

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	産業応用に向けた3Dプリンタ製機構部品 第10報: 簡易クリープ試験法の提案とチタン酸カリウム繊維強化樹脂のクリープ試験
Title(English)	3D Printed Mechanical Parts for Industrial Applications Report 10: Proposal of a Simplified Creep Test Method and Creep Test of Potassium Titanate Fiber-Reinforced Plastic Beam
著者(和文)	金井規聡, 塚本悠太, 遠藤玄
Authors(English)	Norisato KANAI, Yuta TSUKAMOTO, Gen ENDO
出典(和文)	第25回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2024, 12
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2024 The Society of Instrument and Control Engineers

産業応用に向けた 3D プリンタ製機構部品

第 10 報：簡易クリープ試験法の提案とチタン酸カリウム繊維強化樹脂のクリープ試験

○金井 規聡 (東京科学大学), 塚本 悠太 (東京科学大学), 遠藤 玄 (東京科学大学)

3D Printed Mechanical Parts for Industrial Applications Report 10: Proposal of a Simplified Creep Test Method

and Creep Test of Potassium Titanate Fiber-Reinforced Plastic Beam

○ Norisato KANAI (Science Tokyo), Yuta TSUKAMOTO (Science Tokyo), and Gen ENDO (Science Tokyo)

Abstract: This paper proposes a simplified creep test method to evaluate the creep properties of 3D-printed mechanical parts for industrial applications, focusing on potassium titanate fiber-reinforced plastic (POTICON filament). The proposed method enables effective and efficient evaluation of creep properties without the need for large-scale and expensive testing equipment. When fabricated at 100% infill rate, the creep deformation remained in the order of 10^{-1} mm over two months, indicating excellent creep resistance. In contrast, at a 37% infill rate, the deformation reached the order of several millimeters, making it unsuitable for robot applications. Although the insertion of stainless steel pipes showed a reduction in deformation even at low infill rates, no significant advantage was observed compared to 100% infill in this experiment conditions.

1. 緒言

近年、3D プリンタの普及は著しい。3D プリンタには、樹脂を扱う熱溶解積層方式 (fused filament fabrication, FFF) (fused deposition modeling, FDM), 光造形法 (stereolithography, SLA), 材料噴射法 (material jetting), 結合剤噴射法 (binder jetting) など、様々な種類が存在する¹⁾。金属材料を用いるものとしては、レーザー溶融法 (selective laser melting, SLM) などが挙げられる²⁾。FFF は、熱可塑性のフィラメント材料を熱で溶かし、押し出すことで造形を行う方法である。材料調達の容易さやコストの低さから、現在最も広く利用される方式である。

3D プリント技術の大きな利点は、従来の加工技術では実現困難な複雑な形状を容易に生成できる点にある。また、材料の使用量に制約が少ない点も特徴的である。このような特徴により、食品、車両、航空宇宙産業など、多岐にわたる分野での応用が進んでいる³⁾。

産業用ロボットにおいて、従来部品を 3D プリント技術を用いた樹脂製部品に置き換えることは、軽量化、コスト削減、および性能向上の観点から非常に有望である。しかし、ロボットの運用環境下における継続的な荷重が樹脂部品にクリープ変形を引き起こし得るため、その適用に際しては耐クリープ性の検討が必要不可欠である。特にロボットアームのクリープ変形は、マニピュレータの関節間の相対位置を変化させ、エンドエフェクタの位置制御精度に悪影響を及ぼす可能性がある。従って、ロボットの構成部品として樹脂材料を使用する際には、クリープ挙動の定量的評価が求められる。一般的に、クリープ試験は大型の専用設備を要し、準備および試験自体に多大な時間と労力を必要とする。これまで、片持ち梁における集中荷重条件下での繊維強化樹脂材料のクリープ変形挙動の計測が実施されてきた⁴⁾⁵⁾。このような試験を通じてクリープ特性を詳細に評価することは重要であるが、特に初期段階の材料選定や特性評価においては、より簡便かつ多試験片を同時に測定可能な方法が求められる。簡易試験装置を用いて複数の試験片のクリープ特性を同時に評価することが可能であれば、試験の効率化と信頼性の向上が期待される。

