

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：13301  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04191  
研究課題名（和文）熱可塑性CFRPを用いた歯車成形メカニズムの解明

研究課題名（英文）Spur gear manufacturing study using CFRTTP

## 研究代表者

立野 大地（Tatsuno, Daichi）

金沢大学・設計製造技術研究所・助教

研究者番号：30714159

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：軽くて強度の高い炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTTP)を用いて平歯車を成形するプロセスを開発した。具体的には、長さ30mm程度の一方向繊維CFRTTPチップを熱と圧力で固めたビレットと呼ぶ円柱状のブロックを製作し、これを加熱して歯車金型内で圧縮変形することで、繊維を切らずに平歯車を成形した。変形過程での繊維の流動を考慮し、ビレット表面に円周方向と軸方向の繊維を交互に数十層重ねたものにするこ

とで、成形後の歯車に沿って炭素繊維層を形成することができ、歯の強度のばらつきを低減できることを見出した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の手法では繊維を切らず、かつ繊維体積密度が50%程度の歯車を成形することできるため高い強度の歯車を成形できる。一般的な射出成型で製作される歯車に対して高い強度を有するため、より高い負荷に対応した歯車の実現につながる。また、成形過程での変形メカニズムを解明したうえで、適切なビレット設計法を明らかにした点で、歯車以外のCFRTTP成形に応用可能な知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：A spur gear manufacturing process using carbon fiber reinforced thermoplastic(CFRTTP) was developed. Specifically, a cylindrical block called billet was made from unidirectional CFRTTP chips 30 mm long, and heated to compress and deform it in a gear die to form spur gears without cutting fibers. Considering the fiber flow during the deformation process, we found that by alternating dozens of layers of circumferential and axial fibers on the billet surface, it is possible to form carbon fiber layers along the gear after forming and reduce the variation in tooth strength.

研究分野：成形加工

キーワード：CFRTTP 歯車 鍛造 長繊維

### 1. 研究開始当初の背景

軽量でありながら強度の高い素材として、炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)が注目されており、自動車やドローンやロボットなどの構造材として使用することで運用中のエネルギー消費量を削減できるなど、さまざまな効果が期待されている。従来の熱硬化性 CFRP に対する利点として、加熱すれば樹脂が軟化して変形が可能になり、冷やせば固まる性質を利用して、高い生産性やリサイクル性などが挙げられる。しかしながら CFRTP に適用した成形加工法が未発達であることがその普及にむけた大きな課題の一つである。

研究代表者らは、長さ 20~30mm の CFRTP チップからなる不連続繊維 CFRTP ビレットを用いて、繊維を切らずに複雑な形状を成形する方法の研究に取り組んできた。この成形法の応用として、CFRTP 歯車の成形プロセス構築に着目した。一般的に樹脂の歯車は、軽さや静寂性や自己潤滑性などの利点があり、OA 機器や自動車部品のアクチュエータなどに広く使われている。しかし樹脂自体の機械的物性の低さから、高い負荷に対応することができない。射出成型による繊維強化樹脂歯車が存在するが、繊維含有率が 30%程度で低いことや繊維が 1mm 以下に切断されることなどから、強化繊維の性能を十分発揮することができていない。そこで、長い繊維を歯車形状に沿って配置すれば高い強度の歯車が成形できると考え、CFRTP 歯車成形プロセスの開発および繊維流動メカニズムの解明に着手することとした。

### 2. 研究の目的

本研究は、高い強度の CFRTP 歯車の成形に向けて、繊維を切らずに、繊維含有率の高い CFRTP 平歯車を成形するプロセスを開発することを目指す。さらに、成形過程での繊維の流動挙動とそれに影響する成形前材料内の繊維配向、成形後の歯車内繊維配向との関係と、これらと強度との関係を解明する。これらを統合して、歯車成形における素形材の設計法、金型設計法についての知見をまとめる。

### 3. 研究の方法

歯車成形の基本プロセスを図 1 に示す。材料として一方向繊維 CFRTP チップ(母材樹脂 PA6, 炭素繊維体積割合 Vf50%)を用い、これを積層して加熱圧着してビレットを製作する。これを歯車成形金型内で樹脂の融点以上まで加熱してプレスし、歯型に材料を充填させて、保圧したまま冷却する。このプロセスを基本とし、ビレットの繊維配向を変えて、成形後の歯車の断面を光学顕微鏡で観察して内部の繊維組織を明らかにして繊維流動メカニズムを理解するとともに、歯元曲げ試験により強度と組織との関係を調べた。歯車のモジュールは 3、歯数は 16 とした。

