

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	繰り返し荷重に対する樹脂材支圧接合部の耐久性評価
Title(English)	Evaluation of Durability of Bearing Type Structural Joints of Plastic Parts against Cyclic Loading
著者(和文)	山本快, 兼清真人, 遠藤玄
Authors(English)	Kai Yamamoto, Masahito Kanekiyo, Gen Endo
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2025講演論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 6

繰り返し荷重に対する樹脂材支圧接合部の耐久性評価

Evaluation of Durability of Bearing Type Structural Joints of Plastic Parts against Cyclic Loading

○学 山本 快 (東京科学大) 兼清真人 (東京科学大) 正 遠藤 玄 (東京科学大)

Kai YAMAMOTO, Institute of Science Tokyo, yamamoto.k.by@m.titech.ac.jp

Masahito KANEKIYO, Institute of Science Tokyo

Gen ENDO, Institute of Science Tokyo

In order to reduce the weight of industrial robots, we are considering to use plastic materials as structural parts. In this research, the durability of the bearing joint was evaluated by fixing a specimen of plastic material that was fastened with the metal flange of an actuator and repeatedly applying torque to the actuator. For the cyclic loading test, nylon reinforced by short carbon fiber (Onyx) and Onyx which is combined with continuous carbon fiber (Onyx+CF) were used as the specimen materials. The number of bolts was tested under two different conditions: two bolts and four bolts. As a result, the materials withstand more than 400,000 cycles of load for four times the rated torque.

Key Words: Industrial Robot, 3D Printing, Cyclic Loading Test

1 緒言

現代の産業において、産業用ロボットは製品の組み立てや運搬など重要な役割を担っている。精度や耐久性が求められるため、産業用ロボットの主要構造材には高剛性の金属が使われてきた。しかし、金属のような密度の大きい材料を用いると、消費エネルギーも大きくなってしまふ。産業用ロボットの消費エネルギーを低減する方法として、構造部品の軽量化があげられる。当研究室では、ロボットの構造部品として軽量樹脂材料の適用を検討している。樹脂材は金属よりも軽量であるが、低剛性の材料であるため、産業用ロボットへの適用可能性については明確でない。

これまでに、産業用ロボットに樹脂材を適用させることを目的とした研究が行われてきた。武居らは、1軸のアクチュエータに異なる材質のリンク材を固定し、先端に荷重をかけた際の変形量を測定することで、樹脂材の剛性を評価した [3]。塚本ら、関口らは治具に異なる材質のリンク材を固定し、先端におもりを設置して約2ヶ月間放置し、樹脂材のクリープ変形量を計測した [5][7]。高木らは、アクチュエータに異なる材質のリンク材を固定して先端におもりを設置し、リンク材が一定の速度で回転したのち停止するようアクチュエータに指令を与えることで、リンク材に振動を与えた。その際の先端の変位を計測することで、樹脂材の減衰特性を調査した [6]。

本稿で取り扱う接合法に関する先行研究として、塚本らは、樹脂材料と金属部品との締結方法を提案した [2]。通常のねじ締結では、摩擦接合が用いられる。ねじを締め付ける際に、らせん溝によって被締結部品は圧縮力を受ける。そのため、せん断方向に荷重がかかった場合、図1上部のように被締結部品どうしに摩擦力が生じることで、接合を維持できる。しかし、樹脂のような剛性の低い材料では圧縮力により変形し、軸力が抜けて摩擦力が減ることにより締結力が低下するという課題が存在する。一方で、支圧接合とよばれる接合方法がある。支圧接合において、被締結部品は通常のボルトによって拘束されている。せん断方向に荷重が加わると、図1下部のようにボルトの側面と被締結部品が触れることによってボルトがせん断力を受けることで、接合を維持できる。図2に示すように、ボルトと同軸に金属の薄肉円筒を挿入することで、ボルト軸力を金属薄肉円筒で支えることで支圧接合する手法を提案した [2]。また塚本らは、この締結法を用いて治具に異なる材質のリンク材を固定し、先端に荷重をかけて変形量を測定することで、樹脂材の剛性を評価した。その結果、肉厚1.0 mmより厚みのある薄肉円筒を用いることで、樹脂の試験片の変形が抑制され、許容連続トルクに十分耐えることが可能な締結を実現できることが示された [2]。岡本らは、樹脂材と金属部品の締結部として想定された試験片の穴にピンを挿入し、試験片に

