

A Study on Meshing Circumstance of Bevel Gears Made from Bamboo Fibers Extracted with a Machining Center Based on Tooth Root Strain Monitoring under Driving Conditions

Masao NAKAGAWA,* Nao MIYACHI,** Soichiro NAKAYA,*** Toshiki HIROGAKI,**** and Eiichi AOYAMA*****

(Received March 27, 2023)

There is a particular need to develop sustainable and reproducible natural materials to address environmental issues. In previous research, we devised a method to extract high-quality and high-precision bamboo fiber, namely fine bamboo fiber, using a machining center, and using hot press molding, we produced bevel bamboo gears, which are mechanical elements with complex shapes. This paper describes the meshing condition of bamboo fiber gears based on tooth root strain measurement. The relationship between tooth contact and meshing was examined by monitoring the tooth root strain and the meshing ratio was discussed. As a result, it was found that bamboo fiber bevel gears show an increasing trend in tooth contact area toward the outer end of the tooth contact in response to an increase in torque. In addition, due to the low stiffness of the bamboo material, the meshing of the adjacent teeth affects the tooth root stresses under driving conditions.

Key words : bevel bamboo gear, strength, sustainable manufacturing system, hot press molding, tooth root strain

キーワード: 竹ベベルギヤ, 強度, 持続再生可能な生産システム, 加熱加圧成形, 歯元ひずみ

マシニングセンタで抽出した竹繊維のみで成形したベベルギヤの歯元ひずみモニタによる駆動時のかみあい状態に関する考察

中川 正夫, 宮地 奈央, 中谷総一郎, 廣垣 俊樹, 青山 栄一

1. 緒 言

近年, 人手不足やアフターコロナにおける製造業の技術として自動化のニーズが一層高まっている. 特に, 労働集約型である 3 品産業 (代表的には食品, 医薬品, 化粧品) における導入が顕著であり, その中での動力伝

達用技術の技術革新が必要となってきた. その中で, プラスチック歯車の用途の拡大の取り組み¹⁾がなされている. プラスチック歯車は, 軽量, 低騒音, 無潤滑状態での使用が可能²⁾であり, 騒音を嫌う機械や潤滑油が使えない製造現場などのクリーンな状態が好ましい環境におい

* National Traffic Safety and Environment laboratory, Tokyo
Telephone: +81-90-5907-3681, E-mail: masa74n@gmail.com

** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-80-67773579, E-mail: miyacchixn@gmail.com

*** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
E-mail: cgud4066@mail4.doshisha.ac.jp

**** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

***** Department of Mechanical Engineering and science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

でも利用可能とされている^{3,4)}。しかし、プラスチック歯車は衝撃荷重に弱く、強度や剛性が低く、許容伝達トルクが低いため、使用条件が限られている。

そこで、プラスチックの利点を活かしつつ、強度・剛性の問題を改善するために樹脂に繊維を充填することにより強度を向上させた FRP (繊維強化プラスチック) 歯車⁵⁾の利用が進められてきた。また、地球規模の環境問題に対応すべく、天然資源による持続再生可能 (サステナブル) な生産システムに向けた材料の開発が進められている。竹、ケナフ、ジュート、ラミーなどの繊維 (維管束) を用いた天然繊維強化複合材料に関する諸研究があり、既存のガラス・カーボン繊維強化複合材料の代替材料としての期待に沿う研究結果も報告されている。なかでも、竹は日本に多く自生し成長が速いため環境負荷が小さい。竹の繊維 (維管束) は比強度・比剛性が高く、密度も低いことからその応用が期待されている。一方、3 品産業においてプラスチック粉の混入は避けたいが、母材にプラスチックを用いる FRP の手法ではその回避ができない。

一般的に天然繊維強化複合材料では、柔細胞に含まれるリグニン等が繊維のまわりに付着していると、それが樹脂との接着性を阻害するため、爆砕と化学的アルカリ処理などにより維管束だけを取り出し、柔細胞は取り除かれる。この手法では、化学的な方法で柔細胞を溶融除去しているために維管束にもダメージが残るだけでなく、化学処理による環境へのダメージもある。

そこで、化学的処理を一切行うことなく、竹繊維 100% の自己接着歯車の実用化を目標とした研究が行われている。竹繊維 100% 成形では、繊維まわりの柔細胞に含まれているリグニンが天然樹脂の一種であり、適切な条件で加熱加圧することで反応して自己接着する。ここで、マシニングセンタを用いたエンドミル加工により、リグニン、セルロース、ヘミセルロースを含む柔細胞をまわりに残した状態で抽出した繊維 (維管束+柔細胞) を竹繊維と称する。先行研究において、マシニングセンタを用いて精度よく切削し、その切り屑であるファイン竹繊維を抽出する手法 (2.1 節で詳述) を確立し、グリーン金型技術⁶⁾との融合により、竹繊維のみを用いてボードおよび比較的平坦な 3 次元形状の食器 (皿とスプーン) の製造に成功した⁷⁾。具体的には、マシニングセンタにより竹の組成を損なうことなく竹繊維を抽出することで、ホット