さらに、樹脂部品の強度および耐クリープ性を向上させる方法の一つとして、試験片内部にステンレスパイプを埋め込む手法が提案されている⁶⁾。この手法は、3 点曲げ試験においては予想された強度向上を示さなかったが、耐クリープ性に関しては未検証である。本研究では、ステンレスパイプを樹脂試験片に挿入することによるクリープ抑制効果を検証する。

以上を踏まえ、本研究の目的は以下の 2 点である：

1. 提案する簡易試験方法を用いて、樹脂材料のクリープ特性を効率的に把握できることを示す。
2. ステンレスパイプの挿入によるクリープ抑制効果の有無を明らかにする。

2. 簡易クリープ試験法の提案と試験手法

本研究で提案する簡易クリープ試験機の構成を Fig. 1 に示す。試験機は、Jig が装着されたテーブルにサポートを取り付けることで安定化されており、各 Jig に Fig. 2 に示すような試験片を挿入する構造となっている。Jig と試験片の隙間にはシムプレートを挿入し、試験片の根本が確実に固定されるように調整する。試験片の断面形状は $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ の正方形で、先端にはおもりを取り付けるためのくぼみが設けられている。Jig に挿入される試験片部分の長さは 19 mm 、Jig からくぼみまでの距離は 150 mm であり、 235 g のおもりが取り付けられた化学繊維ロープをこのくぼみに掛けることで、試験片に持続的な荷重を加える。最大曲げ応力は 2.1 MPa に設定しており、これは関口らの研究⁴⁾⁵⁾における条件と同等の値である。本試験機は、ロボットアームなどの大型部品のクリープ特性を把握するために、最大曲げ応力を同一に再現した小型試験片を用いることで、クリープ挙動の予測を可能にすることを目的としている。試験片は合計 7 本用意し、試験片番号 1~6 はハイトゲージを用いて、試験片番号 7 はレーザ変位計 (キーエンス社製：LK-G5000) を用いて変形量を計測した。ハイトゲージの基準点はテーブルサポートに接触させて設定し、計測位置の一貫性を確保した。実験環境の制約により、ハイトゲージの計測位置は試験片の根本から 107.5 mm 、レーザ変位計の計測位置は 71.0 mm であった。このため、試験片番号 7 については

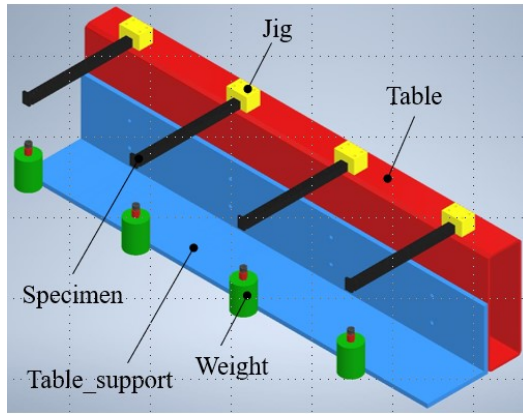


Fig. 1 Creep test equipment

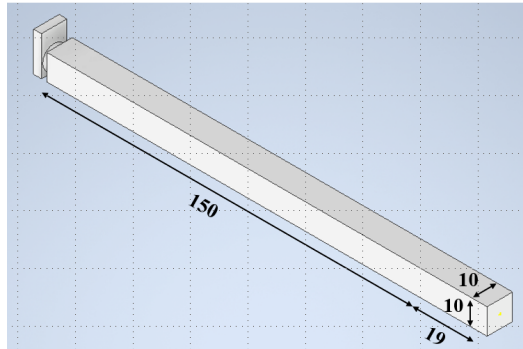


Fig. 2 Creep test specimen

クリープ変形量を補間し、試験片番号 1-6 の測定位置に合わせた。測定は、初期状態 (0 日) から開始し、その後 1 日, 3 日, 1 週間, 2 週間, 4 週間, 8 週間... と定期的実施した。

