

ONLINE ISSN: 2188-9023 PRINT ISSN: 0919-2948

Volume 57, Number 8, Page 397-414

Category: Paper

Received date: 15 January 2021

Accepted date: 21 February 2022

J-STAGE Advance publication date: 5 July 2022

Publication date: 5 August 2022

Corresponding author: Masao NAKAGAWA (E-mail address: masa74n@gmail.com)

DOI: 10.14953/jjsde.2021.2919

Copyright©2022 Japan Society for Design Engineering

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

Trial Production and Performance Consideration of Green Bevel Gear Made of Bamboo Fiber Extracted by Machining Center

中川 正夫*¹, 河端 哲也*², 宮地 奈央*³, 廣垣 俊樹*⁴, 青山 栄一*⁵, 野辺 弘道*⁶
(Masao NAKAGAWA) (Tetsuya KAWABATA) (Nao MIYACHI)
(Toshiki HIROGAKI) (Eiichi AOYAMA) (Hiromichi NOBE)

Abstract

Nowadays, there is a particular need to develop sustainable and reproducible natural materials to address environmental issues. In this research, we devised a method to extract high-quality and high-precision bamboo fiber using a machining center. Using hot pressing, we produced bevel bamboo gears, which are mechanical elements with complex shapes. This paper describes the characteristics of bamboo fiber gears investigated by experiments. In this study, as a result of investigating the effect of changing cutting and molding conditions for fiber extraction on the parameter and strength of black color, it can be quantified by the black parameter P , fiber length Z , heating temperature T , heating time t_h . In addition, when the fiber length by the finite element method is about a half module as in the case of spur gears, it was found that the maximum bending strength of the teeth was exhibited by the compatibility of the fiber reinforcement effect and forming.

Key words

bevel bamboo gear, black color parameter, strength, sustainable manufacturing system, hot press molding

* 1 正会員, 交通安全環境研究所(〒182-0012 調布市深大寺東町7-42-27), masa74n@gmail.com

* 2 非会員, 同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程, kwbtttyaaaaeua@gmail.com

* 3 非会員, 同志社大学大学院理工学研究科機械工学専攻, 博士前期課程, miyacchixn@gmail.com

* 4 正会員, 同志社大学理工学部, thirogak@mail.doshisha.ac.jp

* 5 非会員, 同志社大学理工学部

* 6 非会員, 三藤機械製作所(〒374-0052 館林市栄町16-1)

1 緒 言

近年プラスチック歯車の用途の拡大の取り組み¹⁾がなされてきている。プラスチック歯車の利点として、軽量、低騒音、無潤滑状態での使用が可能であり^{2), 3)}、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ても利用できることなどがある^{4), 5)}。しかしプラスチック歯車は衝撃荷重に弱く、使用材料の強度や剛性が低く、許容伝達トルクが低いために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、かつ強度・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) 歯車の利用が進められてきた⁶⁾。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産可能 (サステイナブル) な材料の開発が進められている。具体的な例としては竹、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⁷⁾。その中でも竹は日本に多く自生し成長が速いので環境負荷が小さい。その繊維 (維管束) は比強度・比剛性が高く、重量もあまり無いことからその応用が期待されている。

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解除去しているために維管束にも多少の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、本研究では化学的処理を一切おこなうことなく、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加熱加圧時に反応することで自己接着する。したがって本論文では、マシニングセンタを用いたエンドミル加工で、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維管束を竹繊維 (維管束+柔細胞) として抽出し、それらを竹繊維と称する。マシニングセンタでより精度よく切削し、その切り屑である竹繊維を抽出する手法 (2.2 節で詳述) を確立し、グリーン金型技術⁸⁾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⁹⁾。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性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ド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¹⁰⁾。また、近年の食品加工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などでの人体への影響も懸念されてきている。そこで先行研究では、歯面からの摩耗粉が生じて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平行軸系平歯車を開発し、その成形方法と歯の曲げ強度¹¹⁾やその駆動特性の解明¹²⁾を遂行してきた。一方で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判明してきた。そこで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た。

しかしながら、二次元的な形状である平歯車に比べ、ベベルギヤは形状が三次元的でより複雑であるため、竹繊維のみの自己接着成形において使用する適切な繊維形状とその成形条件の解明が必要と考えられ、さらに成形における自己接着作用の進行度合い (焼き色) と歯の曲げ強度の関係も明らかにする必要性が生じてきた。そこで本報では、新たに竹繊維 100% 自己接着のグリーンベベルギヤの成形のための金型を設計試作した後、成形に用いる繊維形状と成形条件の関係、さらにリグニンの自己接着作用の進行度合いと歯の曲げ強度の関係を考察したので結果を報告する。