プレス法により等方的で均一な材料となる自己接着ボード (加熱・加圧により繊維まわりのリグニンのメイラーD反応を促進することでバインダー樹脂などの結合剤を用いない竹繊維 100% の製品) を製造した⁸⁾。

また、3 品産業の工場においてプラスチック歯車の歯面からの摩耗粉の混入が懸念されていることから、先行研究では、歯面からの摩耗粉が生じても人体に無害と考えられる天然竹繊維 100% の自己接着成形体の動力伝達用の平行軸系平歯車を開発し、その成形方法と歯の曲げ強度⁹⁾やその駆動特性の解明¹⁰⁾を遂行してきた。さらに、駆動系を構成するにあたり直交軸系の当該歯車のニーズもあることが半明してきたことから、新たに直交軸系の歯車としてストレートベベルギヤに着目し、竹繊維の繊維長や強度試験、焼き色パラメータを用いて成形条件、切削条件を明らかにした¹¹⁾。しかし、ベベルギヤは形状が三次元的でより複雑であり、かつ竹繊維という比較的剛性の小さい素材を考慮した、かみあい状態の解明が求められる。

そこで、本研究では竹繊維のみを用いて金型成形されたベベルギヤを実験対象とし、駆動時の歯元ひずみ測定よりかみあい状態について考察したので結果を報告する。

2. 竹繊維ベベルギヤの成形

2.1 マシニングセンタを用いたファイン竹繊維の抽出

生長してから 5 年以上経ち、完全に木質化した竹を使用するものとする。竹の種類は日本三大有用竹のひとつである孟宗竹を用いる。竹は根張り部分の「基稈部」、根張り部分から枝の出る部分までの「直稈部」、および枝のある部分の「冠稈部」に分けることができ、本研究では真直性があり枝のない直稈部からファイン竹繊維を抽出する。

天然の竹は、パイプ状である上に節などもあり、さらにパイプに沿って竹繊維が配向するため材料強度的な異方性も強いいため、そのままでは工業用途としての適用範囲が極めて狭い。竹筒の断面には Fig. 1 のように黒い斑点が見られる。これは機械的性質に優れた維管束鞘と呼ばれているもので、その分布は円周方向にほぼ一定である。

そこで、マシニングセンタで数値制御されたエンドミル加工を使用して、竹繊維に沿って 1 本 1 本を

精密に連続して抽出することで、繊維の断面および長さが形状制御された高品質な竹繊維を得ることができる。

自生している竹を筒状に切断した直稜部をマシニングセンタ(ロボドリル α -T14iDs, ファナック製)のテーブル上の Z (鉛直) 方向に筒の長手方向として設置し、維管束鞘分布に沿って、外周から内周に向かいエンドミル加工でリグニンを含む柔細胞をまわりに残した維管束をファイン竹繊維(以後、単に竹繊維と称する)として抽出した。真直性のある繊維を抽出するために工具として 2 枚刃の $\phi 6$ mm 直刃ハイスエンドミル(CPM-STDN, OSG 社製)を使用する。Figure 2 のような渦状ツールパスを用いて切削し、その切り屑を竹繊維として抽出した。なお、繊維長さはエンドミルの軸方向切り込みで設定した。本研究における竹繊維抽出のための切削条件を Table 1 に示す。

切削速度は、竹繊維に熱的ダメージを与えないよう 80°C 以下になる 94m/min に設定した。得られた竹繊維はある程度均質になるものの、天然素材のためにばらつきが残る。そこで、さらに均質化する

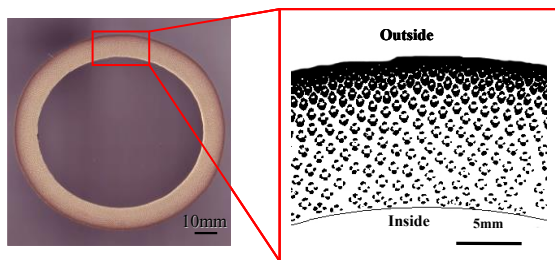


Fig. 1. Cross section of bamboo pipe.

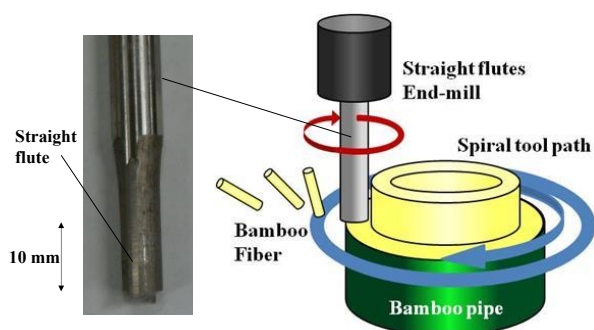


Fig. 2. Spiral tool path for extracting fine bamboo fibers with a machining center.

Table 1. Cutting conditions.