高い強度の歯車を成形するための基本的な考えとして、図 2 に示すように、歯元にかかる曲げ応力に対して歯に沿った繊維配向を形成することが重要だと考えた。繊維流動メカニズムを考慮してそのような成形を実現するためのビレット設計を探索し、強度への効果を確かめた。

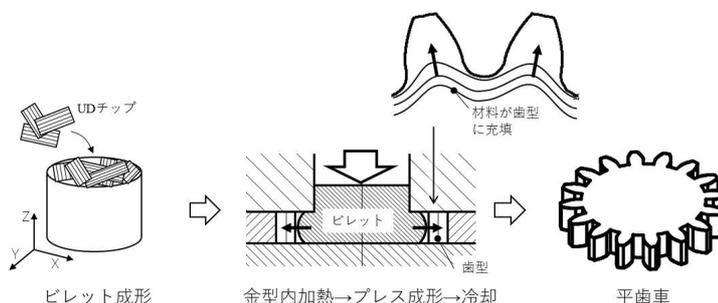


図 1 歯車成形の基本プロセス

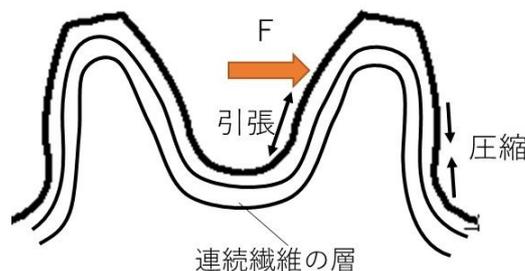


図 2 歯元曲げ強度を考慮した繊維配向

### 4. 研究成果

#### (1) 繊維流動挙動の解明

歯車成形過程での基本的な繊維流動挙動を解明するため、図 3(a)に示すように、長さをそろえた一方向(UD)繊維チップを規則的に水平に積層したビレットを製作した。これを XY ビレットと呼ぶ。繊維が直交するように積層して加熱圧着して板厚 2mm のプレートを製作し、これらを積み重ねたものである。XY ビレットを歯型に対して同図(b)の方向に設置して歯車を成形した。成形した歯車のなかで、特徴的な位置の歯の断面組織とその組織から推定される繊維流動の模式

図を同図(c)に示す。0°方向の歯には、歯に沿って繊維層が形成されている。隣り合う歯の輪郭長は元の繊維長 28mm と同等であるのでこの間は繊維が連続している。この繊維層は X 方向繊維がその直交方向に押し出されて歯型に沿って形成されたものと考えられる。このような組織はおおむね 90° 周期でみられたことから、Y 方向繊維もその直交方向に押し出されたことが考えられる。したがって繊維はその直交方向に移動することが基本であることが示された。45° 方向の歯には、歯車の中心から歯先に向かって放射状の繊維層がみられる。これは、X 方向あるいは Y 方向繊維の端部が歯型に押し込まれて形成されたものであり、このような組織も周期的に確認された。