2 提案するサステイナブル生産システムと竹繊維ベベルギヤの成形

2.1 竹繊維ベベルギヤの製造システム

近年、環境問題を軽減するために天然資源を使用して持続可能な材料が開発された^{13), 14)}。竹は他の天然

素材よりも速く成長し、最大成長率はタケノコの時期の最速で 1 日に 1 m にも達する。他の天然資源は、スギやクロベなど木材がよく使用されるが、2 年に 1 m しか成長しない。さらに、竹繊維は、ガラス繊維相当またはそれを凌駕する高い比強度と比剛性も備えている^{15), 16)}。そこで、優れた竹の成長性とその繊維に着目した図 1 にしめす持続可能な製造システムを提案¹⁰⁾してきた。

図 1 から竹の素材は自然林から切り出されて持ち込まれるが、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の竹繊維が配勾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。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（さらに加工温度モニタにより繊維の熱的ダメージも制御してそのまわりに十分なリグニンが残る）された均質な高品質ファイン竹繊維を得ることができる。その後、抽出されたファイン繊維はホットプレスで竹繊維のまわりのリグニンのメイラード反応で熱圧着し、天然竹 100% 製品として成形することができる。提案する手法では、持続可能な製造のための次の貢献が期待される。

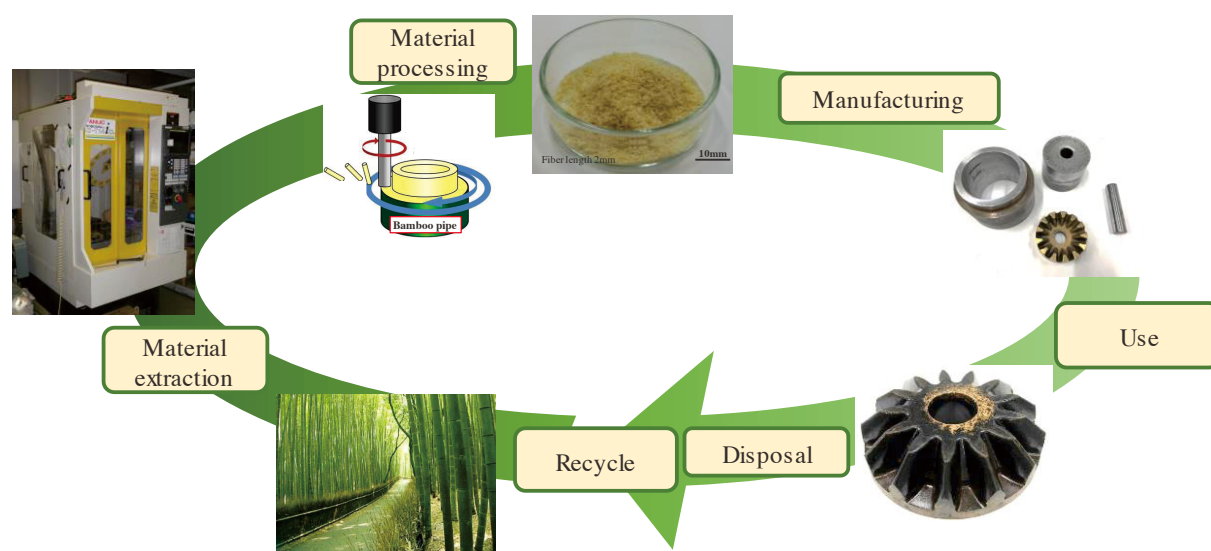


Fig. 1 Sustainable manufacturing system focusing on natural growth of bamboo

1. 竹の高い成長率。
2. 成長中に大気中の二酸化炭素 (CO₂) を吸収。
3. 小型機械を用いた繊維抽出およびホットプレス成形による環境負荷の低減。
4. エコ竹繊維製品の廃棄の容易さと高いリサイクルの可能性。

特に廃棄ステージでは当該製品は天然竹繊維を熱圧着しただけの 100% 竹材のため、そのまま竹林の地中に埋めれば肥料として容易にリサイクルでき、また焼却処分でも成長中の炭酸ガスの吸収とバランスがとれるため、カーボンニュートラルとなる。さらに天然の木質は成木まで数十年が必要であり、一般的な製品ライフサイクル（例えば 2～5 年）より長く、さらなるその積極的な工業利用は天然資源の枯渇の問題を生じる。一方、竹材は成竹まで 2～5 年程度であり、製品のライフサイクルとも合致して完全天然資源の循環型の製造システムの構築を実現できる可能性が高い。さらに竹は日本に多く自生しており、日本に残る未利用天然資源の活用としても有望である。ただし繊維の抽出に用いる工作機械として小型機を推奨するが、高品質な竹繊維を節間で抽出（後述の図 3）するため、節間の距離（300～400mm）の加工ストロークを有する程度が作業能率面では望ましい。したがって、本システムより製造が可能な対象製品の拡大のための新たな技術開発は、持続可能な社会の構築に向けての重要となるものと考えられる。

