

令和5年3月29日

## 令和4年度 学生自主研究成果報告書

教 育 本 部 長 様

学生自主研究グループ名	パイプフレーム製作グループ	
研究課題名	エコランカー向けCFRPパイプフレームの検討	
研究代表者 (学生)	学籍番号	B24N020
	氏 名	北野京介
指導教員	学 科	知能メカトロニクス学科
	氏 名	小谷光司

学生自主研究の報告書を別紙のとおり提出します。

# エコランカー向けCFRPパイプフレームの検討

システム科学技術部 知能メカトロニクス学科

1年 北野 京介 米倉 泉希

指導教員 システム科学技術部 知能メカトロニクス学科

教授 小谷 光司 助教 小宮山 崇夫

## 1. 緒言

総走行距離を競う電動自動車のエコラン競技では、タイヤの転がり抵抗が成績に影響を与える。転がり抵抗はタイヤに加わる荷重に比例して増加するため、走行距離を延ばすためには軽量な車体であることが望ましい。軽量な車体を実現するために、最も理想的なのはF1レーサーなどでも用いられているCFRP一体形成のモノコックフレームであるが、作成が容易ではなく（高度な技術が必要）、コストも高い（大型のオートクレーブによる硬化処理が必要など）。一方、規格品のパイプを組み合わせて構成するパイプフレームは、汎用性と高いコストパフォーマンスを兼ね備えている。本学の物づくりサークルS. E. I. M. でエコラン競技に出場している車体は、アルミ角パイプを用いた車体であり、数々の輝かしい成績を収めている。しかしながら、アルミニウムを用いていることで、CFRPフレームに比べると重量面での優位性はない。そこで、CFRP材料の軽量性とパイプフレームの汎用性・コストパフォーマンス性を兼ね備えたエコランカー向けフレーム構造として、既製品のCFRPパイプを組み合わせたパイプフレームの可能性を検討したいと考えた。

そこで、必要な強度と重量バランスによる最適なCFRPパイプの寸法検討や、パイプ同士の接合方法の検証を行うことを目的として本自主研究を実施した。

## 2. CFRPパイプ

### 2-1. CFRPの選定

今回選定したCFRPパイプは外径40 mm、厚さ1 mmと2 mmのCFRPパイプである。厚さ2 mmのCFRPパイプを車体上部と下部のフレームに用いて、上部と下部以外のフレームは厚さ1 mmのCFRPパイプを用いる。車体に荷重が加わった時に上部と下部が大きくたわむことを考慮し、上部と下部に厚さ2 mmのパイプを用いた。CFRPパイプは剛性と重量の観点から選定した。剛性は両端支持、中央集中荷重のたわみから考えた。

#### ・たわみ

たわみ  $\delta$  (mm)、中央集中荷重  $P$  (N)、部材のスパン  $L$  (mm)、ヤング率  $E$  (GPa)、断面2次モーメント  $I$  (mm<sup>4</sup>)、外径  $D$  (mm)、内径  $d$  (mm) と定義した。断面2次モーメント  $I$  (mm<sup>4</sup>) を式(1)から求め、たわみ  $\delta$  (mm) を式(2)から求めた。

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (2)$$

#### ・質量

質量  $m$  (kg)、密度  $\rho$  (kg/mm<sup>3</sup>)、断面積  $A$  (mm<sup>2</sup>) と定義した。断面積  $A$  (mm<sup>2</sup>) を式(3)から求め、質量を式(4)から求めた。

$$A = \frac{1}{4}\pi(D^2 - d^2) \quad (3)$$

$$m = \rho AL \quad (4)$$

CFRPのヤング率と密度はそれぞれ  $E=102.6$  GPa、 $\rho=1.7 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup> である。また、製作する車体の下部の寸法が900 mmであり、ドライバーが乗車した時の負荷が1000 N加わると仮定して  $P=1000$  N、 $L=900$  mm とした。外径、内径の値を変化させ、たわみ、重量の変化を式(2)および式(4)から求め、たわみと重量を比較したものを表1に示す。

表1. たわみと重量の比較

外径 D(mm)	内径 d(mm)	たわみ(mm)	重量(kg)
50	48	3.21	0.24
50	46	1.70	0.46
40	38	6.36	0.19
40	36	3.43	0.37
30	28	15.5	0.14
30	26	8.56	0.27

表1のように外径 30 mm のCFRP パイプではたわみ量が大きくなる。外径 50 mm では重くなってしまうので、たわみと重量のバランスを考え外径 40 mm のCFRP パイプを選定した。