Spindle speed [min^{-1}]	5000
Feed speed [mm/min]	2000
Fiber length Z [mm]	2.5
Depth of cut in radius direction [mm]	0.05
Endmill diameter [mm]	6
Number of cutting edges	2



Fig. 3 Bamboo fiber (1g)

ため、ふるい網で分級した。ふるいの目開き $500\ \mu\text{m}$ 、線径 $315\ \mu\text{m}$ を通過しなかったものを竹繊維 (Large)、目開き $500\ \mu\text{m}$ 、線径 $315\ \mu\text{m}$ のふるい網を通過し、目開き $212\ \mu\text{m}$ 、線径 $140\ \mu\text{m}$ のふるい網を通過しなかったものを竹繊維 (Medium)、目開き $212\ \mu\text{m}$ 、線径 $140\ \mu\text{m}$ のふるい網を通過したものを竹繊維 (Small) と定義する。実際に抽出された竹繊維 1g の例を Fig. 3 に示す。

2.2 竹繊維ベベルギヤの成形

竹繊維ベベルギヤの成形にあたり、抽出した竹繊維 (Large) を金型 (Fig. 4) に流し込み、小型熱プレス機 (AH-2003, アズワン社製) を用いて Fig. 5 に示すように加熱・加圧した。金型はパンチダイス構造であり、パンチ・ダイスホルダー、ガイドピン (Fig. 4, 5 中の I, II, III) の素材は SS400 鋼を使用し、表面はクロムメッキを施している。パンチは厚さ 40mm 、ダイスホルダーは厚さ 65mm である。また、厚さ 25mm のダイス (Fig. 4, 5 中の III) は竹繊維の溶着を防ぐため、素材は大同特殊鋼製の冷間ダイス鋼 DCMX を焼入れ焼戻して使用し、表面はチッ化処理後、TiN コーティングを施している。本実験で用いた竹繊維歯車の成形条件を Table 2 に示す。

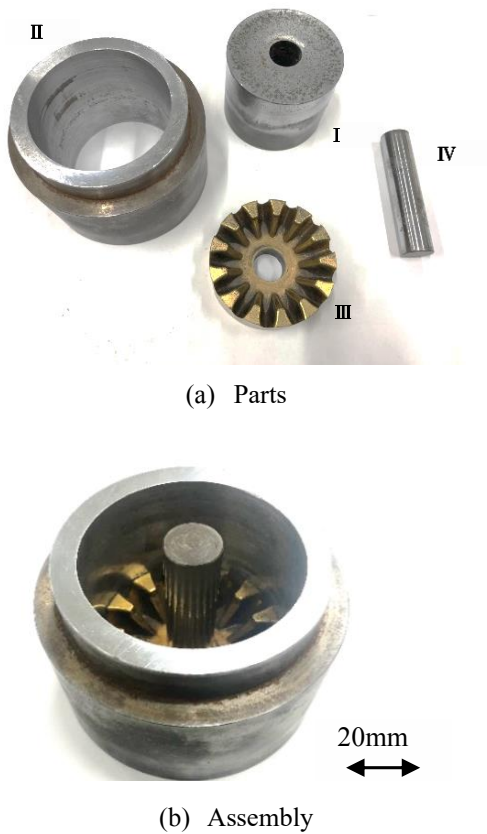


Fig. 4. Mold of Bamboo fiber gear.

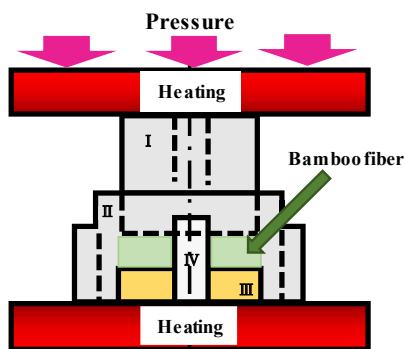


Fig. 5. Image of hot press forming.

Table 2. Molding conditions.

Fiber length [mm]	2.5
Fiber size	Medium
Mass [g]	40
Pressure [MPa]	20
Temperature of top [°C]	190
Temperature of bottom [°C]	190
Heating time [min]	30
Air cooling time [min]	30

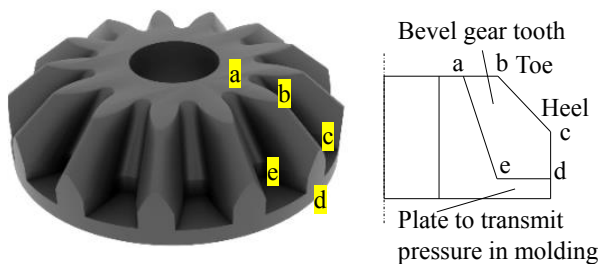
試作する竹繊維ベベルギヤとかみあわせた金属歯車の諸元を Table 3, CAD モデルと実際に成形した竹繊維歯車を Fig. 6 に示す. また CAD モデルより CAM で NC データを作成してボールエンドミル加工で金型製作している. CAD モデルには断面図もあわせて示す. 断面図に着目すると, 一般的な切削で製造されるベベルギヤの場合, 歯部は abce で囲まれる部分となる. 一方で本ベベルギヤは Fig. 5 に示されるように歯の内端側と外端側の両者から加圧することで歯部に成形圧力を伝える必要があり, これは鍛造のベベルギヤと同様である. そのためには外端側に加圧を伝達するための平板部を残す必要がある. 当該が断面図の ed 部となる特徴を有する. そこで歯部は abce として, 便宜上の歯幅は Fig. 7 のように定義した.