2.2 マシニングセンタによる竹繊維の抽出方法

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竹繊維を抽出するものとする。竹繊維の抽出方法は、主に以下の 3 種類とされている¹⁷⁾。

1. 化学薬品を用いて竹繊維と柔細胞組織を分離する方法。
2. 竹に切削加工などの機械加工を施し、繊維状に取り出す方法。
3. 竹を高圧・高温の水蒸気で蒸らしたのち、大気中に開放することで竹を爆破し繊維状にする方法。

本研究では 2 番の機械加工による抽出方法を採用する。竹筒の断面には図 2 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。さらに、この維管束鞘を損なうことなく自生している竹をマシニングセンタ（ロボドリル α-T14iDs, ファナック製）に設置し、維管束鞘分布に沿って、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竹繊維として抽出する。化学的処理を一切行わないことで、竹 100% の環境に良い成形品が期待される。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 φ6 mm 直刃ハイスエンドミル（CPM-STDN, OSG 社製）を使用する。図 3 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。繊維長さはエンドミルの軸方向切り込みで設置した。切削速度は竹繊維の熱的ダメージレスにするため 80℃ 以下になるように 94m/min に設定している¹⁸⁾。図 1 のシャーレ中のように、均質な繊維を得ることができるが、それでも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ため得られた切り屑をふるい網で分級した後に成形した。ふるいの目開き 500 μm, 線径 315 μm を通過しなかったものを竹繊維 (Large), 目開き 500 μm, 線径 315 μm のふるい網を通過し、目開き 212 μm, 線径 140 μm のふるい網を通過しなかったものを竹繊維 (Medium), 目開き 212 μm, 線径 140 μm のふるい網を通過したものを竹繊維 (Small) と定義する。

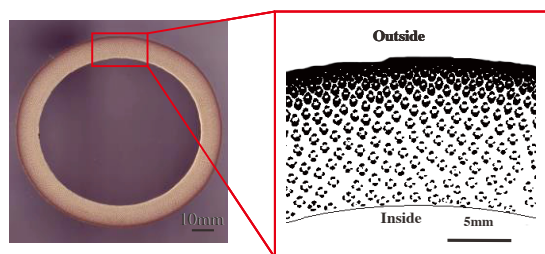


Fig. 2 Photograph of cross section of bamboo pipe

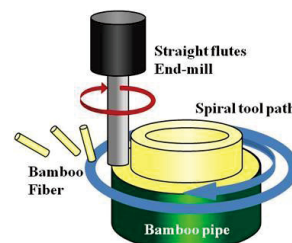


Fig. 3 Spiral tool path

また、図 4 はエンドミルの軸方向からみた幾何学的な切断構成をしめす。ここで、 f_t は切断面の点における接線方向の一刃当たりの送り速度、 f_{en} はエンドミル送り方向のエンドミル中心の一刃当たりの送り速度、 r はエンドミル半径、 R_v はサイクルごとの半径方向の切断の深さ、 R_b は切断後の竹の半径、 α は f_t と f_{en} 方向の間の角度、 α_{en} は切断角度とする。図 4 から切断アーク長 L と最大厚さ h は、式 (1)、式 (2) より算出される¹⁸⁾。

$$L = r \cdot \alpha_{en} \quad (1)$$

$$h = f_r \cdot \sin(\alpha_{en} + \alpha) \quad (2)$$

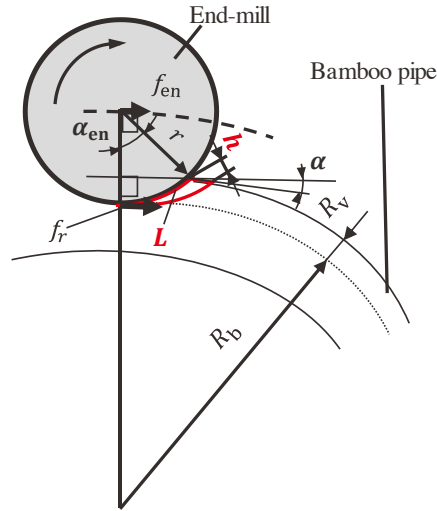


Fig. 4 Convex contour cutting

図 4 にしめすように、竹パイプの中心、エンドミルの中心、およびエンドミルの刃先位置より、式 (3) および式 (4) の関係が導かれる。

$$r \cdot \sin \alpha_{en} = (R_b + R_v) \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$r \cdot \cos \alpha_{en} + (R_b + R_v) \cdot \cos \alpha = R_b + r \quad (4)$$

