

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	炭素繊維不織布強化樹脂部品の金属部品への接合法の評価
Title(English)	Evaluation of Fastening Method for Carbon Fiber Non-woven Reinforced Plastic Parts to Metal Parts
著者(和文)	塚本悠太, 難波江裕之, 有賀嵩紘, 遠藤玄
Authors(English)	Yuta Tsukamoto, Hiroyuki Nabae, Takahiro Aruga, Gen Endo
出典(和文)	第26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講演予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2025, 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) 2025 The Society of Instrument and Control Engineers

炭素繊維不織布強化樹脂部品の金属部品への接合法の評価

○塚本 悠太 (東京科学大学), 難波江 裕之 (東京科学大学),
有賀 嵩紘 (東京科学大学), 遠藤 玄 (東京科学大学)

Evaluation of Fastening Method for Carbon Fiber Non-woven Reinforced Plastic Parts to Metal Parts

○ Yuta TSUKAMOTO (Science Tokyo), Hiroyuki NABAE(Science Tokyo),
Takahiro ARUGA(Science Tokyo), and Gen ENDO(Science Tokyo)

Abstract: Carbon fiber non-woven reinforced plastic is lightweight, high-strength, and has excellent machinability. Its application to robot parts is expected to reduce energy consumption through weight reduction. To achieve this objective, a reliable method for jointing plastic parts to metal parts, such as a flange of motor, is essential. In this study, a carbon fiber non-woven reinforced plastic parts was jointed to a metal parts using a friction joint with 16 screws arranged in an evenly spaced circular pattern. The displacement and fastening torque were measured over one month while repeatedly re-tightening the screws at a constant torque. The results were compared with those from a previous study on 3D-printed parts, which utilized both friction joints and bearing joints with thin-walled cylindrical parts. As a result, common screw-based fastening method can maintain a secure connection over a long period for carbon fiber non-woven reinforced plastic. Furthermore, this confirms that carbon fiber non-woven reinforced plastic parts can replace conventional robot parts with the same geometry and shape.

1. 緒言

産業用ロボットは運用コストと環境負荷を削減するため、消費電力の削減が求められている。これを実現する手法として、従来の産業用ロボットに用いられてきた金属部品を樹脂部品により代替し、軽量化を実現する手法が多く検討されてきた¹⁾⁻⁵⁾。しかしながら産業用ロボットには、モータ等のアクチュエータやベアリング等の機械要素など樹脂部品で代替することが困難な部品が多く用いられており、これらの部品と樹脂部品とを締結する手法が必要不可欠である。特にモータと接続する構造材部品は、モータの動力をエンドエフェクタまで伝達する必要があるため、モータと樹脂製構造材部品間での締結の重要性は高い。

これまでロボット部品では、ねじによる締結が多く用いられてきた。これはねじを用いた部品締結法が、以下の3つの特徴を有しているためである。

1. 締結力の管理の容易さ
ねじを用いた部品締結では、ねじに作用させる締め付けトルクを調整することで締結力を容易に調整することができる。
2. 部品交換の容易さ
圧入や接着といった他の部品締結法とは異なり、ねじを用いた部品締結法では締め付けトルクを除外することで容易に締結を解除することができる。

3. 規格品が多く入手性が高い

様々な規格のねじがロボット部品の締結に用いられており、特殊な工具を必要とせず組み立てを行い、交換用のねじも容易に入手することができる。

ここで、ねじを用いた部品締結は、摩擦接合 (Fig. 1 (a)) と支圧接合 (Fig. 1 (b)) に分類することができる⁸⁾。これらは初期は摩擦接合で締結されているものの、被締結部品が剪断方向の荷重を受けて部品が滑ることで支圧接合による締結に遷移する。それぞれの接合原理は以下の通りである。

1. 摩擦接合

ねじに締め付けトルクを作用させることで、ねじ自体に引張力 (軸力)、被締結部品に圧縮力が作用し、被締結部品間には圧縮力に応じた摩擦力が生じる。この摩擦力により部品が接合されており、被締結部品には常にねじの軸力由来する圧縮力が作用し続ける。

2. 支圧接合

ねじの側面と被締結部品の穴の側面が接し、接触面で生じる支圧力により部品が締結される。そのため摩擦接合とは異なり、被締結部品に常に作用する力はないものの、被締結部品の穴の公差が部品締結のガタの原因になり得る。

そのため被締結部品の剛性が小さい場合、摩擦接合では部品に変形が生じて適切に部品締結を行うことができない場合がある。そこで著者らは以前の研究において、金属製薄肉円筒部品を用いた支圧接合による部品締結法 (Fig. 1 (c)) を提案した⁹⁾。本手法ではねじと同軸に配置した円筒部品が、ねじの軸力により生じる圧縮力を支えるため、被締結部品に圧縮力が作用せず、円筒部品と被締結部品の穴の側面の間での支圧力により部品が締結される。そのため低剛性の被締結部品に大きな変形を生じさせることなく、部品締結を実現す

Table 1 Nominal values of alluminum alloy (A5052) and carbon fiber non-woven reinforced plastic (Feltcarbon)^{6), 7)}.

