ポリ乳酸スクリーの力学的特性及び破壊挙動に及ぼす配向の影響

坂口雅人^{*1}, 小林訓史^{*2}

Effect of Orientation on Mechanical Properties and Destruction Behavior of Poly(lactic acid) Screws

Masato SAKAGUCHI^{*3} and Satoshi KOBAYASHI^{*3} Tokyo Metropolitan Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Minamiosawa 1-1, Hachioji, Tokyo, 192-0397 Japan

Effects of extrusion ratio (ER) and lubricant during extruding on mechanical properties and fracture behavior of poly(lactic acid) (PLA) screws were investigated in terms of shear strength and acoustic emission (AE). Self-reinforced PLA screws were manufactured from axially extruded PLA billets by forging. Shear strength for PLA screw increased by drawing. The result suggested that drawing is effective method to improve shear strength for PLA screws. This might be due to orientation of molecular chains during drawing. Shear strength did not increase linearly with ER, and shear strengths for screw extruded at low ER were slightly higher than that for screw extruded at high ER. This might be due to molecular orientations for screw extruded at high ER were lower than that for screw extruded at low ER. From AE measurement, AE event occurred in the specimens with extrusion was lower compared to that without extrusion, whereas AE energy was higher. This suggested that the number of micro-damages which occurred in extruded specimen was fewer and the size of micro-damages was larger.

Key Words : Biomaterials, Strength, Screw, Poly-L-lactide, Acoustic Emission, Molding Condition

1. 緒 言

ポリ乳酸 (PLA) は他の生分解性高分子材料と比較して高い力学的特性があり、人体に無害な乳酸に分解される。このため PLA は生体吸収性骨固定デバイスとして研究、臨床応用されてきた^(1,2)。しかし、PLA 骨固定デバイスの力学的特性は高負荷部位での固定には不十分であることが報告されている^(1,3)。PLA の力学的特性を向上させる手法として延伸による分子鎖の配向が提案されている⁽⁴⁾が、特にせん断負荷に対する延伸による強化メカニズムは解明されていない。本研究では延伸が及ぼすせん断強度への影響と強化メカニズムを解明するために、PLA スクリューの力学的特性及び破壊挙動に及ぼす配向の影響を調査した。延伸条件を変化させて延伸を施した PLA ビレットをスクリーに成形し、せん断強度及び試験時に発生する Acoustic Emission を測定した。

2. 実験方法

2・1 試験片の成形 本研究では重量平均分子量 95,000、融点 169 °C、ガラス転移温度 73 °C の PLA ペレットからスクリーを成形した。スクリーの寸法は M6、ネジ部長さ約 30 mm の並目ネジで

ある。スクリーの成形は次のような工程で行われた。最初にペレットを金型に入れ、200 °C で 20 分間加熱し、10 MPa の圧力でコールドプレスを行うことにより円筒形ビレットを成形した。このビレットを押出延伸用の金型とホットプレスを使用して 105 °C で 10 分間加熱した後、荷重を加えて押出すことにより延伸を行った。延伸されたビレットには鍛造によりネジ山が成形された。鍛造ではスクリー用金型にビレットをセットし、120 °C で 10 分間加熱した後、200 kN の押切荷重でコールドプレスを行った。その後、鍛造により発生するバリをダイスによって取除くことによって仕上げられた。本研究は延伸条件として延伸前後の試験片の断面積の比で定義される延伸比と潤滑の有無を変化させて延伸を行った。延伸比は 1, 1.3, 2, 4, 8。潤滑剤はポリエチレングリコールを使用した。

2・2 せん断試験 スクリューのせん断試験は小林⁽⁵⁾と同じ方法で行った。せん断試験はスクリーによって結合された治具を島津製作所製、万能試験機 (AGS-1000A) を用いてクロスヘッドスピード 0.5