f_r と f_{en} の比が、渦の中心とエンドミルの中心間の距離、渦の中心とエンドミルの刃先間の距離の比に等しいことから式 (5) となる。

$$\frac{f_{en}}{f_r} = \frac{R_b + r}{R_b + R_v} \quad (5)$$

ここで、式 (2)、式 (3)、式 (4)、および式 (5) から式 (6) が得られる。

$$h = f_{en} \cdot \sin \alpha_{en} \quad (6)$$

したがって、送り速度 F 、主軸回転数 S 、刃数 H を用いて、式 (7)、式 (8) が得られる。

$$L = r \cdot \arccos \frac{r - R_v}{r} \quad (7)$$

$$h = \frac{F}{S \cdot H} \sqrt{\frac{R_v}{r} \left(2 - \frac{R_v}{r} \right)} \quad (8)$$

また、各切削条件で抽出された竹繊維をランダムに選択し、繊維直径を光学顕微鏡（OPTIPHOT-100, Nikon 製）で測定をおこない算出した。切断後の断面は複雑な形状をしていたため、等価直径 D_e は式 (9) より算出した。

$$D_e = \frac{(L + h)}{2} \quad (9)$$

2.3 竹繊維ベベルギヤの成形

竹繊維ベベルギヤの成形には、小型熱プレス機（AH-2003, アズワン社製）を用いて、抽出した竹繊維を金型（図 5）に流し込み加熱・加圧し成形をおこなった（図 6）。金型内の竹繊維は加熱、加圧することによって竹繊維の柔細胞に多く含まれるリグニンが反応することで自己接着され、竹繊維ベベルギヤの製造が可能である。金型はパンチダイス構造である。パンチ・ダイスホルダー、ガイドピン（図 5, 6 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、ダイスホルダーの上にダイスホルダースペーサーをセットすることで、厚さの異なる歯車の製造に対応することができる。また、厚さ 25mm のダイス（図 5, 6 中の III）は竹繊維の溶着を防ぐため、素材は大同特殊鋼の冷間ダイス鋼 DCMX を使用し、表面はチッ化処理後、TiN コーティングを施している。

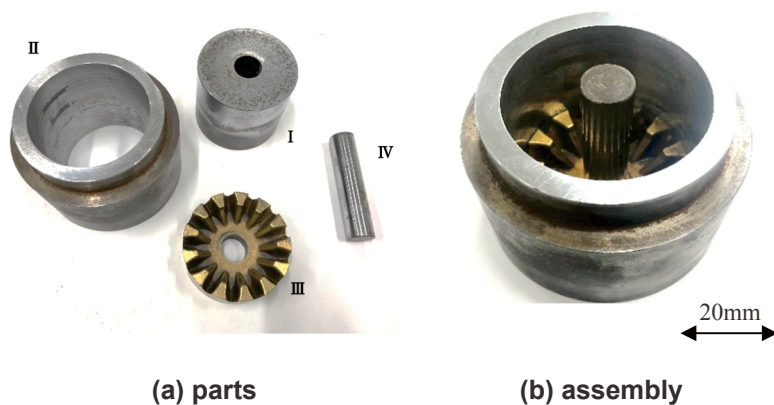


Fig. 5 Mold of Bamboo fiber gear

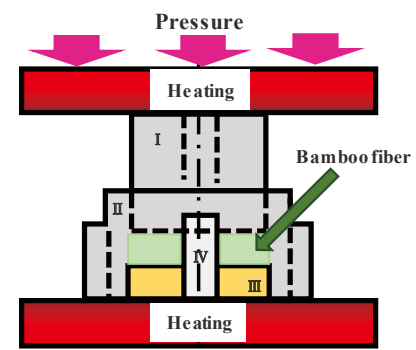


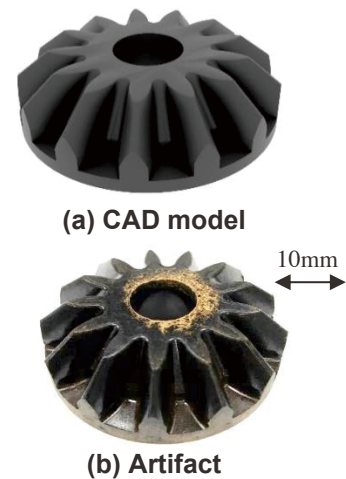
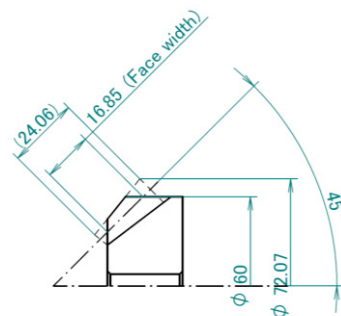
Fig. 6 Image of hot press forming