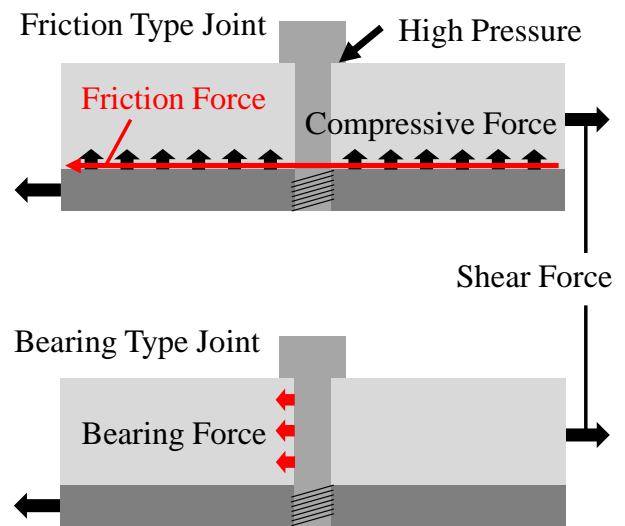


Fig.1 Fastening method of screw fastening [2].

荷重をかけることで樹脂材に面圧をかけ、変形量を評価した [4]。

塚本らの先行研究においては1回の荷重のみで試験を行っており、繰り返し動作することが求められる産業用ロボットでの使用条件とは隔たりがある。締結部に動的な荷重を加える研究については先例が存在し、Ahmetらは、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のねじ接合部に対して動的な衝撃荷重を加え、接合部の破壊を調査した [1]。しかし、樹脂材の締結部が破壊に至るまでの繰り返し荷重の回数を評価する研究はなされていない。

ロボットの設計を行う上では、繰り返し荷重をかけるにつれどのように樹脂材の変形量が進展するかを明らかにすることが必要である。そこで、本研究では、樹脂材アームに繰り返し荷重をかけることで樹脂材の変形量の推移を調査し、締結部の耐久性を定量的に明らかにすることを目的とする。特にロボットとしての運用を想定し、アクチュエータからの回転駆動をリンク構造材に伝達する場合を対象とする。

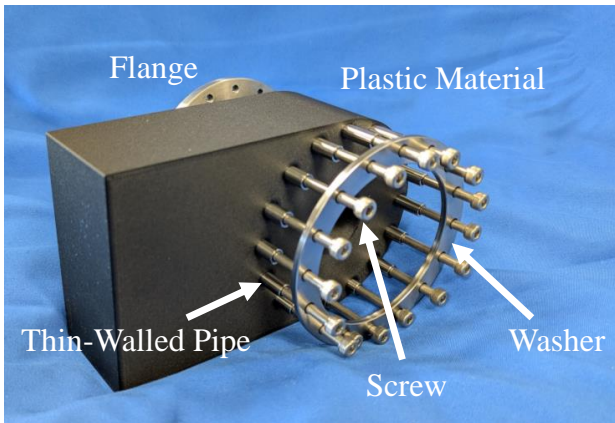


Fig.2 Proposed fastening method by Tsukamoto[2].

