ図 6 中の (a)～(d) における写真である。図 7 (a) は圧縮試験前の様子を示しており、写真中央の棒状のものは繊維である。水平の黒線は樹脂の表面であり、黒線より下側は樹脂である。図 7 (b) は圧縮負荷初期の様子であり、フラット圧子により繊維が垂直方向に圧縮されていることが分かる。この時、図 6 中の (b) に示すように、荷重－変位線図の関係においては線形の挙

Fig. 5 SEM image of the root of a fiber in the compressive specimen

Fig. 6 Typical load – displacement curve of PBO fiber obtained by direct axial compression test

(a) No loading

(b) Early stage of compressive loading

(c) Occurrence of kink band

(d) Collapse of the fiber

Fig. 7 Microscope photographs of the fiber under compressive loading obtained by in-situ observation

Fig. 8 Distribution of σ_x in the fiber of 40 μm length under compressive load

Fig. 9 Relationship between the length of high stress region and fiber length

動を示した．図 7 (c) はキックバンドが発生した時の様子を示している．この時，荷重－変位線図では図 6 中の(c)に示すように直線から外れる挙動を示す．図 7 (d) は繊維が圧壊を起こした様子を示したものであり，キックバンドの発生をきっかけに繊維が急激に圧縮破壊を起こした．なお，繊維の根元部分において繊維と樹脂の界面剥離が生じた後，キックバンドが発生したケースもあったが，この時も界面剥離を起こさなかった時と同様にキックバンドの発生と同時に荷重－変位線図の関係は非線形になった．以上のことから，PBO 繊維に関しては圧縮強度を評価する場合には，荷重－変位線図の関係が線形から外れるときの荷重値を用いればよいことが分かる．なお，本実験で使用した PBO 繊維については，圧縮荷重－変位線図における非線形点と圧縮損傷の発生が同時であったが，他の繊維に関してもあてはまるとは限らず，軸方向圧縮試験においてはその場観察により圧縮挙動を確認する必要があると考えられる．

4・3 応力解析結果

図 8 に一例として繊維長さ 40 μm での応力解析結果を示す．図のグラデーションは繊維軸方向の応力の変化を表しており，色が濃くなるに従って応力が高くなっていくことを示している．図より，繊維根元部分の表面の応力は非常に高くなっていることが分かる．そこで，本論文では，繊維上端面に作用させた応力の 110%以上の応力が作用している部分を高応力領域とし，その領域の繊維表層の軸方向長さを高応力領域長さ（図中の白矢印）と定義した．なお，繊維根元部分では樹脂固定により繊維の直径方向の変形が拘束されるためせん断応力成分も影響を受ける．そのため，せん断応力成分についても調べたが，高い応力は繊維軸方向の高応力領域内で発生していたため，本論文では繊維固定部の影響範囲が過小評価にならないように高応力領域が大きい繊維軸方向の応力により繊維固定部の影響を評価している．

図 9 に繊維長ささと高応力領域長さの関係を示す．図より，繊維長さが 20 μm 未満では繊維長さの増加に伴い高応力領域長さも増加しているが，繊維長さが 20 μm 以上になると高応力領域長さはほぼ一定値（約 7 μm ）を示している．このことから圧縮試験を行う際の繊維長さは，樹脂固定による応力集中の影響がなくなる 20 μm 以上の長さが必要であり，圧縮破壊を起こす場所が繊維の根元から約 7 μm 以上離れていれば，得られる圧縮強度の値は妥当なものであるといえる．

図 10 に圧縮試験で得られた圧縮強度をワイブル確率紙上にプロットしたものを示す．圧縮強度はキックバンドの発生荷重と実験前の繊維の直径から計算した．○は繊維の破壊（キックバンドの発生）が繊維の根元部分から 7 μm 以上離れた部分で起こったデータ，●は 7 μm 未満のデータを示している．図より，両データとも直線に近似できることから 2 母数ワイブル分布に従うことが分かる．また，7 μm 以上の位置で破壊が起こったデータの形状母数は 6.2 であり，7 μm 未満の位置で破壊が起こったデータの値（形状母数：3.4）より大きいことから，ばらつきが小さくなっていることが分かる．強度の代表値となる尺度母数については，7 μm 以上の位置で破壊が起こったデータの尺度母数は 234 MPa であり，7 μm 未満の位置で破壊が起こったデータ（尺度母数：147 MPa）はそ

Fig. 10 Influence of fracture in high stress region on the compressive strength of PBO fiber

Fig. 11 Schematic illustration of internal structure of PBO fiber

れより低い値を示した。このことから、軸方向に直接圧縮負荷を行う試験で得られた圧縮強度は、繊維固定部の影響を大きく受けることから、精度のよい圧縮強度データを取るには、圧縮試験中のその場観察を行うことによって繊維の破壊場所を特定し、樹脂による固定の影響を受けないデータを取ることが重要であると言える。また、得られた圧縮強度の平均値は 217 MPa であり、ループ試験方法や樹脂埋め込み試験方法など他の試験方法で得られている値⁽¹⁰⁾よりも低い値を示した。実験点が少ないため繊維の圧縮強度値としての信頼性は低い、他の高分子繊維においても同様の傾向を示す報告⁽¹¹⁾があることから、おおよそ妥当な値であると考えられる。