Material	A5052	Feltcarbon
Density [g/cm ³]	2.7	1.3
Tensile strength [MPa]	260	270
Tensile modulus [GPa]	68	22
Bending strength [MPa]	-	300
Bending modulus [GPa]	-	18

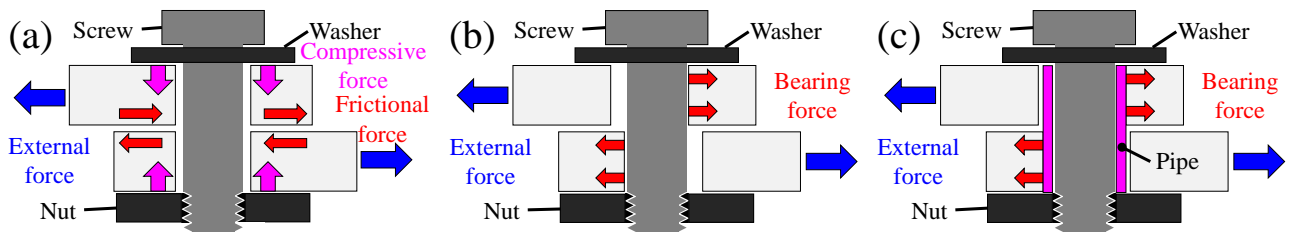


Fig. 1 Fastening method using screws: (a) Friction joint, (b) Bearing joint, (c) Bearing joint using thin-walled cylindrical parts.

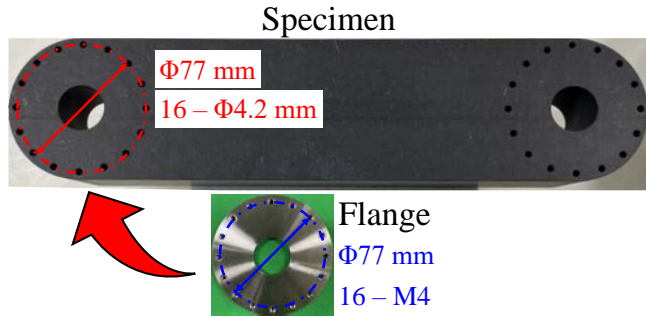


Fig. 2 Appearance and dimensions of the specimen and the flange. On both ends of the 45 mm thick specimen, there are 16 equally spaced 4.2 mm diameter through-holes. On the other hand, the flange has 16 equally spaced M4 female threads.

ることができる。これまでの研究で本手法の有効性を確認してきた^{10), 11)}。

本研究では被締結部品として炭素繊維不織布強化樹脂（フェルカーボ，双葉電子工業⁷⁾）に着目し，従来のねじを用いた部品締結法により部品が変形せず，適切に締結できるかを評価する。フェルカーボは不織布状の炭素繊維の層を積層し，熱硬化性樹脂を流し入れて高圧成形，切削することで製造した樹脂材料である。そのため Table 1 に示すように，従来の産業用ロボットに用いられてきたアルミニウム合金と同等の強度を有しながら，半分程度の比重であるため軽量である。さらに不織布状の炭素繊維により強化されているため，一般的な炭素繊維強化樹脂とは異なり等方性に近い機械的特性や高い切削性を有しているという特徴がある。したがって，フェルカーボ製部品は同等の寸法と形状を有するアルミニウム合金製部品をそのまま代替しながら，軽量化を実現することのできる可能性がある。よって本研究では，フェルカーボ製部品を従来のねじを用いた部品締結法により，長期にわたり締結を維持できるかを定量的に評価することを研究目的として，ねじの締め付け時の部品の変形量と締め付けトルクの抜けを計測，評価する。

2. 実験方法

試験片は Fig. 2 に示すように，産業用ロボットのリンクの一端を模した厚さ 45 mm のフェルカーボ製部品とした。この部品に設けた通し穴のうち，片側の 16 等配で配置した直径 4.2 mm の通し穴に M4 のねじ（頭の直径 7.0 mm，高さ 4.0 mm）とワッシャ（内径 4.0 mm，外形 9.0 mm，板厚 0.8 mm）を通し，M4 の貫通穴が 16 等配で配置された板厚 5.0 mm のフランジ部品に対して部品を締め付けた。実験手法は以前の研究⁹⁾ で実施した手順と同様の手順とし，以下に詳細を示す。