2 繰り返しトルク負荷実験

本研究では、産業用ロボットとして最大リーチ 1000 mm, 可搬質量 15 kg を想定した樹脂製ロボットアームを対象とし, 樹脂材締結部の耐久性評価を行う。塚本らは, このアームのアクチュエータとして 207 W の定格出力を持つ AC サーボモータ (SHA25M101SG, ハーモニック・ドライブ・システムズ) を選定した [2]。アクチュエータの出力フランジに試験片を締結するため, 耐久試験に用いる締結部の寸法を図 3 のように定めた。試験片の厚みは 45 mm である。16 等配で円形状に穴が配置され, ここに肉厚 1 mm の薄肉円筒と M4 のねじを挿入する。この場合, 試験片の穴の側面と薄肉円筒の側面が接触することにより締結が実現できる [2]。この側面に荷重が作用すると, 樹脂材の弾性により穴が変形する。また, 繰り返し荷重がかかると, 試験片が塑性変形し, 穴が拡大することが予想される。この試験片に中心軸周りに繰り返しトルクを負荷し, 試験片にどのような角度変位が発生するかを計測する。

2.1 実験方法

試験片の造形に用いたフィラメントは, ナイロン樹脂をカーボン短繊維で強化したカーボン短繊維強化ナイロン (Onyx, Markforged) (以降 Onyx と表記) である。また, 造形の際にカーボン長繊維を同時に造形 (以降 Onyx+CF と表記) することにより, さらに強度を上げることが可能である。これら 2 種類の材料の試験片を用いて試験を行う。造形に用いた 3D プリンタは Markforged 社の Onyx One, Mark Two, および X7 であり, スライスソフトは Markforged 社の Eiger である。試験片の内部の構造を図 4 に示す。試験片の上下面は充填率 100% となっており (以降ソリッドレイヤと表記), その間は側面 (以降ウォールレイヤと表記) を除いて三角形の形状, 充填率 37% で充填されている (以降メインレイヤと表記)。1 層の厚みは 0.125 mm であり, 上下面のソリッドレイヤは 4 層, ウォールレイヤは 2 層とした。カーボン長繊維で強化する場合, ソリッドレイヤとメインレイヤの間に 4 層のカーボン長繊維の層が配置される。

実験装置を図 5 に示す。試験片の締結部をアクチュエータのフランジに締結し, 締結部まわりの回転運動を拘束するようにアルミ製のフレーム材で固定した。肉厚 1 mm の SUS304 の薄肉円筒と M4 ねじを使用し, 本来ならば 16 個の締結部すべてを利用するべきであるが, 実験を加速するため敢えて定格トルクの 8 倍, または 4 倍の応力が働くよう締結箇所を 2 箇所, 4 箇所へ減らしている。この条件下で, アクチュエータから図 6 に示す, アクチュエータの定格トルクを片振幅とする三角波の往復トルクを出力することで, 試験片の穴の側面に繰り返し圧縮力が負荷される。往復トルクの 1 周期を 1 秒とした。このときのアクチュエータの角変位を計測し, 試験片の変形を調査した。アクチュエータには対応するサーボンプ (MR-J4-60B-S033, 三菱電機) を接続し, Programmable Logic Controller (FX5-40SSC-S, 三菱電機) を使用してサーボンプにトルク指令を出力した。アクチュエータの角変位はサーボンプを PC に接続し, 三菱電機社製ソ