2.4 試作する竹繊維ベベルギヤ

試作する竹繊維ベベルギヤと強度試験に用いた金属歯車(S50C)の諸元を表 1, CAD モデルと実際に成形した竹繊維歯車を図 7 にしめす。ここで、成型に際し竹繊維の質量を管理して 50g に固定した。また先行研究の平歯車¹¹⁾と同様に、精度は JIS-N9 程度であった。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。歯幅は図 8 のように定義した。図 8 は図 7 (a) にしめす CAD モデルの歯の部分の軸方向に切断した断面形状を図示した。

Table1 Dimension of gears

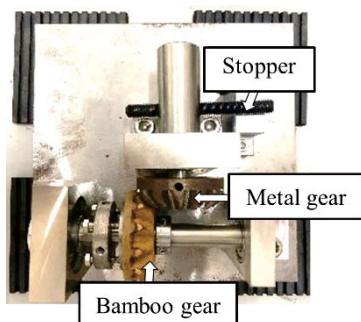
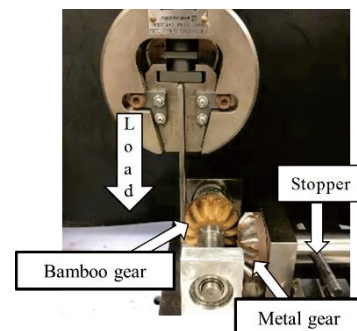
	Pinion	Gear
Material of gear	Bamboo	Metal (S50C)
Type of gear	Standard straight bevel gear	
Number of teeth	13	13
Module [mm]	5	
Pressure angle [deg.]	25	
Face Width [mm]	16.85	16.85
Face angle [deg.]	52.20	52.20
Root angle [mm]	37.25	37.25
Outer addendum [mm]	5.00	5.00
Outer dedendum [mm]	6.25	6.25
Whole depth [mm]	11.25	11.25
Chordal height [mm]	5.16	5.16
Chordal tooth thickness [mm]	7.84	7.84

**Fig. 7 Bamboo fiber gear****Fig. 8 Definition of face width**

3 歯の曲げ強度の評価実験方法

3.1 強度試験機

強度試験には図9に示す装置を卓上形精密万能試験機オートグラフ（AGS-X，島津製作所製）に設置し実験をおこなった．従動側の金属歯車(S50C)を固定して荷重を測定した．試験中の様子を図10に示す．クロスヘッドスピードは3mm/minとし，ベベルギヤの歯幅全体の歯面の歯先に歯面に垂直に荷重がかかるようにした．強度試験は各成形条件における竹繊維ベベルギヤを1つ用い，そのうち3枚の歯で試験をおこなうことで各歯のばらつきについて考慮した．

**Fig. 9 Experimental device****Fig. 10 State of experiment**

3.2 ベベルギヤの応力

本論文で使用する竹繊維歯車の歯形形状を図 11 にしめす。歯車形状は標準すぐばかさ歯車を使用した。曲げ応力は強度試験で測定した許容荷重 N と図 12 で定義した歯先から破断面までの距離 x から曲げモーメント M を式 (10) より算出した。

$$M = Nx \quad (10)$$

ここで本ベベルギヤは図 12 にしめすように外端部に支持部を有するが、ベベルギヤでは内端から外端に沿ってモジュールが変化して強度が増すためその影響は小さいとして、ここでは支持部の影響を無視した簡易モデルとして検討した。

また、歯の破断面を図 12 のように台形と仮定し、式 (11) の断面係数 V を算出した。ここで b_1 は破断面を台形としたときの下底、 b_2 は上底、 l は高さとする。

$$V = \frac{l^2(b_1^2 + 4b_1b_2 + b_2^2)}{12(2b_1 + b_2)} \quad (11)$$

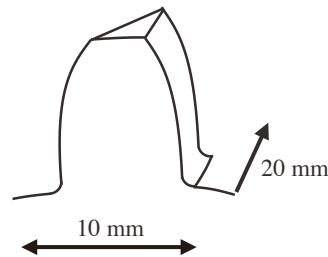


Fig. 11 Tooth Shape



Fig. 12 Fracture surface of bamboo fiber gear

式 (10)、式 (11) より式 (12) の破断面の歯面で生じる最大曲げ応力 σ_{max} を算出した。

$$\sigma_{max} = \frac{M}{V} \quad (12)$$

次に許容荷重 N と破断面の面積 A より式 (13) のせん断応力 τ の算出をおこなった。

$$\tau = \frac{N}{A} \quad (13)$$

3.3 拡散反応に基づく焼き色パラメータ P

竹繊維は適切な加熱・加圧によりリグニンがメイラード反応することにより結合するため、熱圧着の作用は拡散的に反応すると仮定する¹⁹⁾。拡散反応では、一般に反応速度は絶対温度 T に比例して増大し、反応に要する時間 t_h の逆数に比例するので、次式が成立する。ここで、 c は定数とする。