## 2-2. CFRP パイプとアルミニウムパイプの比較

現在使用している車体はアルミニウムパイプで製作したものである。今回選定したCFRP パイプとアルミニウムパイプのたわみ量と重量を式(2)、式(4)から計算を行い比較した結果を表2に示す。

なお、比較条件はL=900 mm, F=1000 N, D=40 mm, d=38 mmとした。また、アルミニウムのヤング率と密度はそれぞれE=72 GPa,  $\rho=2.7 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>である。

表2. CFRP パイプとアルミニウムパイプの同条件下でのたわみ量と重量の比較

材料	たわみ(mm)	重量(kg)
CFRPパイプ	6.36	0.19
アルミニウムパイプ	9.07	0.30

表2からわかるようにCFRPパイプとアルミニウムパイプではたわみ、重量に大きな差があり、CFRPパイプを用いることでエコランカーの走行性能向上が期待できる。

## 3. CFRPパイプ同士の接合

### CFRPフレーム同士の接合の手順

- Step1. CFRPフレーム同士を接合するために切断用の展開図を書く。展開図はプログラムを用いて製作した。
- Step2. CFRPパイプに展開図を貼り、手動で大まかに削った後にヤスリで形状を整える。
- Step3. CFRP同士の接合にはDENATITE XNH 3324という2液混合式の接着剤を使用した。
- Step4. 接合部の接着剤が硬化したら、カーボクロス巻きやすくするために接合部の横にパテ盛りを行う。今回使用したパテはLUC LSカーボンファイバーパテである。硬化剤はパテブラウン硬化剤を使用した。主剤と硬化剤を100:2で混ぜ、均一にしてパテ盛りをする。
- Step5. パテが硬化したらヤスリで削って形を整え、エポキシ樹脂を含浸させた1KのCFRPシートを巻きつける。更に、CFRPシートの上に余分なエポキシ樹脂を吸収するためにピールプライクロス巻きつけ、最後にビニールテープで圧着させる。エポキシ樹脂が硬化したら接合完了である。完成品を図1に示す。



図1. 結合したCFRPパイプ

## 4. 強度試験

### 実験手順

強度試験では、製作したCFRPフレーム(図1)を治具とU字ボルトを用い縦向きに固定し、接合部の先端に試験機で荷重を掛け、CFRPフレームの極限強さ、たわみ量などを測定する。試験の際には、CFRPパイプの加力する箇所にアルミニウム製の治具をはめ込み、試験時にパイプが潰れて試験結果に影響が出ないようにした。試験は、車体のフレームに採用するCFRPシートで巻いたパイプと別に接着剤のみで接合したパイプとの比較を行い、各3回ずつデータを取った。

試験機には、十分な力で加力試験を行うことが出来る1000 kN万能試験機を用いた。今回の試験では、0.8 mm/minで加力を行った。

## 5. 実験結果

今回は接合部の強度が知りたかったため、応力とたわみ量の関係を見ることにした。応力 $\sigma$ (Pa)を求める式を式(5)に示す。

$$\sigma = \frac{PL}{Z} \quad (5)$$

また、断面係数 $Z$ を求める式を式(6)に示す。

$$Z = \frac{\pi}{32D} (D^4 - d^4) \quad (6)$$

### 5-1. 接着剤のみの接合部の強度

接着剤のみで接合した場合、ひずみ量は1.2 mmから1.5 mmで推移した。応力は、20 MPaから40 MPaとかなりばらつきがあった。結果を図2に示す。

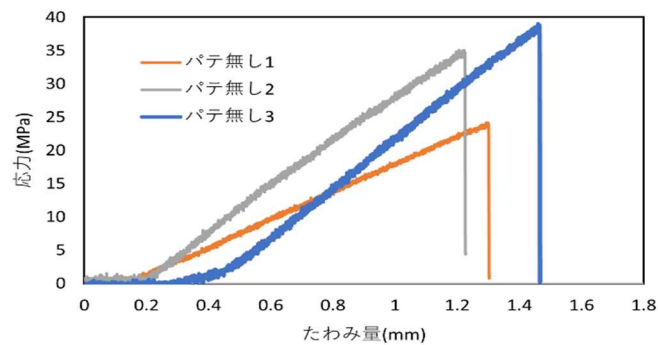


図2. 接着剤のみの試験結果

### 5-2. CFRPシートを巻いた場合の接合部の強度

CFRPシートを巻いたパイプの場合、たわみ量はおおよそ3.4 mmから4.0 mmであった。応力は150 MPaから280 MPaと、接着剤のみの場合と同様にかなりのばらつきがみられた。CFRPシートを巻いた場合の試験結果を図3、パテ有り4回目だけの試験結果を図4に示す。