歯の精度については, 岩間工業所製コンパクトサイズ 5 軸制御工作機械 MM130 (以下 D5MC) を用い, マイクロメータによるピッチ誤差計測で確認した. D5MC は, 立形トラニオンタイプの 5 軸制御工作機械であり, 直進 3 軸と回転 2 軸を有している. D5MC の C 軸旋回中心にベベルギヤの回転軸を一致させマイクロメータのピックをあて目盛りを読

Table 3. Dimension of gears.

Material	Bamboo	Metal (S50C)
Type	Standard straight bevel gear	
Number of teeth	13	13
Module [mm]	5	
Pressure angle [deg.]	20	
Face width [mm]	16.85	16.85
Face angle [deg.]	52.20	52.20
Root angle [deg.]	37.25	37.25
Inner addendum [mm]	5.00	5.00
Outer addendum [mm]	6.25	6.25
Whole depth [mm]	11.25	11.25
Chordal height [mm]	5.16	5.16
Chordal tooth thickness [mm]	7.84	7.84

み取り, 次に直進の Z 軸でマイクロメータを鉛直方向に一度退避させ, C 軸を角度ピッチだけ回転させた後, Z 軸でマイクロメータを同じ位置にして, 目盛りを読み取る作業を繰り返すことでピッチ誤差を計測した. マイクロメータによる測定結果から, 試作した竹繊維ベベルギヤの隣接ピッチ誤差は $150 \mu\text{m}$ 程度で, JIS B 1704 (旧 JIS) より, 6 級相当であることが確認された.



(a) CAD model

(b) Molded gear

Fig. 6. Bamboo fiber gear.

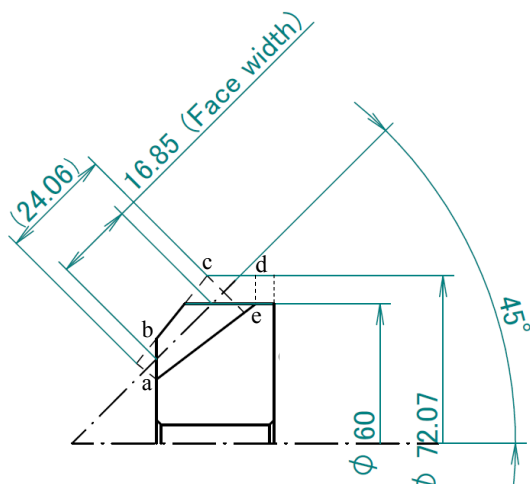


Fig. 7. Definition of face width.

3. 実験装置および解析方法

3.1 駆動試験装置

駆動時の歯車の特性を調べるため, かみあい試験機を用いた. 本実験に使用したかみあい試験機の外観を Fig. 8 に示す. 駆動側のモータ部にブラシレス DC モータ (Oriental motor 製), 被動側のモータ部にトルクモータ (Oriental motor 製, 5TK20CA-A, 最大回転数 9000 min^{-1}) を用いた動力吸収式の負荷かみあい試験機である. 本実験では, 被動側のモータにはギヤヘッド (Oriental motor 製, 5GN25K) を挿入してトルクモータの最大負荷トルク以上の負荷を加えて実験を行った.

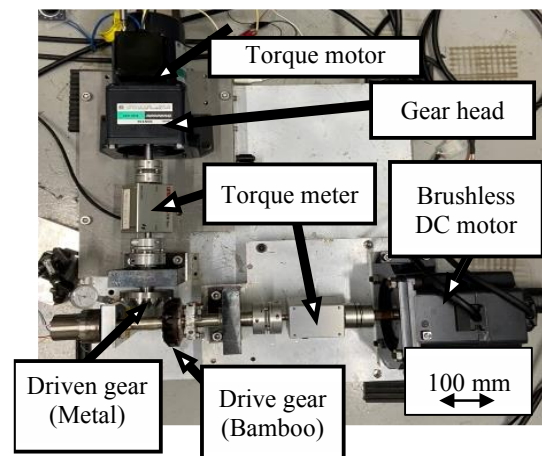


Fig. 8. Gear driving instrument.

トルクモータの出力するトルクを変化させて, 駆動歯車に任意の負荷トルクを与えることができるが, DC モータの回転数により駆動歯車に与えられる負荷トルクも変化する. そこで, 負荷トルクを正確に出すために, 駆動側・被動側の回転軸にトルクメータ (UTM-3Nm, Unipulse 製) とトルクモニタ (TM301, Unipulse 製) を取り付け, 回転時のトルクを測定した.