$$\frac{1}{t_h} = ce^{\frac{c}{T}} \quad (14)$$

拡散反応が、温度 T_1 で t_1 時間加熱すると温度 T_2 で t_2 時間に相当すると仮定し、式 (15) を算出する。

$$T_1(\ln t_{h1} + \ln c) = T_2(\ln t_{h2} + \ln c) \quad (15)$$

ここで、 $\ln c = C$ とすれば、式 (15) は式 (16) となる。

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\ln t_{h2} + C}{\ln t_{h1} + C} \quad (16)$$

C の値は繊維長さ Z によって変化し、式 (17) で表すことができる。

$$C = -0.05Z - 2.62 \quad (17)$$

歯車の強度の変化はリグニンの反応の拡散度合いによって主に決定され、式 (18) で表される。

$$T(\ln t_h + C) = P \quad (18)$$

すなわち、この式によって拡散反応が繊維長さ Z 、加熱温度 T と加熱時間 t_h の関係で表され、その進行度合いを視覚的に成形後の表面の色の変化（焼き色パラメータ P ）として定量化することができる。

4 実験結果および考察

4.1 成形条件の検討

4.1.1 加熱温度 T による成形体への影響

先行研究¹¹⁾の平歯車と同様に繊維長さ $Z=2\text{mm}$ を基準とし、さらにその繊維長さを $Z=1\sim 4\text{mm}$ に変化させた場合についても検討した。さらに基準の繊維長さにおいては、抽出した竹繊維をさらに分級した竹繊維 (Large)、竹繊維 (Medium)、竹繊維 (Small) を用いて同条件で成形をおこなった。そのときの成形条件を表 2 にしめす。ここで、小型プレス機の上部の温度を T_t 、下部の温度を T_b とする。また、竹繊維 (Large)、竹繊維 (Medium)、竹繊維 (Small) を用いて成形されたベベルギヤの写真を図 13 にしめす。

Table 2 Molding conditions

Fiber length Z [mm]	1, 2, 2.5, 3, 4
Mass M_m [g]	50
Pressure p [MPa]	20
Temperature of top T_t [°C]	200
Temperature of bottom T_b [°C]	200
Heating time t_h [min]	20, 30, 40
Air cooling time t_c [min]	30



(a) Large



(b) Medium



(c) Small

Fig. 13 Bamboo fiber gears

竹繊維が細かいほど成形体の表面の色が黒色に変化していることがわかるが、図 13 (a), (b) では、材料である竹繊維そのものの色が残っていることが確認できる。また、竹繊維 (Large) の歯先 (図 14) は半径が極小で圧力が全体に行き届いていないことや裏面 (図 15) は熱が芯まで行き届いていない歯が存在し、図 14 中の赤丸部などは焼き色が薄いことから熱を伝導しきれておらず、反応が進んでいないことがわかる。その様子は図 15 の円周上でも歯底部の箇所は黒色化が進むが、歯部ではそうでなく、円周に沿って交互に濃淡が生じていることからわかる。竹繊維 (Small) では成形体の表面はなめらかとなるが、竹繊維 (Medium) に比べて竹繊維による強化の効果が十分でなく強度が高くないことが予備実験で判明しているため、竹繊維 (Medium) を用いて主たる成形実験をおこなった。



Fig. 14 Side of the gear (Large)

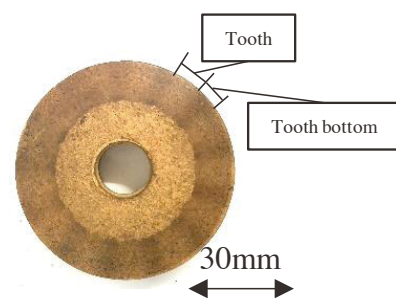


Fig. 15 Back of the gear (Large)

4.1.2 基準となる竹繊維の分級による成形体への影響

竹繊維 (Medium)、繊維長さ $Z=2\text{mm}$ 、加熱温度 $T_t=T_b=200^\circ\text{C}$ 以上で成形を遂行した場合、 $T_t=T_b=220^\circ\text{C}$ において金型の間から加水分解された竹が漏れたので加熱加圧を中断し、空冷して取り外すと図 16 のように歯の一部が明らかに割れてしまった。次に、竹繊維の熱重量解析 (TGA: Thermal Gravimetric Analysis)