なお、本論文で行った圧縮試験では、通常はすべての試験片で繊維の根元の高応力領域において破壊が生じるはずであるが、高応力領域の外側でも試験片が破壊している。この理由については、PBO 繊維内の欠陥密度が起因していると考えられる。PBO 繊維の内部構造については著者らの一人が明らかにしており、図 11 に内部構造の簡略図を示す。なお、図は表層部付近のみを表したものである。PBO 繊維はマイクロフィブリルが繊維方向に配向した構造になっている。マイクロフィブリル同士は完全に結合しておらず、マイクロフィブリルの未結合部はマイクロボイドと呼ばれ、直径は 20~30 Å で繊維長さ方向に長く伸びている。また、繊維は完全に結晶化しているわけではなく非晶部が存在する。こうした構造を持つ繊維の破壊因子としては、マイクロボイドや非晶部等の欠陥が考えられる。PBO 繊維内部のマイクロボイドや非晶部の密度を考えると、PBO 繊維は液晶紡糸により連続的に紡糸されるため、こうした欠陥の密度は長さ方向に均一であると考えられる。著者らは、引張強度であるが、2~100 mm の間で長さの異なる PBO 繊維の引張試験を行い、強度は有効体積で近似できることを報告している⁽¹²⁾。このことはミリメートルオーダーといったマクロレベルでは破壊に寄与する欠陥の密度は長さ方向に均一であると近似できることを示すものである。しかしながら本論文においては、繊維長さは 20~50 μm 程度とミクロレベルであり、このような場合には欠陥間隔と繊維長さの差が小さく、繊維内部に存在する破壊に寄与する欠陥の密度に不均一性が現れると考えられる。キンクバンドの発生する位置は破壊に寄与する欠陥の存在する場所により決まるため、欠陥が高応力領域に存在せず固定部から 7 μm 以上離れた位置に存在する場合には本実験結果で得られたような高応力領域以外でのキンクバンドの発生が起これと考えられる。また、7 μm 以下の高応力領域で破壊が起こったデータの中に 7 μm 以上の領域で破壊した繊維よりも高い強度値を示すものがある。この理由については個々の欠陥が持つ強度のばらつきが影響していると考えられ、マクロレベルでは個々の欠陥が持つ強度を平均値で近似することができるが、ミクロレベルでは個々の欠陥が持つ強度のばらつきが大きく影響するため、このようなデータが得られるものと考えられる。なお、PBO 繊維の圧縮破壊メカニズムや上述の欠陥密度や欠陥の持つ強度のばらつきについては、現時点では実験データが少なくこれらの詳細な検討については今後の課題としたい。

5. 結 言

本研究ではUV リソグラフィを用いた単繊維固定台の作製と圧縮試験方法に関して有効かどうか検討を行った。以下、得られた結果を述べる。

- (1) 本研究で提案した方法で作製した単繊維固定台は、樹脂によって固定された繊維の表面には樹脂は付着しておらず、また、繊維根元部分の樹脂の浮き上がりは見られず、本研究で提案した方法は単繊維の固定台作製において有効である。
- (2) PBO 繊維については、圧縮荷重－変位線図における非線形点と圧縮損傷の発生が同時であり、圧縮強度はこの時の荷重から求めた強度で評価することができる。
- (3) 単繊維圧縮試験において、繊維固定部の高応力領域で破壊した繊維の圧縮強度は、それ以外の領域で破壊した繊維よりもばらつきが大きく、低い値を示した。精度のよい圧縮強度データを取るには、圧縮試験中のその場観察を行うことによって繊維の破壊場所を特定し、固定部の影響を受けないデータを取ることが重要である。

謝 辞

本研究は平成 21 年度文部科学省科学研究費補助金（若手研究(B) No.21760083）の支援により遂行された。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) 木村良晴, “超高強度繊維(新しい高分子材料: より強くより高性能に)”, 化学と教育, Vol. 46 (1998), pp. 696-700.
- (2) 松井醇一著, “炭素繊維の展開と評価方法”, 炭素材料学会編 (1989), p. 216, リアライズ社.
- (3) W. Huh, S. Kumar and W. W. Adams, “Microstructure Analysis of High Performance Fibers in Compression”, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 43 (2003), pp. 684-692.
- (4) S. Fidan, A. Palazotto, C. T. Tsai and S. Kumar, “Compressive properties of high-performance polymeric fibers”, *Composites Science and Technology*, Vol. 49 (1993), pp. 291-297.
- (5) 澤田吉裕, 濱田泰以, “複合材料の設計と評価の最前線: 2.繊維と界面の評価法”, 材料, Vol. 46 (1997), pp. 204-210.
- (6) S. R. Allen, “Tensile recoil measurement of compressive strength for polymeric high performance fibres”, *Journal of Materials Science*, Vol. 22 (1987), pp. 853-859.
- (7) A. H. Shinohara, T. Sato, F. Saito, T. Tomioka and Y. Arai, “A novel method for measuring direct compressive properties of carbon fibres using a micro-mechanical compression tester”, *Journal of Materials Science*, Vol. 28 (1993), pp. 6611-6616.
- (8) N. Oya and D. J. Johnson, “Direct measurement of longitudinal compressive strength in carbon fibres”, *Carbon*, Vol. 37 (1999), pp. 1539-1544.
- (9) 加沢エリト, 上野武司, 篠田勉, “マイクロ部品作製のための高アスペクト比リソグラフィ” 東京都立産業技術研究所研究報告, Vol. 5 (2002), pp. 37-40.
- (10) TOYOBO CO., LTD., Technical Information (Revised 2005.6), PBO Fiber ZYLON.
- (11) V. V. Kozey, H. Jiang, V. R. Mehta and S. Kumar, “Compressive behavior of materials: Part II. High performance fibers”, *Journal of Materials research*, Vol. 10 (1995), pp. 1044-1061.
- (12) 堀川教世, 野村幸弘, 北河享, 春山義夫, 境田彰芳, 今道高志, 佐々木信也, 竹川英明, “PBO 繊維の引張強度とその寸法効果”, 日本材料強度学会誌, Vol. 41, No. 3 (2007), pp. 57-65.