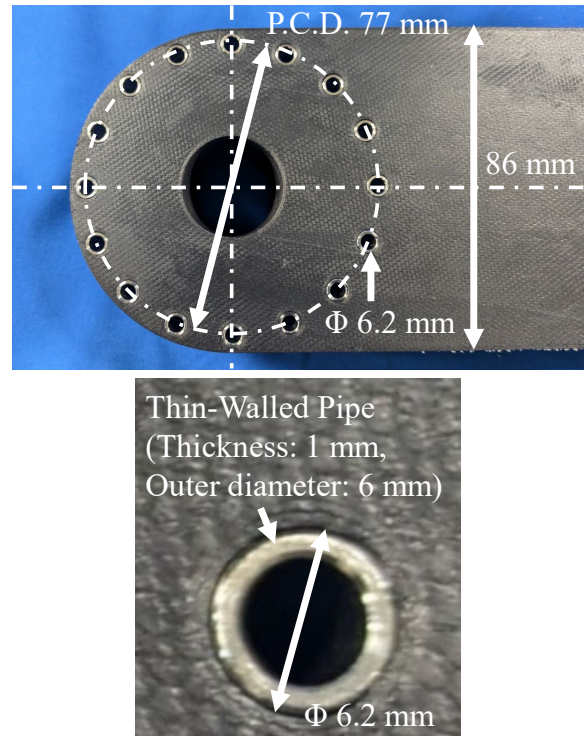


Fig.3 Dimension of the fastening part.

(1 Layer: 0.125 mm)

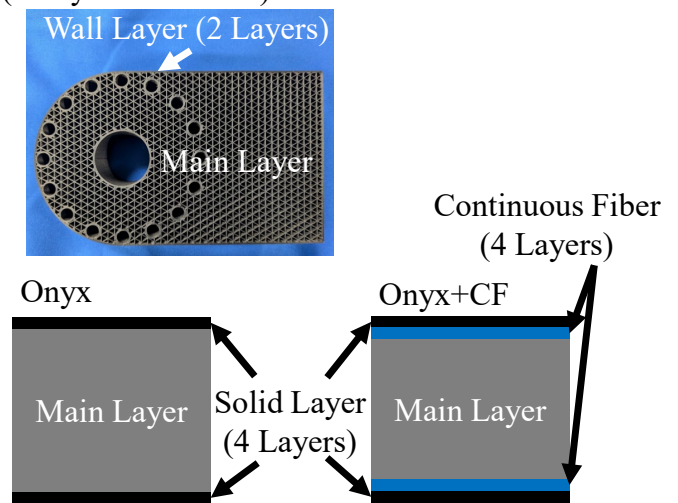


Fig.4 Structure of the 3D printed parts.

フトウェアの MR Configurator2 を用いて計測した。また, MR Configurator2 が同時に取得できるデータ数の関係で, 2000 回の往復トルクを 1 セットとした。2000 回の往復トルクをかけるには約 33 分を要し, データ保存の時間も含めると 1 セットは 35 分を要した。ただし, 実験上の都合により 35 分以上の時間が空いた部分も存在する。アクチュエータの角変位の計測は, 各セットの最初の約 1000 往復のみ行った。これを 1 日で 20 セット行い, 数日間かけて実験を行った。

実験でねじが破断しなかった場合, 実験後にねじを緩めるときのトルクを計測した。また, 試験片が破壊していることが明らかでない場合, 図 7 に示すように顕微鏡で各穴を観察し, 2 方向の