ここで、クリープ変形量の補間方法を説明する。一端固定の片持ち梁に端点集中荷重が作用する場合、固定端からの位置 x におけるたわみ $\delta(x)$ は以下の式で与えられる。

$$\delta(x) = \frac{Px^2}{6EI} (3L - x) \quad (1)$$

P は荷重, E はヤング率, I は断面二次モーメントである。(1) より、任意の位置 x_1, x_2 でのたわみの比は以下のように計算できる。

$$\frac{\delta(x_1)}{\delta(x_2)} = \frac{x_1^2 (3L - x_1)}{x_2^2 (3L - x_2)} \quad (2)$$

ここで、 L は梁の長さ (=150mm) である。 $x_1 = 71.0\text{mm}$, $x_2 = 107.5\text{mm}$ を (2) に代入し、計算すると $\frac{\delta(x_1)}{\delta(x_2)} \approx 0.4826$ となるため、試験片番号 7 の試験片については、計測値に 0.4826 を除算し、補正を行った。

今回使用した材料は、チタン酸カリウム繊維強化樹脂 (POTICON NTL34M, 大塚化学) である。NTL34M は、バイオベースの PA 樹脂 (ナイロン樹脂) にチタン酸カリウム繊維が 20w% 配合されている。耐衝撃性や耐摩耗性に優れており、実際にトコロイド減速機⁷⁾ や四足歩行ロボット (TITAN-EI⁸⁾) 等の適用例がある。POTICON フィラメント (以降 POTICON と略す) の物性⁹⁾ を Table 1 に示す。

Table 1 Physical properties of POTICON

Physical properties	Physical property value	
Glass transition temperature [°C]	60	
Density [g/cm ³]	1.27	
Laminating direction	X-Y	Z-X
Tensile strength [MPa]	114	68
Tensile elongation [%]	4.1	4.8
Tensile modulus [GPa]	5.6	2.7
Bending strength [MPa]	199	107
Bending modulus [GPa]	7.0	2.8

Table 2 Laminating parameters

Parameters	Value
Nozzle Diameter [mm]	0.4
Pitch [mm]	0.1
Number of shells	3
Extrusion width [mm]	0.42
Nozzle temperature [°C]	270
Platform temperature [°C]	60

造形条件を Table 2 に示す。3D プリンタは G-ZERO (グーテンベルク社製)、スライサソフトは PrusaSlicer (PRUSA RESEARCH 社製) を使用した。造形方向は X-Y とした。

3. 試験結果

3.1 異なる充填率での比較

まず、充填率 100% で造形した場合のクリープ試験の結果を Fig. 3 に、充填率 37% で造形した場合の結果を Fig. 4 に示す。

充填率 100% の条件下において、最小変位は 0.063 mm, 最大変位は 0.61 mm, 平均変位は 0.28 mm であった。レーザ変位計を用いた試験片 7 の変形量が最も小さかったが、この結果は試験片 1~6 と異なる測定方法が影響したものと考えられる。試験片 1~6 ではハイトゲージを用いて測定を行ったが、測定時にハイトゲージを試験片に接触させる際、試験片に力が加わらないよう調整することは容易ではない。そのため、微小な変形量においては、このような測定誤差が結果に影響を与えた可能性がある。いずれの場合も変位量は小さく、精密な制御を要しないロボット用途においては、クリープ変形の影響は極めて限定的であるといえる。

充填率 37% の場合、最小変位は 2.54 mm, 最大変位は 4.02 mm であり、平均変位は 3.25 mm であった。測定開始から約 1 ヶ月で試験片に目視できる歪みが生じ、約 2 ヶ月で変形が安定した。しかし、いずれの試験片も変位量は数 mm オーダーに達しており、この程度の充填率で試験片を使用する場合には、クリープ変形を考慮した設計が必要であると考えられる。

結果として、クリープ変形が微小である場合、人間の手による測定時の影響が顕著になることがあるため、レーザ変位計を用いることが最適である。しかし、Fig. 4 に示すように、変形量が大きい場合には、ハイト