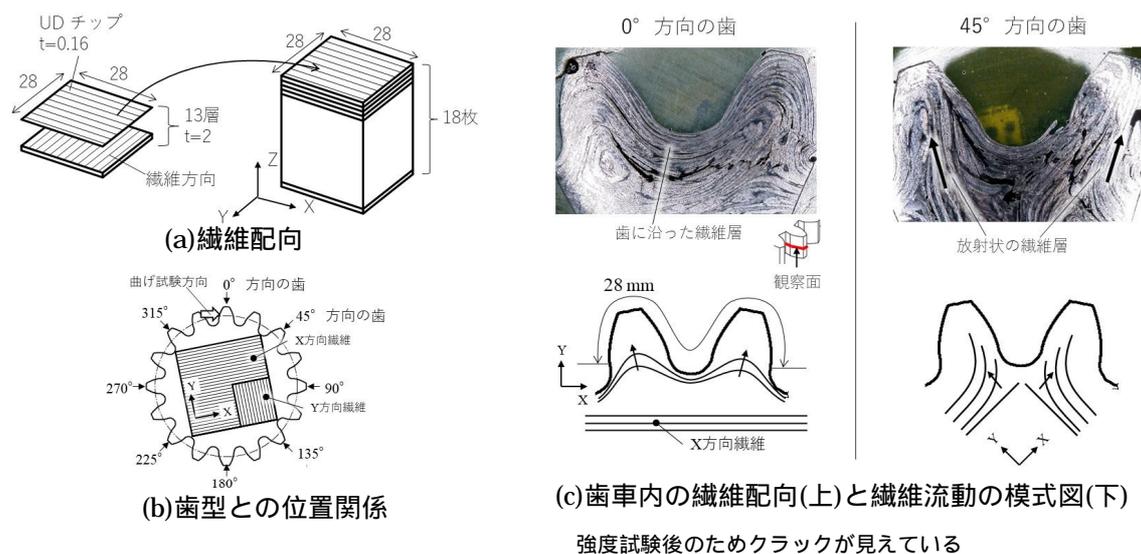


図 3 XY ピレットの繊維配向と歯車の繊維配向

つぎに、繊維を上下と水平の 2 方向に配向した、ZX ピレットを用いた場合のピレット繊維配向や歯車内部組織を図 4 に示す。同図(c)を見ると、0° 方向の歯には歯に沿った繊維層が形成されている。45° 方向の歯もおおむね同等の組織であった。また、同方向の歯の縦断面組織を見ると、褶曲した繊維層がみられた。したがって、X 方向繊維がその直交方向に押し出されるとともに、圧縮を受けた Z 方向繊維が屈服して褶曲しながら歯型に充填していったと考えられる。縦断面の褶曲構造は歯車全体で見られた。一方で放射状の繊維層は 90° 方向の歯に形成されている。これは X 方向繊維が繊維に沿って押し出されて形成されたものと考えられる。この反対側の 270° 付近の歯においても同等の組織が確認された。縦断面での繊維の褶曲構造も見られた。

このように、繊維は基本的にその直交方向に移動が可能であること、Z 方向繊維は屈服しながら歯型に充填されることが明らかとなった。

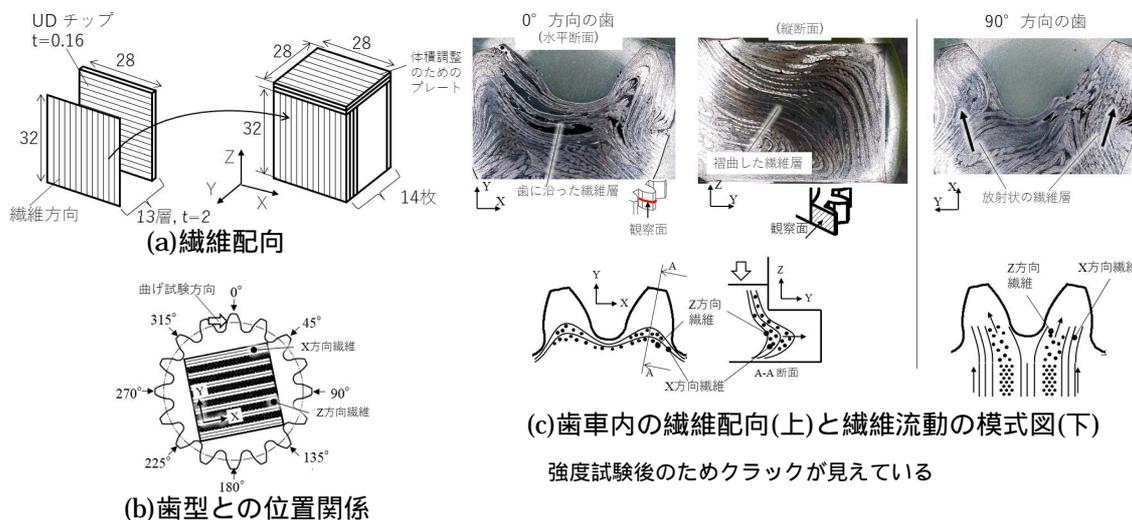


図 4 ZX ピレットの繊維配向と歯車の繊維配向

## (2) ビレット繊維配向設計と歯元曲げ強度

上記の直方体ビレットでは、周期的に歯に沿った繊維層を形成することができたが、全面的にそのような層を形成することが望ましい。そこで、図5に示すように、UDチップをランダムに散布した芯材の周囲に縦方向(Z方向)と円周方向のUDチップを交互に積層したビレットを製作した。これを円周/縦ビレットと呼ぶ。このビレットを圧縮すると、円周方向繊維が歯型に押し出されて歯に沿った繊維層を形成することを狙った。円周方向繊維を3分割しているのは直径の拡大に対応するためである。