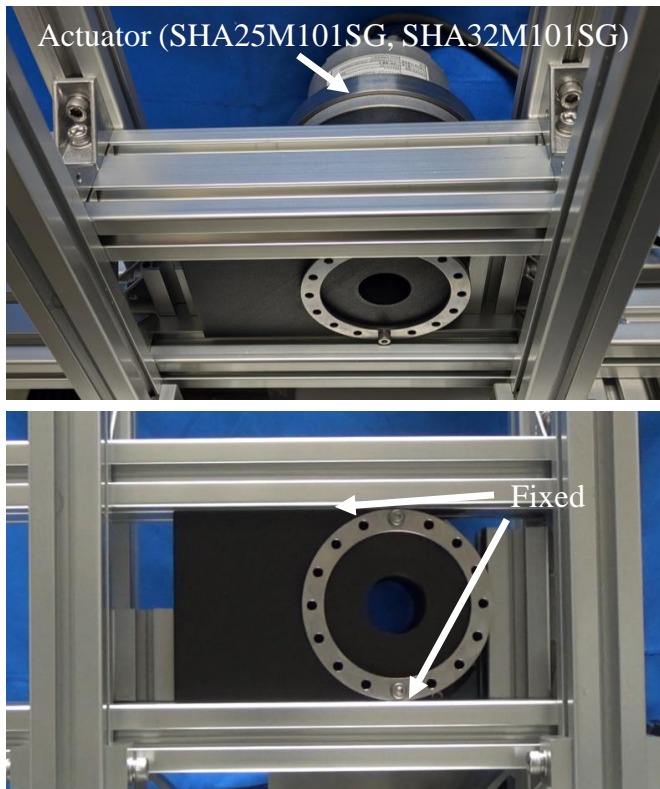


Fig.5 Experimental setup for repeated loading test.

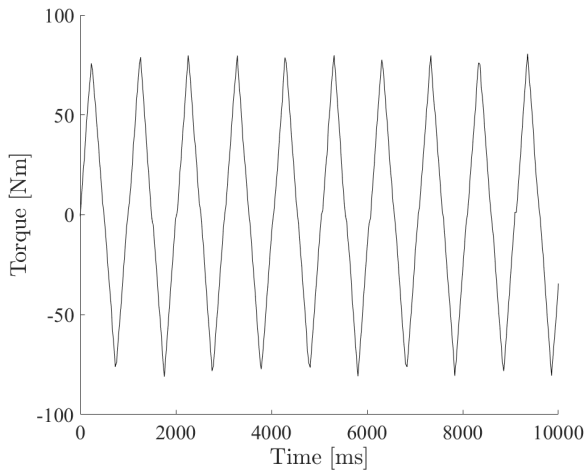


Fig.6 Output torque of the actuator.

径を計測した。往復トルクにより穴が変形し、荷重の方向が長径となっている楕円形状になると予想される。

2.2 締結部に作用する応力の導出

試験片に加わる応力を考える。アクチュエータが出力するトルクを T 、ねじの本数を n 、締結部の穴の直径を d_H 、穴の P.C.D. を d_P 、試験片の厚みを b としたとき、締結部にかかる平均応力 σ は式 (1) のように表される。

$$\sigma = \frac{2T}{nd_P b d_H} \quad (1)$$

よって、定格トルクが作用したときの平均応力は表 1 のよう

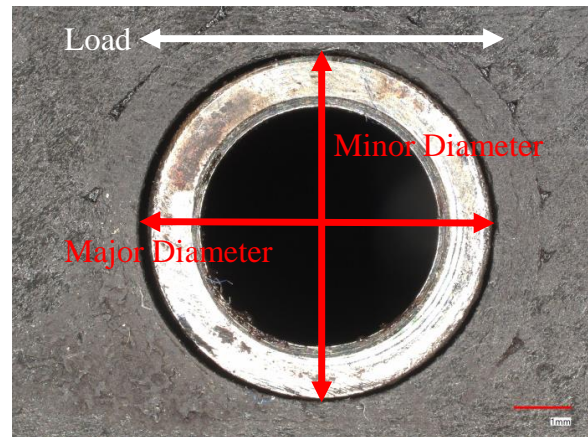


Fig.7 View of the hole of the specimen by microscope.

Table 1 Average stress applied on the specimen when the torque of the actuator is at rated torque.

Number of screws	Average stress at the rated torque
	[MPa]
2	3.77
4	1.89

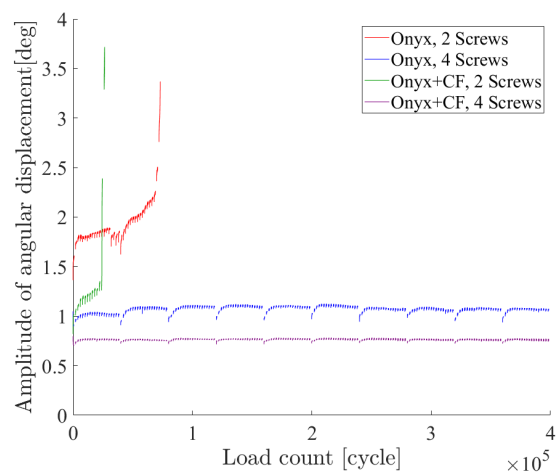


Fig.8 Amplitude of the angular displacement of the actuator.