3.2 歯元ひずみの測定

駆動中の歯車対の動特性を定量的に評価するため, 駆動側の歯元ひずみ測定を行った. なお, 歯元ひずみは回転数には依存しないため, 駆動側の回転数 N は 60 min^{-1} で固定し, 従動側の負荷トルク T は $0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 \text{ Nm}$ の 5 条件とした.

歯車駆動時の歯元ひずみを測定するため, ひずみゲージ, スリップリング, ブリッジボックスを使用

した。ひずみゲージは、スリップリングを介してブリッジボックスに接続した。歯元ひずみの測定はゲージ長 0.2 mm のひずみゲージ（共和電業製）を用い、出力電圧を Fig. 9 (b) のブロックダイアグラムに沿ってスリップリング (T-10, 東測製) を介し [Fig. 9 (a)], 動ひずみ測定器 (DPM-613A, 共和電業製) によって増幅し、FFT アナライザ (DS3100, 小野測器製) で出力した。FFT アナライザに出力された電圧を e_0 [mV] としたときのひずみ ε_0 は次式で計算できる。

$$\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-3} \times (e_0 / V) \times K_s / 2 \quad (1)$$

ここで、 V [mV] は動ひずみ測定器の校正値設定器より、ゲージ率が 2 の場合のひずみ $1000 \mu [-]$ に相当する電圧値である。 K_s はひずみゲージのゲージ率で、本測定に用いたひずみゲージでは 1.82 である。本実験では反かみあい歯面の歯元にひずみゲージを貼り、圧縮ひずみを正とした。

ひずみゲージの歯幅方向の貼付位置は負荷反対側の内端、中央、外端の 3 箇所とした。ひずみゲージは 4 枚のひずみゲージ（アクティブ 1 か所、ダミー 3 か所）によりブリッジを構成した（4 ゲージ法）。内端は端から 6.5 mm、中央は端から 13 mm、外端板部は外端側歯幅の中央の位置に貼り付け、各伝達トルクに対し同様の影響となるように設置した。

Fig.10 に貼り付け位置を示す。

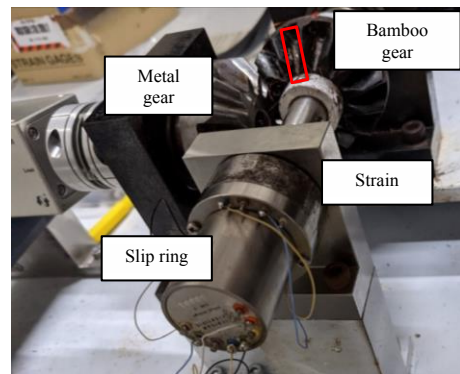
4. 実験結果および考察

4.1 歯元ひずみとかみあい状態の関係

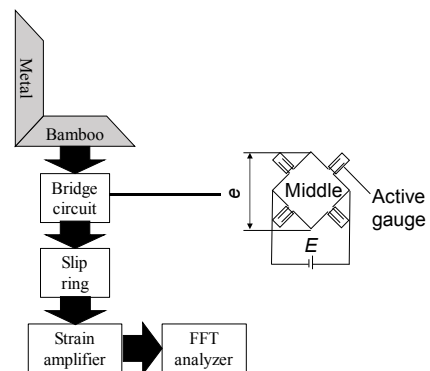
4.1.1 かみあい位置による歯元ひずみ変化

Figure 11 に内端部、中央部、外端部の 3 条件での回転数 60 min^{-1} 、負荷トルク 0.5, 0.7 Nm における歯元ひずみ波形を示す。Figure 11 より、歯元ひずみは内端部・中央部では、かみあい始めからかみあいの進行に伴いかみあい終わりまで増加し、外端板部ではかみあいの進行に伴い微小に減少していることがわかった。これらの傾向は、トルクによらずおよそ一定であることもわかった。

内端部・中央部において、駆動側の歯面であるの

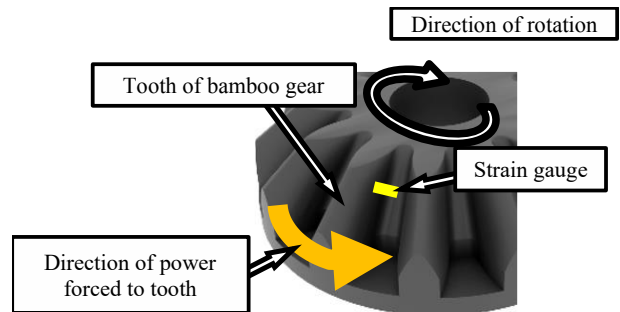


(a) Experimental setup

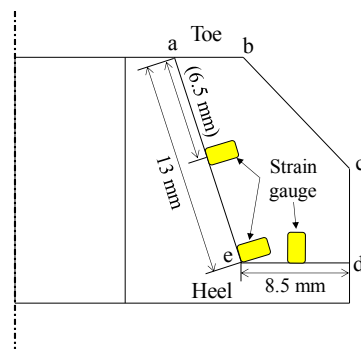


(b) Block diagram

Fig. 9. Measurement of tooth root stress.