と示差熱分析 (DTA: Differential Thermal Analysis) の実験結果を図 17 に、各温度における竹繊維の加熱時間 t_h と重量損失の割合を図 18 にしめす。図 17 において Fiber と表している値が、竹繊維 (Medium) の結果である。



Fig. 16 Bamboo fiber gear ($Z=2\text{mm}$)

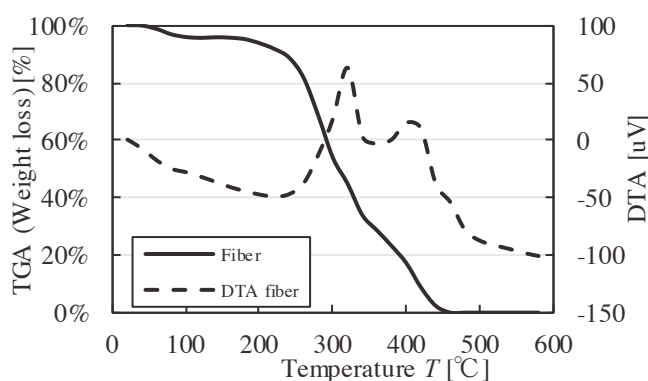


Fig. 17 TGA and DTA graphs for large and small fibers

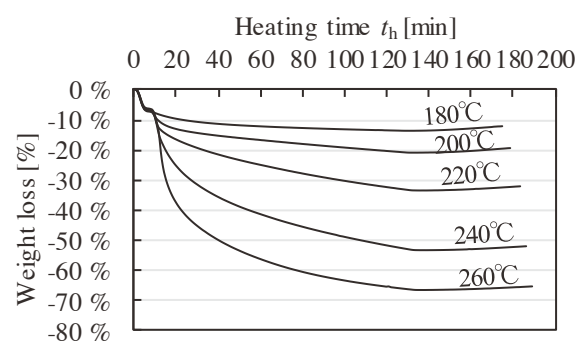


Fig. 18 Weight loss of bamboo fiber with time at bamboo different temperatures

図 18 から 220°C の高温で加熱をおこなうと加熱時間 $t_h=10\text{min}$ 付近で急激に減少することがわかる。また、図 17 から 200°C を超えてしまうと竹繊維に含まれるヘミセルロースの分解残留率が急激に減少する。そのことから 200°C を超えた成形にはヘミセルロースが減少してしまい、竹繊維の炭化が生じてしまうことが判明した。これより、竹繊維歯車を成形する際に温度は 200°C での成形が適していることがわかる。

4.1.3 加熱時間 t_h による成形体への影響

竹繊維 (Medium)、繊維長さ $Z=2\text{mm}$ 、加熱温度 $T=200^{\circ}\text{C}$ で加熱時間 $t_h=20, 30, 40\text{min}$ での成形をおこなった。実際に成形した歯車の写真を図 19 にしめす。図 19 より、加熱時間 t_h が長くなると焼き色が全体的に黒く (濃く) なることがわかる。特に図 19 (c) は大きく焼き色に変化していることがわかる。これは、図 18 にしめされるように重量損失が 15% 付近に位置しており、ヘミセルロースが若干減少を開始したものと考えられ、表面のツヤも減少し脆く、強度が大幅に減少する可能性が考えられる。したがって竹繊維歯車の成形は、その現象が生じるより少し短い時間である加熱時間 $t_h=20, 30\text{min}$ が適していることがわかった。



Fig. 19 Bamboo fiber gears.

4.1.4 焼き色パラメータ P と繊維長さ Z の関係

次に分級することなく、抽出した繊維長さは $Z=1\sim 4\text{mm}$ で表 2 と同じ条件で成形をおこなった。実際に成形された歯車の表面を撮影した写真を図 20 にしめす。ここで、焼き色パラメータ P の測定にあたり、デジタルマイクロスコープ (Dino-Lite Premier2 S Polarizer, OPTO Science, Inc. 製) を用いて、倍率 50 で $6\times 8\text{mm}$ の面を 3 箇所撮影した。各画像を MATLAB でグレースケール化 (式 (19) 参照²⁰⁾) し、その値を Y とした。ここで、 R , G , B は入力カラー画像のリニア RGB 値である。70% を閾値として二値化 (白:100%, 黒:0%) した全画素数中の黒の割合が焼き色パラメータ P である。各画像の焼き色パラメータ P を平均し、各条件の焼き色パラメータ P を求めた。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (19)$$