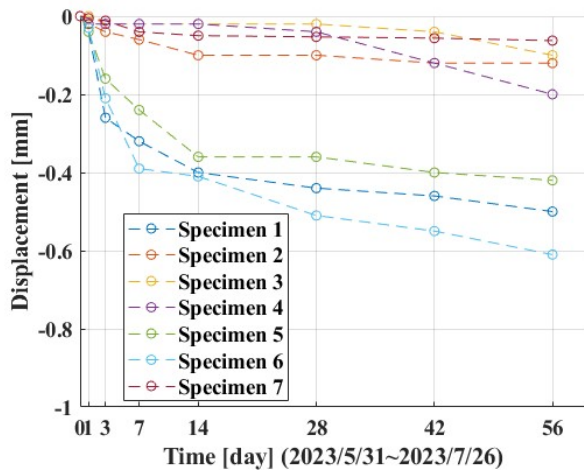


Fig. 3 Creep test results (100% fill rate)

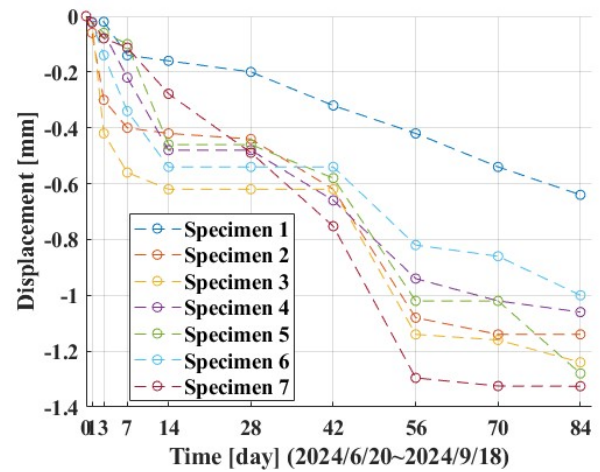


Fig. 5 Creep test results (37% fill rate, pipe insertion)

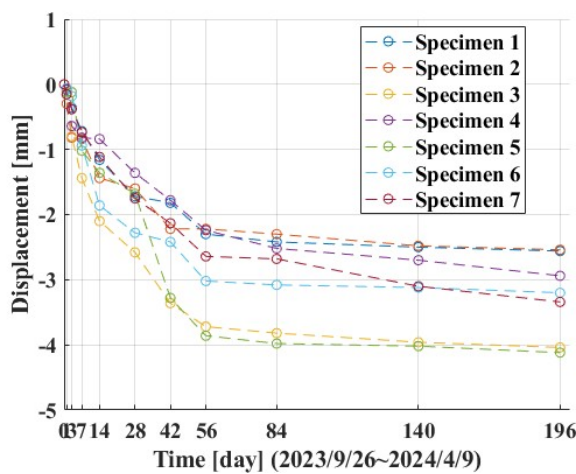


Fig. 4 Creep test results (37% fill rate)

ゲージによる簡易な測定でも十分にクリープ特性を把握できることが確認された。

3.2 ステンレスパイプを挿入した場合

次に、Fig. 2 の試験片中央に $\phi 5$ の穴を開けたものを造形し、外径 5 mm、内径 3 mm のステンレスパイプを挿入した後、クリープ試験を実施した。充填率は 37% である。結果を Fig. 5 に示す。

結果として、最小変位は 0.64 mm、最大変位は 1.33 mm、平均変位は 1.10 mm であった。充填率 37% の場合と比較すると変形量は大幅に抑えられたものの、充填率 100% の場合と比較すると変形量は依然として大きく、mm オーダーの変位が観測されたため、期待していたクリープ抑制効果は得られなかった。この要因として、ステンレスパイプの挿入によって試験片の自重による影響が増大したことや、試験片の根元での固定が不完全であったことが挙げられる。さらに、試験が夏季に行われたため、湿度の影響による試験片の性能低下も考えられる。また、試験片 1 は他の試験片と異なる挙動を示した。試験片が 1 本のみでこのような挙動が観測された場合、全体のクリープ特性として誤って評価してしまう恐れがある。しかし、本研究で提案した試験方法では、そのようなデータを外れ値として扱い、正確なクリープ特性を把握できるため、この方法の大きな利点であるといえる。