(a) Overall view



(b) Detail dimension

Fig. 10. Position of strain gauges.

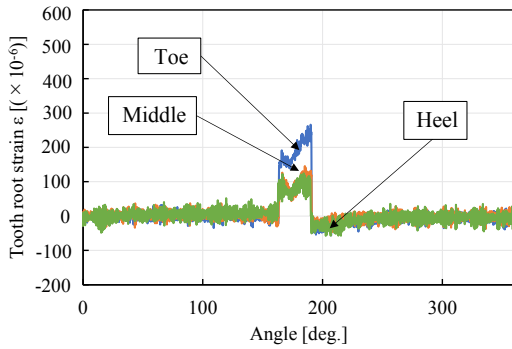
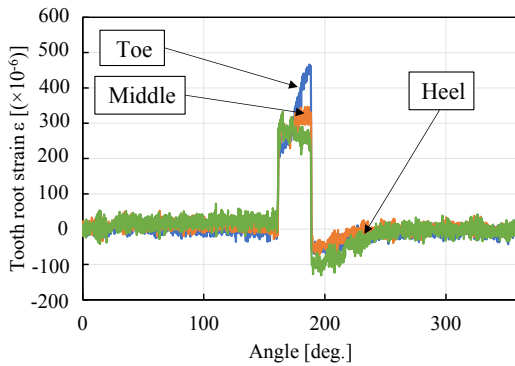
(a) $T = 0.5 \text{ Nm}$ (b) $T = 0.7 \text{ Nm}$

Fig. 11. Tooth root strain with different torque.

でかみあいは歯元から開始して歯先に向かい接触線が移動するため、かみあい開始から次第に曲げモーメントが大きくなるためと考えられる。一方で外端部は ed 線を一種の歯たけと考えた場合、歯元ではなく歯形方向のピッチ線付近で歯を支える板との境界部のひずみである。したがって、かみあい接触線の重心位置とひずみゲージの距離が、かみあい接触線がピッチ線付近すなわちかみあい進行の途中で最初となるため、かみあい開始と終了の midpoint 付近で極小のひずみを示すものと考えられる。

負荷トルクの増加に伴い歯元ひずみの増加がみられたことから、内端部、中央部、外端部の歯元ひずみの最大値を取得しまとめたものを Fig. 12 に示す。さらに、ひずみゲージの貼り付け位置による応力値の誤差を無視し、負荷トルクの増加に対する歯元ひずみの変化を評価するために、本研究における最小の負荷トルク $T=0.2 \text{ Nm}$ での内端、中央、外端

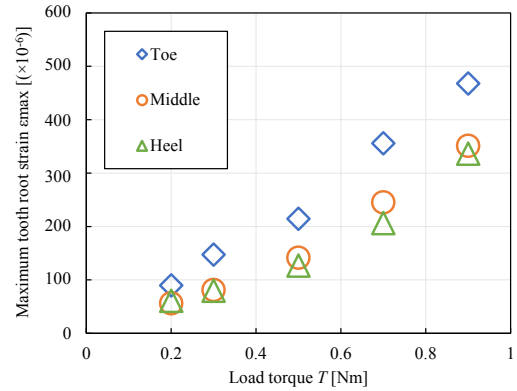


Fig. 12. Maximum tooth root strain.

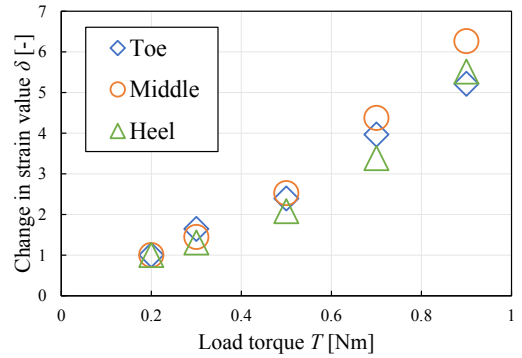


Fig. 13. Load torque and change in tooth root strain.

の歯元ひずみ値を基準とし、各値の変化量を無次元化し、変化率とした結果を Fig. 13 に示す。

Figure 12, 13 より、中央部で最も歯元ひずみの変化が大きいことがわかる。これは、中央部ではトルクの増加に伴い、かみあい接触線上の荷重分布が Fig. 10 における c-d 側に移動しているためと考えられる。また、それに伴い外端部の歯元ひずみも次に増加しており、Fig. 10 の e-d もトルクの伝達のための曲げモーメント分担が増大することがわかった。