縦方向繊維を導入したのは、円周方向繊維のみで成形した場合に内部のランダムチップの圧力に負けて繊維間が開いてランダムチップが先行して歯型に押し出されたので、これを防ぐためである。縦および円周方向繊維は合計20層配置し、歯車成形後に厚さ1mm程度の繊維層を形成することを狙った。比較対象として、UDチップをランダムに散布しただけのランダムビレットを製作した。成形対象の歯車はモジュール3、歯数22とした。

成形した歯車の水平断面組織を図6に示す。いずれのビレットも、歯の表面に繊維層が見られるが、ランダムビレットでは繊維が断続的になっているのに対し、円周/縦ビレットではよりはっきりした繊維層が連続している。

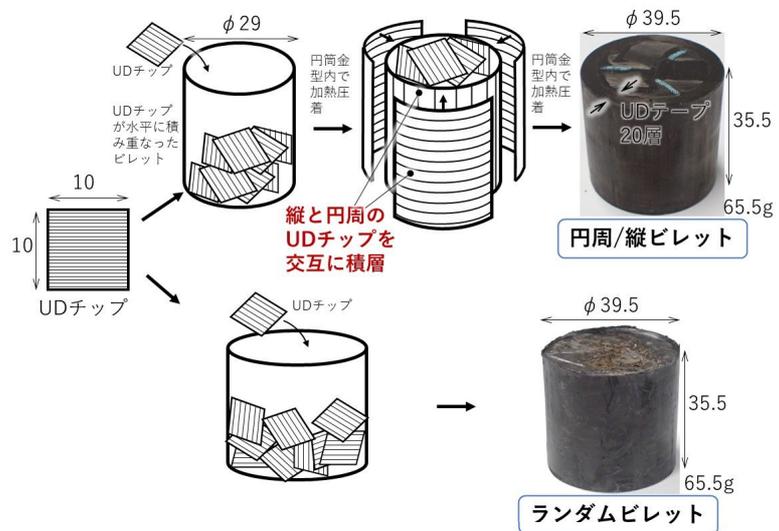


図5 円周/縦ビレットの繊維配向

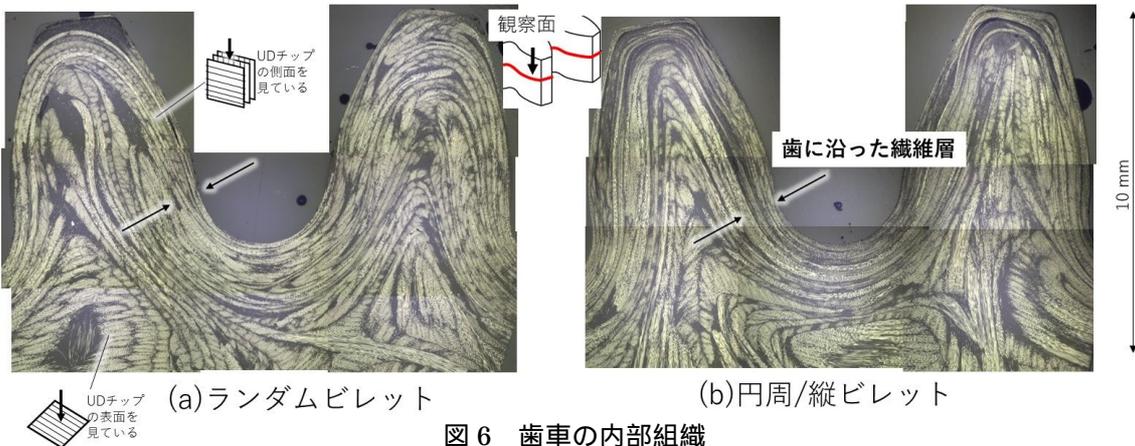


図6 歯車の内部組織

これらの違いを詳細に検討するため、図7に示すように観察面に見える繊維断面形状から、繊維角度の分布を調べた。座標系として、観察面直交方向は $90^\circ$ 、観察面に沿った方向はすべて $0^\circ$ として扱い、本研究では $0^\circ$ 繊維を多く配向することを企図している。

図8は歯元付近の組織の拡大写真と、層ごとに20本ほどの繊維形状から求めた繊維角度の平均値を示したものであり、観察面に対して $15^\circ$ 以下

で交差している層は赤字で示している。歯元強度に寄与するのは $0^\circ$ 方向繊維であるが、ランダムビレットでは観察面に対して $20^\circ$ 以上で交差している繊維層が多いことがわかる。一方で円周/縦ビレットでは、観察面に対して $15^\circ$ 以下の層と大きい角度で交差する層とが交互に重なっており、成形前ビレットの繊維配向が保持されていることが示された。