に計算できる。

3 実験結果

最大 40 万回の往復トルクをかけたときの荷重回数と角変位の振幅の関係を図 8 に示す。いずれの試験片においても各セット間で時間が空いており、この間に振幅が減少するという現象がみられた。しかし、荷重を加えるにつれ前のセットの振幅に収束した。Onyx の試験片で 2 個の締結部を使用した場合 (図 8 中赤線) は初期の振幅が 1.5° で、1.8° 付近まで増加したのちしばらく緩やかに増加した。一方、Onyx+CF の試験片で 2 個の締結

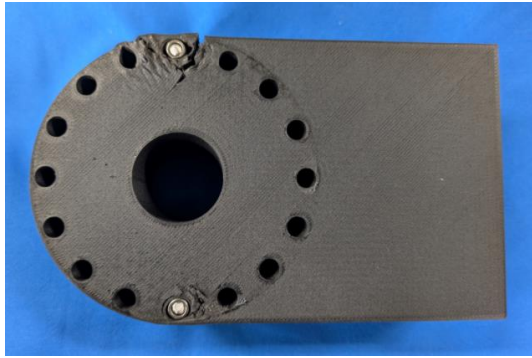


Fig.9 Specimen of Onyx after repeated loading test with 2 screws.

部を使用した場合（図 8 中緑線），初期の振幅が 1.0° で，しばらく緩やかに増加しており，カーボン長繊維を同時に造形することにより材料の剛性が増加していることが確認された。Onyx および Onyx+CF の試験片で 4 個の締結部を使用した場合（図 8 中青線，紫線）は往復トルクをかけ始めてからそれぞれ 1° 付近， 0.7° 付近で一定であった。Onyx の試験片で 2 個の締結部を使用した場合（図 8 中赤線）は約 7 万回の往復トルクをかけた時点で急激に角変位の振幅が増加し，ねじが破断した。試験後の試験片には図 9 のように亀裂が入っていた。一方，Onyx+CF の試験片で 2 個の試験片を使用した場合（図 8 中緑線），2.5 万回の往復トルクをかけた時点で急激に角変位の振幅が増加し，ねじが破断した。Onyx の試験片よりも少ない回数で破断が起こったことから，カーボン長繊維により剛性は高くなるが繰り返し荷重に対する耐久性は下がることが確認された。Onyx および Onyx+CF の試験片で 4 個の締結部を使用した場合（図 8 中青線，紫線）は 40 万回の往復トルクをかけてもねじが破断することはなく，急激な振幅の増大も見られなかった。

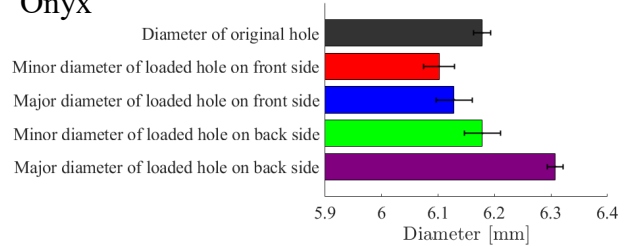
ただし，40 万回の荷重をかけた後にねじを緩めたところ，緩める際のトルクは Onyx の試験片において平均 2.4 Nm，Onyx+CF の試験片において平均 3.0 Nm であった。ねじを同様に締めてすぐに外した場合はトルクを計測したところ平均 3.8 Nm であったため，荷重を負荷することによりねじが緩んでいることが確認された。また，実験後に試験片の穴を顕微鏡で観察し，長径および短径の大きさを計測した結果を図 10 に示す。ここで，図 5 の写真のように実験装置の手前側から見える面を表側，アクチュエータのフランジに接触している面を裏側としている。特に試験片裏側の穴の長径（荷重と同じ方向の径，図 10 中紫棒）が他の径と比べて大きくなっており，往復トルクによって試験片が変形していることが確認された。