4.1.2 実かみあい率の測定

前述の歯元ひずみ測定実験から得られた波形より、歯車のかみあい現象を表す指標の一つで、各歯への荷重分担に大きく影響する実かみあい率を算出する。実かみあい率 γ_r は理論かみあい角 α_{th} [deg.] とかみあい回転角 α_m [deg.] の比によって式 (2) より算出した。

$$\gamma_r = \alpha_m / \alpha_{th} \quad (2)$$

実験に使用した歯車の理論かみあい角 α_{th} [deg.] は、歯車がかみあう最小の角度とし、歯数 Z を用い、式 (3) により算出した。

$$\alpha_{th} = 360/Z \quad (3)$$

また、実際のかみあい時間をかみあい回転角 α_m [deg.] として定義し、式 (4) により算出した。測定した歯元ひずみ波形から接触時間 t_m [s] を算出し、回転速度 N [min⁻¹] を用いた。

$$\alpha_m = N/60 \times t_m \times 360 \quad (4)$$

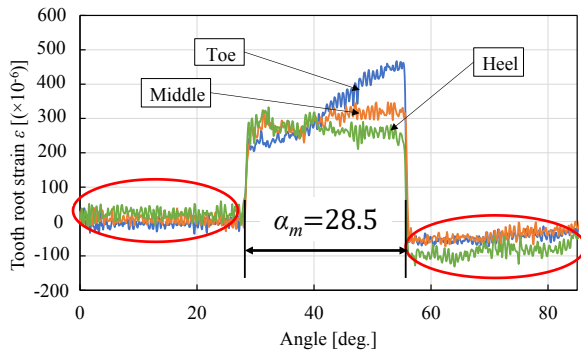


Fig. 14. Tooth root strain on a tooth.

($T = 0.9 \text{ Nm}$, $N = 60 \text{ min}^{-1}$)

Figure 14 に示した $T = 0.9 \text{ Nm}$ のときの歯元ひずみから求めたかみあい回転角より実かみあい率は 1.03 となり、一枚の歯がかみあっている割合が高いものの、動力伝達が成立していることが確認できた。

4.2 かみあい前後の歯の影響

4.2.1 隣り合う 2 枚の歯の関係

Figure 14 より、波形の立ち上がり前後でそれぞれ正負のひずみが検出されており (図中の赤枠)、隣接する歯のかみあいによる影響を受けていると考えられる。そこで、隣り合う 2 枚の歯における歯元ひずみを測定した。

前後の歯の関係を調べるためには連続する 3 枚の歯の歯元ひずみ測定が好ましいが、使用歯車の寸法上、2 枚の貼り付けとした。Figure 15 に貼り付け位置を、Fig. 16 に回転数 60 min^{-1} 、負荷トルク 0.9 Nm における歯元ひずみ波形を示す。

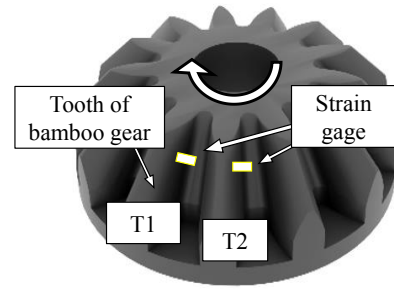


Fig. 15. Position of strain gauges.

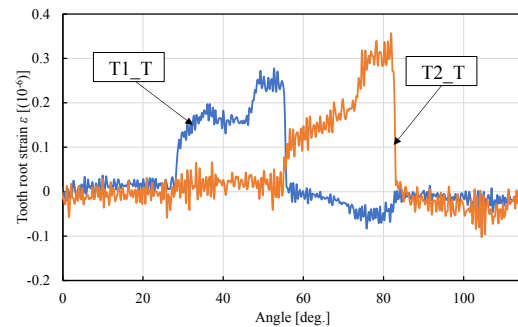


Fig. 16. Tooth root strain on neighbor teeth.

Figure 16 より歯のピッチ誤差の影響により、隣り合う T1_T と T2_T では、最大値に差が生じていることがわかる。さらに T1_T ではかみあいが終了した後、次の T2_T がかみあっている間、引張り側にわずかにひずみが生じている (T2_T でも同様にかみあい終了後のその次の歯のかみあいの影響で引張り側にわずかにひずみが生じている)。これは、かみあい後に次の後続の歯がかみあうが、その時に歯元の基部がせん断変形して、先行歯の歯元には引張りひずみが生じるためと考えられる。すなわち、竹繊維のヤング率が金属よりかなり小さく、隣接歯間がかみあい時の相互変形の干渉が生じやすいためと考えられる。

4.2.2 かみあい面の歯元ひずみの観察

隣の歯の引張の影響を調べるため、1 枚の歯のかみあい (負荷歯面側)・反かみあい (負荷反対歯面側) 両方の歯元ひずみを測定した。Figure 17 に貼り付け位置を、Fig. 18 に回転数 60 min^{-1} 、負荷トルク 0.9 Nm における歯元ひずみ波形を示す。

歯車の歯形は単純な片持ちはりではなく、圧力角 20° を有する形状のために、潤滑した金属歯車において負荷側に対する負荷反対側の歯元応力の比は

1.2 程度となることが一般的である。Figure 18 で両者の歯元ひずみの最大値の比は 1.5 程度であることがわかる。これは無潤滑かつ竹繊維と金属面の接触のために摩擦係数が異なり、かみあい時の歯面のすべり接触時に生じる摩擦力の影響の差と考えられる。また負荷反対側の歯元ひずみは、前節と同様にかみあい終了後に後続歯の影響がみられる。さらに負荷側の歯元ひずみは、先行歯のかみあいにより同様な影響で僅かに圧縮ひずみが生じていることもわかる。ただし負荷反対側に比べて、そのひずみの絶対値は小さいこともわかる。