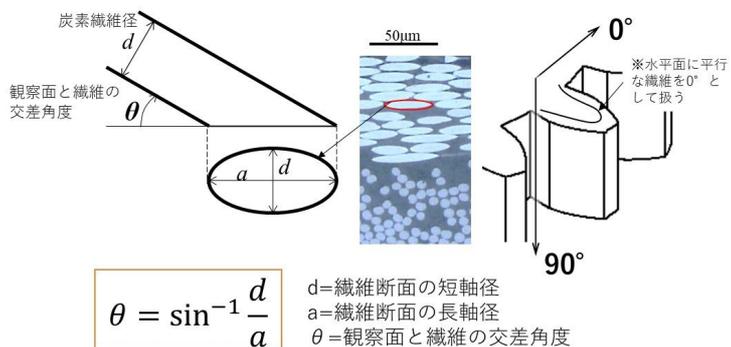


図7 繊維断面形状を利用した繊維配向推定方法

$$\theta = \sin^{-1} \frac{d}{a}$$

d=繊維断面の短軸径  
a=繊維断面の長軸径  
 $\theta$ =観察面と繊維の交差角度

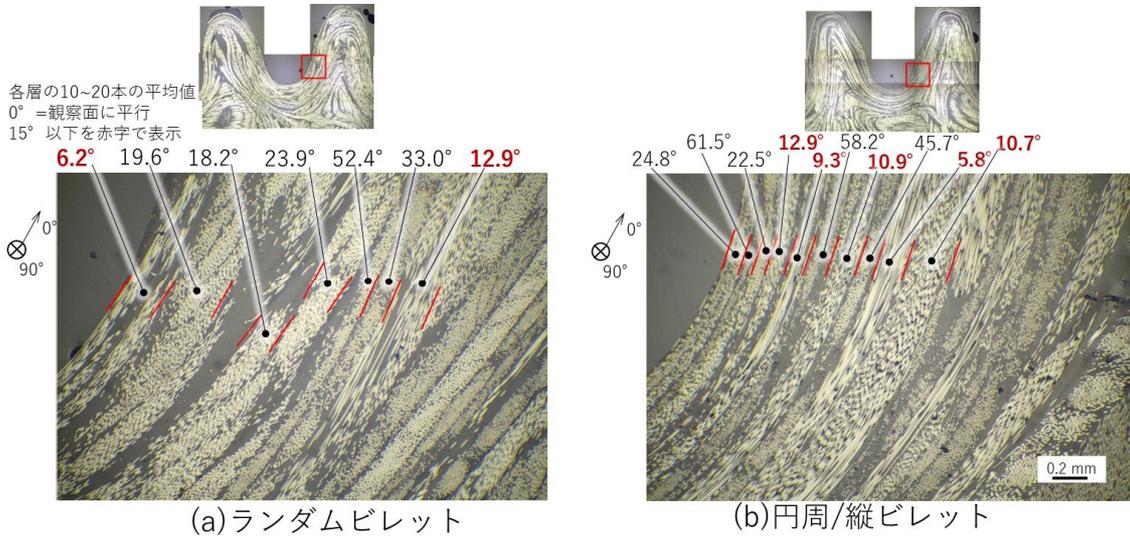


図 8 繊維配向分布の比較

以上のことから、図 9 に示すように、ランダムビレットでは押し出された UD チップが歯形にぶつかると垂直方向に向きを変えてランダム配向の繊維層を形成する。これに対し、円周/縦ビレットでは芯材のランダムチップの押し出しにともなって縦および円周繊維が展開し、歯に沿った連続繊維層が形成されたと考えられる。