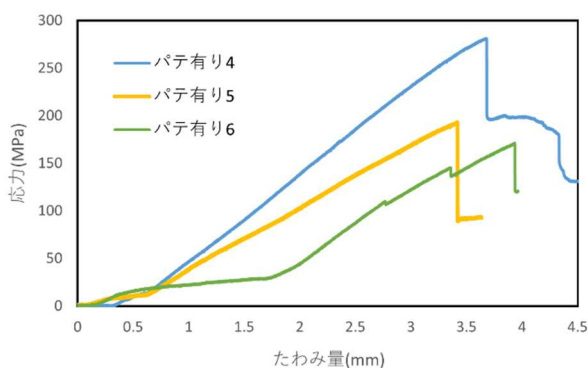


図3. CFRPシートを巻いた場合の試験結果

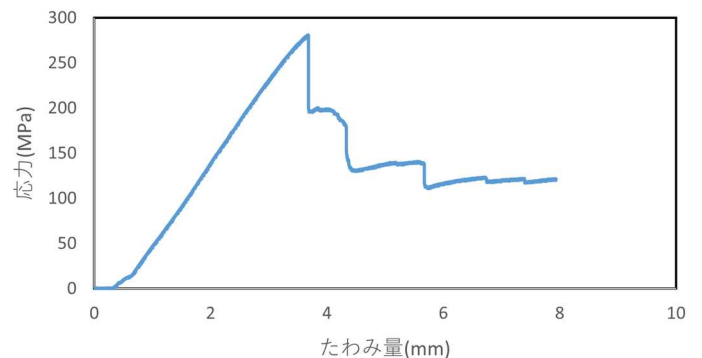


図4. パテ有り4回目の試験結果

## 6. 考察

### 6-1. 接着剤のみの接合部の強度

ひずみ量は1.2 mmから1.5 mmで推移しており大きな変化はない，そのため接着剤の量で強度が変化していると考えられる．

### 6-2. CFRPシートを巻いた場合の接合部の強度

図3では応力が上下した箇所があり，その時にパキパキと音がなっていた．そのため，応力が下がったところで亀裂が入りCFRPシートの間隙が埋まったことで，再び強度を保ち始めたと考えられる．図4に示した4回目の試験結果から，一度応力が下がった後も少しの間強度を保つという現象を繰り返していたことがわかる．この際，亀裂が増えていく度に強度が低下していると考えられる．試験結果にばらつきがあった理由としては，試験片の制作過程でパテの盛り方や量にばらつきがあることや，CFRPシートの密着度合いにばらつきがあること等が考えられる．

CFRPシートを巻いた場合は一度応力が下がってもある程度強度を保つことができ，接着剤のみと比較しても数倍もの応力に耐えることができるため，より車体に適していると考えられる．試験片の完成度によっては応力が大きく異なることが分かったので，車体を製作する際には接合部の強度にばらつきが出ないようにCFRPシートを巻くことが重要である．

## 7. フレームの一部の製作

上述した強度試験の結果より接合部が十分な強度を有していることが確認できたため，エコランカーの車体側面のフレームを製作した．製作したフレームの外観を図5に示す．今回製作する車体のコンセプトは「誰でも乗ることができる車体」であるため，従来の車体より大きめに設計を行った．



図5. カーボンパイプフレーム

## 8. 結言

エコランカー向けのCFRPパイプフレームの検討を行った．CFRPパイプフレームはアルミフレームと比べると軽量であり，強度の高い材料であるためエコランカーの車体に適している．

本学生自主研究を通して，CFRPの特性や加工方法を学んだ．試験片の加工だけでなく今後のエコランカー製作を行うに当たって今回学んだことを活かしていきたい．

## 9. 謝辞

本研究を終えるにあたり，自主研究という貴重な活動の場を与えて下さいました指導教員である小谷光司教授及び小宮山崇夫助教授に深く感謝の意を表します．また，強度試験を行うにあたり，水野衛教授，境英一准教授，石山智准教授には多くのご助言を賜りました．特に，石山智准教授には強度試験の立会い及び試験機の操作に関してご助力いただきました．この場を借りて，感謝の意を表します．最後に，学生支援スタッフの笠原淳平氏及び中村太一氏，パイプ加工用の展開図作成に関してご協力いただきました鈴木恭平氏に感謝の意を表して，本研究の謝辞といたします．

## 10. 参考文献

実践材料力学，中原一郎，養賢堂，2018年第12版