^{*1} 学生員, 首都大学東京 理工学研究科 機械工学専攻^{*2} 正員, 首都大学東京 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: koba@tmu.ac.jp

mm/min で圧縮することにより行われた。測定した最大荷重から以下の式でせん断強度 S_s を算出した。 F_{max} は最大荷重、 A はスクリューの有効断面積 (22.5 mm^2) である。

$$S_s = F_{max} / 2A \quad (1)$$

せん断試験中の試験片から発生する Acoustic Emission (AE) を測定した。測定にはエヌエフ回路設計ブロック製の AE センサー (AE-900M Type1) を使用した。測定条件はメインアンプのゲイン 30 dB, ディスクリローレベル 250 mV, ディスクリハイレベル 375 mV に設定した。

3. 実験結果及び考察

延伸比及び潤滑の有無を変化させて延伸されたスクリューのせん断強度を Fig. 1 に示す。潤滑の有無にかかわらず、せん断強度は延伸比 1 と 1.3 以上を比較すると延伸によって増加した。これは延伸による分子鎖の配向によってスクリューのせん断強度が向上することを示唆している。延伸比で比較すると、せん断強度は延伸比に比例しておらず、延伸比 4, 8 よりも延伸比 1.3, 2 の方がわずかにせん断強度は高い。これよりせん断強度は延伸比に比例しないことが示された。これは押出法では延伸比が低い方がより強く配向するためと考えられる。

Fig. 2 と 3 に延伸比 1 と 1.3, 潤滑無で延伸されたスクリューのせん断試験におけるせん断応力、累積 AE エネルギー、累積 AE イベントと試験時間の関係を示す。延伸の有無にかかわらず、応力 - 試験時間の傾きは約 40 MPa 以上で減少し、ほぼ同時に AE の発生が見られた。これより、この点における微小き裂やクレイズのような微小欠陥の発生が示唆される。AE は応力の最大値まで増加し続け、微小欠陥の発生と進展を示唆した。延伸の有無で AE の発生挙動を比較すると、延伸された試験片で発生した AE イベントは延伸比 1 よりも少なく、一方で AE エネルギーは高い点が挙げられる。これは延伸した試験片で発生する微小欠陥の数は少ないが、微小欠陥のサイズが大きいことを示唆している。

4. 結 言

本研究では PLA スクリューの力学的特性及び破壊挙動に及ぼす配向の影響を調査するために、延伸比と潤滑条件を変化させて延伸を施したスクリューのせん断強度及び AE の発生挙動を測定した。その結果、せん断強度は延伸によって向上することが示唆された。これは延伸が PLA スクリューのせん断強度を向上させるのに有効な手段であることを示唆している。延伸による AE の発生挙動を比較すると、延伸を施すことによって発生する

微小欠陥の数は減少するが、微小欠陥のサイズは大きくなることを示唆された。

Fig. 1 Shear strength for screws as a function of extrusion ratio

Fig. 2 Relationship between shear stress, cumulative AE energy, event and testing time at extrusion ratio 1 without lubricant

Fig. 3 Relationship between shear stress, cumulative AE energy, event and testing time at extrusion ratio 1.3 without lubricant

文 献

- (1) Manninen, M.J., Self-reinforced poly-L-lactide screws in the fixation of cortical bone osteotomies in rabbits, *Journal of Materials Science. Materials in Medicine*, Vol. 4 (1993), pp. 179-185.
- (2) Bostman, O., Hirvensalo, E., Makinen, J., Rokkanen, P., Foreign-body reactions to fracture fixation implants of biodegradable synthetic polymers, *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, Vol. 72 (1990), pp. 592-596.
- (3) Shetty, V., Caputo, A. A., Kelso, I., Torsion-axial force characteristics of SR-PLLA screws, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, Vol. 25 (1997), pp. 19-23.
- (4) Fengzhe, J., Moon, S. I., Sadami, T., Hyon, S. H., Hydrostatic Extrusion of Poly(L-Lactide), *Macromolecular Symposia*, Vol. 224 (2005), pp. 93-104.
- (5) Satoshi, K., Processing and characterization of forged poly(lactic acid) screw, *Materials system*, Vol. 29 (2011), pp. 93-99 (in Japanese).