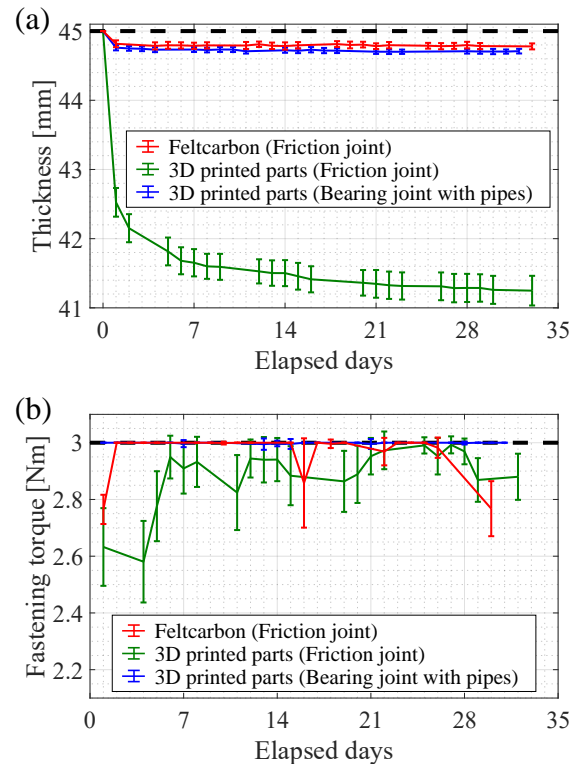


Fig. 3 One-month measurement results for (a) thickness of the specimen, which is calculated by subtracted the thicknesses of screw head, washer and flange from the measured distances, (b) fastening torque: friction joint with the Feltcarbon parts (Red line), friction joint with the 3D printed parts (Green line), bearing joint using cylindrical SUS304 parts with 1.0 mm wall thickness with the 3D printed parts (blue line).

- トルクレンチを用いて，すべてのねじの締め付けトルクが 3.0 Nm に達するまで徐々に締め付けトルクを付加する。
- ねじの頭とフランジの端面との距離をデジタルノギスを用いて計測する。
- ねじを緩めずに屋内に 1 日間放置する。（ただし，週末は 3 日間放置する。）
- トルクレンチを用いて締め付けトルクを徐々に付加し，ねじが回りだすトルクを計測する。もし締め付けトルクが 3.0 Nm に達してもねじが動き出さない場合は，計測値を 3.0 Nm とする。
- もしすべての計測値が 3.0 Nm である場合は，手順 1 に戻る。
- もし 1 つのねじが 3.0 Nm に達する前に回りだした場合は，すべてのねじを 30 度程度緩め，手順 1 に戻る。

この手順を1か月間にわたり継続し、ねじの頭とフランジの端面との距離と締め付けトルクを計測した。

3. 実験結果

横軸を経過日数として、Fig. 3 (a) に得られたねじの頭とフランジの端面との距離からねじの頭の高さ、ワッシャとフランジの板厚を差し引いた試験片の厚さを示し、Fig. 3 (b) に締め付けトルクの計測結果を示す。ただしこれらの図では16か所で得られた結果の平均値を示しており、エラーバーは標準偏差を示す。さらにこれらの図にはフェルカーボ製部品に摩擦接合を適用した場合の結果（赤線）に加え、以前の研究で得られた3Dプリント部品（材質を短繊維炭素繊維強化ナイロン樹脂（Onyx, Markforged）、造形条件を充填率37%の三角形の充填形状、2層のウォールと4層のソリッドレイヤとして造形）に摩擦接合を適用した場合（緑線）の結果を示す。さらに通し穴の直径を6.2 mmに変更した3Dプリント部品（同様の材質と造形条件で造形）に対し、肉厚1.0 mmのSUS304製の円筒部品を用いた支圧接合を適用した場合（青線）の結果を示す。

試験片の厚さについては、フェルカーボ製部品を摩擦接合した場合と3Dプリント部品を円筒部品を用いて支圧接合した場合はほとんど変形が生じず、3Dプリント部品を摩擦接合した場合は大きく変形が生じることがわかる。一方締め付けトルクについては、フェルカーボ製部品を摩擦接合した場合と3Dプリント部品を円筒部品を用いて支圧接合した場合は3.0 Nmに近い値を保ち続けることがわかる。ただしフェルカーボ製部品を摩擦接合した場合には、一部で締め付けトルクが低下しており、フェルカーボ自体の応力緩和による影響と推察される。一方3Dプリント部品を摩擦接合した場合は初期の締め付けトルクの抜けが大きく、徐々に3.0 Nmに近い値をとるが、3.0 Nmに近い値を保ち続けられないことがわかる。したがって、フェルカーボ製部品は摩擦接合時に生じる圧縮力では部品に大きな変形が生じないため、締め付けトルクの抜けが生じにくく、締結力を長期にわたり維持できることが明らかになった。