Table 3 に、本研究で得られた結果をまとめる。

Table 3 Creep test results

	Infill 100%	Infill 37%	Infill 37% (Pipe)
Period	May-Jul.	Sept.-Apr.	Jun.-Sept.
Mass [g]	20.88	10.39	26.21
Displacement			
Min [mm]	0.063	2.54	0.64
Max [mm]	0.61	4.02	1.33
Mean [mm]	0.28	3.25	1.10

4. 結言

- 提案した試験方法を用いることで、材料のクリープ特性を評価することができた。本研究で使用したチタン酸カリウム繊維配合樹脂 (POTICON) の場合、充填率 100% で造形した試験片では、2 ヶ月間でクリープ変形量が 10^{-1} mm オーダーにとどまり、特にレーザー変位計で測定した試験片においては 10^{-2} mm オーダーの変形量であった。いずれの場合も変形量は極めて小さく、優れた耐クリープ性が確認された。一方、充填率 37% で造形した試験片では数 mm オーダーの変形が発生し、ロボット用途への適用を考慮すると、無視できない変形量であることが示された。
- ステンレスパイプを挿入することで、樹脂の充填率が低い場合でもクリープ変形量を抑制できることが確認された。しかし、充填率 100% で造形した場合と比較して顕著な優位性は見られなかった。
- ハイトゲージを用いた測定でも、材料のクリープ特性を十分に把握できることが確認された。大規模な設備を必要とせず、簡易な試験によって多くの試験片で効率的に評価を行うことが可能であった。一方で、試験片端部の固定が不完全であった点や、微小なクリープ変位の測定がハイトゲージでは困難である点など、いくつかの課題も見出されたため、さらなる改善の余地があると考えられる。

謝辞

本稿執筆にあたり，大塚化学株式会社の材料や情報のご提供，ならびにご助言，株式会社グーテンベルクの3Dプリントに関するご協力やご助言を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- [1] L. T. C. Shahrubudin Nurhalida and R. R.J.P.M. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing* 35, pp. 1286–1296, (2019).
- [2] E. P. A. e. a. Calignano Flaviana Diego Manfredi. Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE* 105.4, pp. 593–612, (2017).
- [3] H. M. a. e. AHN Jinsung Murakami Kenichi. Dynamic compensation system development for advanced 3D printing and its evaluation. *Transactions of the JSME (in Japanese)* 89, (2023). doi: 10.1299/transjsme.23-00191.
- [4] N. H. Tsukamoto Yuta Sekiguchi Kenji and E. Gen. Measurement of Creep Deformation of Resin Structural Parts for a Lightweight Industrial Robot. *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. (2024), pp. 592–597.
- [5] H. N. Kenji Sekiguchi Yuta Tsukamoto and G. Endo. Measurement of Creep Deformation of Fiber-Reinforced Plastic Materials for Application to Industrial Robots. *ROBOMECH2024* 89, 1P1–P04, (2024).
- [6] O. Kurumi and E. Gen. Does Thin-Walled Metal Pipe Insertion Increase the Bending Strength of 3D Printed Parts? *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. IEEE. (2024), pp. 585–591.
- [7] G. E. Akifumi Okubo Hiroyuki Nabae. Mechanical Parts Manufactured by a 3D Printer for Industrial Robot -Part5: Durability Test of a Plastic Trochoidal Gear Reducer-. *ROBOMECH2023*, 1A2–I20, (2023).
- [8] K. S. Shuhei Tsunoda Hiroyuki Nabae and G. Endo. Development of Quadruped Robot TITAN-E1 Using Plastic Structural Parts Printed by Fused Deposition Modeling. *ROBOMECH2022*, 2A1–Q07, (2022).
- [9] G. Wiki. POTICON Filament TDS. Accessed on 27.07.2024. (2024). URL: <https://docs.gutenberg.co.jp/downloads/technical-data-sheet>.