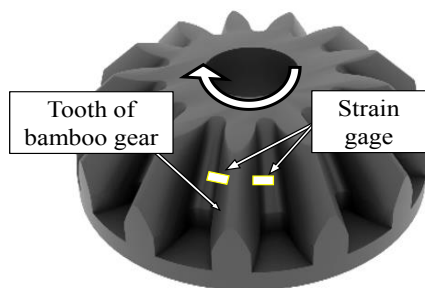


Fig. 17. Position of strain gauges.

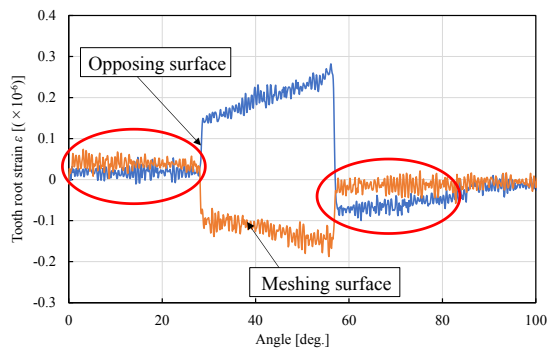


Fig. 18. Tooth root strain on both sides.

5. 結論

マシニングセンタを用いて直刃エンドミル工具を渦巻き状ツールパスとして、ファイン竹繊維を抽出した。さらに金型を用いて、その竹繊維のみを熱圧着して自己接着成形したベベルギヤの駆動時における歯元ひずみ計測よりかみあい状態について検討した。結果を以下にまとめる。

- (1) 竹繊維ベベルギヤはトルク増加に対し、歯当たりの外端側への歯当たり領域の増加傾向を示すことがわかった。
- (2) 歯元ひずみの測定結果から、かみあっている角度を算出することで、実かみあい率を定義した。今実験に使用した竹繊維ベベルギヤの実かみあい率は 1.03 となり、かみあい伝達が成立していることが確認できた。
- (3) 竹繊維歯車はヤング率が小さく隣接する歯間で歯元ひずみの相互干渉が生じやすいことがわかった。

参考文献

- 1) 小出隆夫, 上田昭夫, “プラスチック歯車の用途拡大を目指して”, 精密工学会誌, **83** [10], 903-906 (2017).
- 2) 長屋幸助, 高橋則昭, 戸上和幸, 久米原宏之, 大西章雄, “無潤滑低騒音歯車の開発”, 日本機械学会論文集 (C 編), **69** [681], 186-192 (2003).
- 3) 上野拓, 歯車工学, (共立出版, 東京, 1972), p.183-206.
- 4) 寺島健一, 塚本尚久, 西田知照, “動力伝達用プラスチック歯車に関する研究 (プラスチック歯車の負荷能力計算法)”, 日本機械学会論文集 (C 編), **51** [468], 2161-2166 (1985).
- 5) T. Hirogaki, E. Aoyama, T. Katayama, and S. Iwasaki, “Design Systems for Gear Elements Made of Cotton Fiber-reinforced Plastics”, *Composite Structures*, **66**, 47-52 (2004).
- 6) 野辺弘道, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, “サステイナブル生産システムを指向した IT 応用グリーン金型の開発(資源循環型の竹繊維自己接着製品への適用)”, 同志社大学理工学研究報告, **52** [1], 68-75 (2001).
- 7) K. Ogawa, T. Hirogaki, E. Aoyama, M. Taniguchi, and S. Ogawa, “Fabrication of Binder-free Green Composite Using Bamboo Fibers Extracted with a Machining Center”, *Key Engineering Materials*, **447-448**, 760-764 (2010).
- 8) 小川圭二, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川幸子, 高木陽太, “マシニングセンタ抽出竹繊維のみを用いた資源完全循環型の自己接着成形体の製造と性能評価”, 日本機械学会論文集 (C 編), **78** [787], 943-952 (2012).
- 9) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 西田翔伍, 大石晃裕, 野辺弘道, “マシニングセンタで抽出した竹繊維のみを用いた天然繊維歯車の成形とその特性に関する基礎研究”, 日本機械学会論文集, **80** [818] (2014).

- 10) T. Kawabata, T. Hirogaki, E. Aoyama, and H. Nobe, “Driving Performance of Natural Fiber Gears Made from Only Bamboo Fibers Extracted with a Machining Center”, *International Journal of Automation Technology*, **14** [2] 280-293 (2020).
- 11) 中川正夫, 河端哲也, 宮地奈央, 廣垣俊樹, 青山栄一, 野辺弘道, “マシニングセンタで抽出した竹繊維のみのグリーンベベルギヤの試作と性能の考察”, *設計工学*, **57** [8], 397-414 (2022).