4. 考察

実験結果よりフェルカーボ製部品では、ねじの締め付け時に作用する圧縮力により部品に大きな変形が生じず、圧縮力を十分に支えられることが明らかになった。ここで締め付けトルクとねじの軸力との関係式は、以下の式(1)で表すことができる¹²⁾。

$$T = kdF \quad (1)$$

ただし、 T [Nm] は締め付けトルク、 k はトルク係数、 d [m] はねじの呼び径、 F [N] はねじの軸力を表している。ここで一般的なトルク係数は0.14から0.26の範囲にあるため¹²⁾、トルク係数を0.14と仮定して3.0 Nmの締め付けトルクをM4のねじに作用させた場合、ねじの軸力は5.4 kNとなる。さらにねじの締め付けにより試験片に生じる圧縮応力は以下の式(2)で表すことができる。

$$\sigma = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (2)$$

ただし、 σ [MPa] は圧縮応力、 D [mm] はワッシャの外径、 d [mm] は試験片の通し穴の径を表している。こ

でワッシャの外径は9.0 mmであり、試験片の通し穴の径は4.2 mmであるため、圧縮応力は108 MPaとなる。これはフェルカーボの引張強度及び曲げ強度の公称値（それぞれ270 MPa, 300 MPa）よりも小さい値であり、十分にねじの締め付け時に作用する圧縮力を支えられることがわかる。

5. 結言

本研究ではアルミニウム合金と同等の強度と半分の比重を有するフェルカーボ製部品について、従来のねじを用いた部品締結法が長期間に渡り締結力を維持できることを定量的に評価した。さらに締め付けトルクとねじの軸力との関係から、ねじの締め付けによりフェルカーボに生じる圧縮応力を算出し、フェルカーボの公称値と比較した。その結果従来のねじを用いた部品締結法により、フェルカーボに大きな変形が生じることなく締結できることを確認した。

本研究の成果から、締結部については同等の寸法と形状を有するアルミニウム合金製部品をフェルカーボ製部品によりそのまま代替可能であると推察される。一方で今回の検討は外力が作用しない締結部単体の評価に限られる。そのため静的・動的な外力が作用する条件下で接合法を評価し、フェルカーボ製部品の設計法を構築する必要があると考える。

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、武居直行教授（東京都立大学）、太田祐介教授（千葉工業大学）、高木健教授（広島大学）には本研究の遂行にあたり有益な助言を受けた。記して深甚の謝意を示す。

参考文献

- [1] G. Lakshmi Srinivas and A. Javed: Topology optimization of rigid-links for industrial manipulator considering dynamic loading conditions, *Mechanism and Machine Theory*, 153, p. 103979 (2020).
- [2] X. Wang et al.: Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization, *Mechanism and Machine Theory*, 132, pp. 48–65 (2019).
- [3] H. Kanazawa et al.: Empirical Study for 3D-Printed Robot Design: Dimensional Accuracy of a Hole and Proposal of a New Shaft-Fastening Method, 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 633–639 (2022).
- [4] K. Osawa and G. Endo: Does Thin-Walled Metal Pipe Insertion Increase the Bending Strength of 3D Printed Parts?, 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 585–591 (2024).
- [5] N. Kanai, H. Nabae, and G. Endo: Empirical Strength Comparison of 3D printed Beams and Proposal of a Joining Method for Large Parts*, 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 332–338 (2025).
- [6] K. Connect: A5052, Accessed on 17.09.2025, URL: <https://www.kabuku.io/guide/metal/aluminum/a5052/>.
- [7] 双葉電子工業: フェルカーボの特性・特徴, Accessed on 17.09.2025, URL: <https://www.cfrp.mtb.futaba.co.jp/felcarbo>.

- [8] 戸田圭彦 et al.: 高力ボルト摩擦接合継手の孔変形に基づいた支圧耐力に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 70.3, pp. 333–345 (2014).
- [9] G. Endo et al.: Proposal of a Fastening Method for Deformable Plastic Parts and Rigid Metal Parts, 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 1–6 (2023).
- [10] Y. Tsukamoto et al.: Measurement of Creep Deformation of Resin Structural Parts for a Lightweight Industrial Robot, 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 592–597 (2024).
- [11] K. Sekiguchi et al.: Creep Deformation Measurement of Fiber-reinforced Plastic Materials for Industrial Robot Applications, 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 320–325 (2025).
- [12] 東日製作所: 東日トルクハンドブック, Accessed on 18.09.2025, URL: https://www.tohnichi.co.jp/download_services.