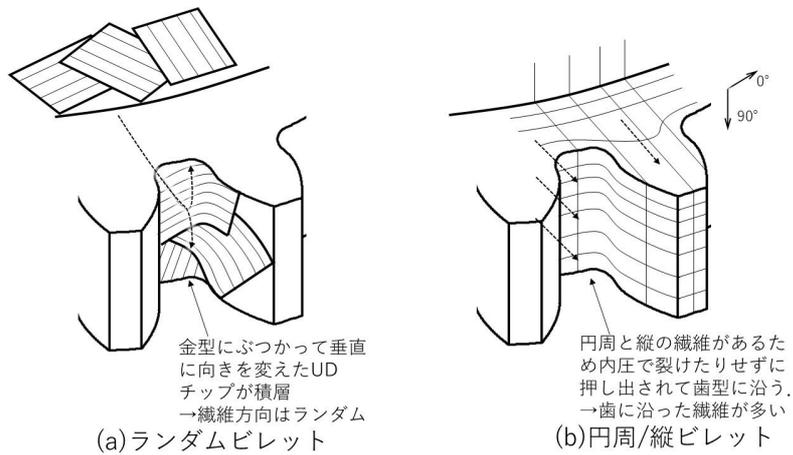


図 9 繊維流動挙動の模式図

図 10 は歯元曲げ試験の応力ストローク波形であるが、ランダムビレット

では波形の傾きがばらついているのに対し、円周/縦ビレットではばらつきが低減している。また最大応力も円周/縦ビレットのほうが小さくなっている。破断箇所の繊維配向分析では、円周/縦ビレットでは 0° 方向繊維の含有割合のばらつきが小さいことがわかっており、そのために波形のばらつきが小さくなったと考えている。

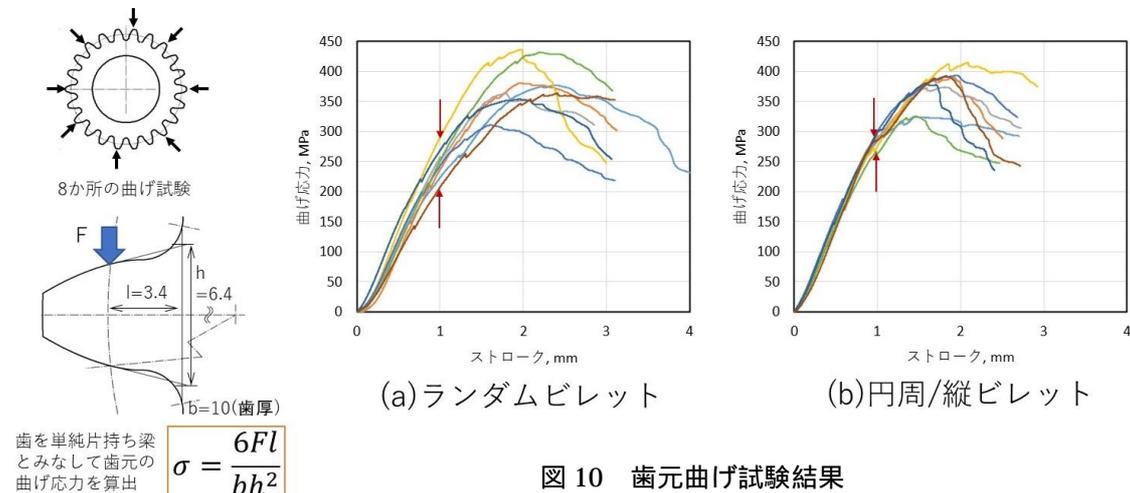


図 10 歯元曲げ試験結果

本研究では、繊維を切らずに高い繊維含有率を持つ高強度 CFRTF 歯車の成形プロセスを構築した。ビレット内の繊維配向を変えて歯車成形過程での繊維流動挙動を明らかにした。ビレット周囲に直交する繊維を巻き付けることで歯に沿った繊維層を形成することができ、強度のばらつきを低減する効果を得られるなど、CFRTF 歯車の基本的な知見をえることができた。本研究では静的な強度について評価したが、今後は動的な評価により摩擦や熱特性などを明らかにし、CFRTF 歯車の実用可能性についての検証が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatsuno Daichi, Yoneyama Takeshi, Kuga Misaki, Honda Yoshitomo, Akaishi Yukihiro, Hashimoto Hayato	4. 巻 14
2. 論文標題 Fiber deformation behavior of discontinuous CFRTF in gear forging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Material Forming	6. 最初と最後の頁 947-960
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12289-021-01611-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久我海咲, 米山猛, 立野大地, 赤石幸宏, 本田良知, 橋本勇統
2. 発表標題 熱可塑性CFRP歯車成形における繊維配向の効果
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久我海咲, 米山猛, 立野大地, 赤石幸宏, 本田良知, 橋本勇統
2. 発表標題 熱可塑性CFRPを用いた歯車成形と強度評価
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立野大地, 米山猛, 赤石幸宏, 本田良知, 橋元勇統
2. 発表標題 歯車成形における不連続熱可塑性CFRP の変形
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 米山 猛, 立野 大地	4. 発行年 2023年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 192
3. 書名 CFRTPの塑性加工入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	米山 猛  (Yoneyama Takeshi)  (30175020)	金沢大学・理工研究域・特任教授   (13301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------