表 1 から，Onyx の材料の締結部にかかる平均応力が 3.77 MPa のときは約 7 万回の荷重を加えると破壊が起こり，平均応力が 1.89 MPa のときは 40 万回の荷重を加えても破壊は起こらないことが分かった。また，Onyx+CF の材料の締結部にかかる平均応力が 3.77 MPa のときは約 2.5 万回の荷重を加えると破壊が起こっており，カーボン長繊維を入れることで剛性が増加したものの，繰り返し荷重に対する耐久性は低下した。

4 結言

本研究では，Onyx や Onyx+CF と金属部品を支圧接合により締結し，締結部に 40 万回規模の繰り返し荷重をかけ，繰り返し荷重の回数と変形量の関係を定量的に明らかにした。また，破壊前に角変位が徐々に増大する現象がみられることから，角変位が拡大に転じることを観測することにより，メンテナンス時期を破壊前に知ることが可能であると考えられる。実際の産業用ロボットでは数千万回単位での繰り返し荷重に対する耐久性が求められる。締結部の個数を 4 個，8 個，16 個と増やした場合，破壊するまでに必要な荷重の回数は増加すると考えられる。これらの条件下でどれほどの回数の荷重に対する耐久性を有するかを評価する必要がある。また，本研究で用いた試験片は 37 % の充填率

Onyx



Onyx+CF

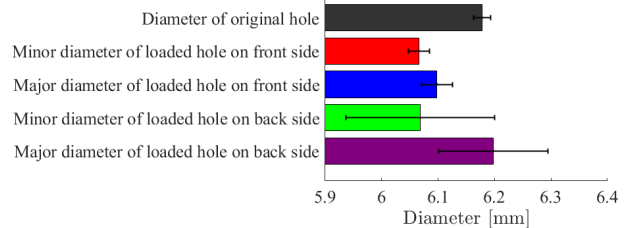


Fig.10 Diameter of the hole of the specimen from two directions.

で造形されているが，締結部付近の充填率を上げることで強化することが可能である。これによりどの程度耐久性が向上するかも試験する必要があり，今後の課題である。

謝辞

本研究は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP20016）の一環として行われたものである。また，本論文は，技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構との共同研究の成果であり，技術研究組合 産業用ロボット次世代基礎技術研究機構が共有著作権を有している。

参考文献

- [1] Ahmet Can, Ahmet Meram, Dynamic behavior of screwed joints for CFRP composite laminate structures under impact loading, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 75, pp. 232-242, (2022).
- [2] Gen Endo, Yuta Tsukamoto, Hiroyuki Nabae and Takeshi Takaki, Proposal of a Fastening Method for Deformable Plastic Parts and Rigid Metal Parts, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 1-6, (2023).
- [3] Naoyuki Takesue, and Yuri Ode, Stiffness Model of Single-Gear Joint with 3D-Printed Link in Robot Arm, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 1-6, (2023).
- [4] 岡本大河, 轟章, 遠藤玄, 低インフィル率 3D プリント複合材の面圧強度評価, Agora of Additive Manufacturing, paper24004, (2024).
- [5] 関口兼司, 塚本悠太, 難波江裕之, 遠藤玄, 産業用ロボットへの適用に向けた繊維強化樹脂材のクリープ変形量計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024 講演論文集, (2023).
- [6] Takeshi Takaki, Masahito Kanekiyo, and Gen Endo, Damping Characteristics in Adaptation of Plastics for Robot Structures, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 1-4, (2023).
- [7] Yuta Tsukamoto, Kenji Sekiguchi, Hiroyuki Nabae, and Gen Endo, Measurement of Creep Deformation of Resin Structural Parts for a Lightweight Industrial Robot, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 592-597, (2024).