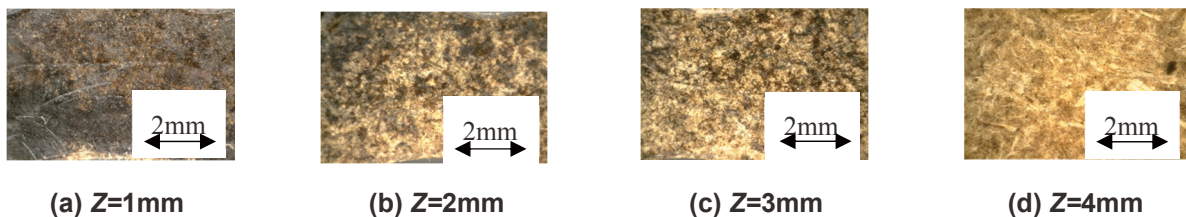
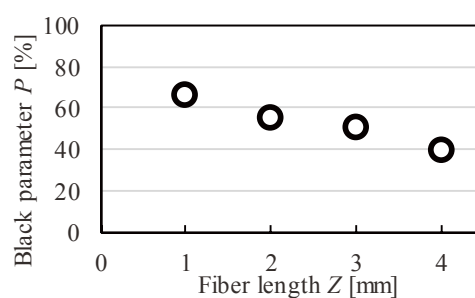


Fig. 20 Bevel gear surface

Fig. 21 The relation between black parameter P and fiber length Z

焼き色パラメータ P と繊維長さ Z の関係を図 21 にしめす。図 21 から繊維長さ Z が長くなるほど焼き色パラメータ P が低下していることがわかる。また、繊維長さ $Z=4\text{mm}$ では成形時、表面のツヤも全く見られず他の繊維長さ Z とは大きく異なることがわかる。金型温度が一定であっても、長い繊維ほど成形時の初期におけるかさ密度が低く、成形体の内部の空隙が大きく熱抵抗が高いものと考えられ、その結果として金型表面からの成形体のベベルギヤの中心部に向けて伝熱が不十分となり、ベベルギヤ表面のみ過剰に反応が進むものと考えられる。その度合いが焼き色パラメータとして定量化されているものと考えられる。逆に焼き

色パラメータ P は加熱温度 T 、加熱時間 t_h 、繊維長さ Z を式 (18) に代入すると目安となる有効な指標となることもわかる。

4.2 繊維長さと曲げ強度の関係

繊維長さ Z を変更し、竹繊維(Medium)を用いて、表 3 にしめされた成形条件でおこなった実験結果を図 22 にしめす。ここでは主軸速度 $S=5000\text{min}^{-1}$ (切削速度=94.2m/min)、送り速度 $F=1000\text{mm/min}$ 、半径方向への切り込み量 $R_v=0.05\text{mm}$ の切削条件で抽出した竹繊維を用いて成形した歯車の歯 3 枚を円周等倍で測定して平均値を算出した。プロット点のバーは平均に用いた 3 点の範囲をしめしている。

モジュール 4 の竹繊維歯車 (平歯車) の強度試験では半モジュールの繊維長さ $Z=2\text{mm}$ が、長繊維化による強化効果と歯元への成形性の確保のバランスより、最も強度が高いことが先行研究¹²⁾で明らかとなっている。本論文の竹繊維歯車 (ベベルギヤ) においても、その外端部モジュールは 5 であり図 22 からばらつきを考慮しても半モジュールの繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ で平歯車と同様に強度が上昇していることもわかる。成形性の指標として繊維長さと表面粗さの関係を図 23 にしめす。図 23 より繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ までは表面粗さが $1\mu\text{m}$ 程度であり、成形性がよい。したがって、ベベルギヤにおいてもモジュールの半分の繊維長さ Z が、長繊維化による強化効果と成形性のバランスが良いことが判明した。また、図 22 (b) では図 22 (a) と比較すると、ばらつきを考慮しても半モジュール程度の繊維長さで強度が上昇していることもわかる。

Table 3 Molding conditions

Fiber length Z [mm]	1, 2, 2.5, 3, 4
Mass M_m [g]	50
Pressure p [MPa]	20
Temperature of top T_t [°C]	200
Temperature of bottom T_b [°C]	200
Heating time t_h [min]	20, 30
Air cooling time t_c [min]	30

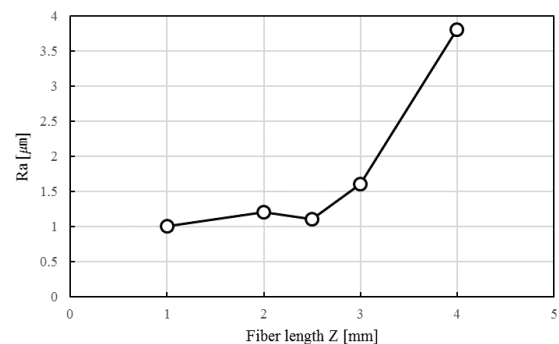
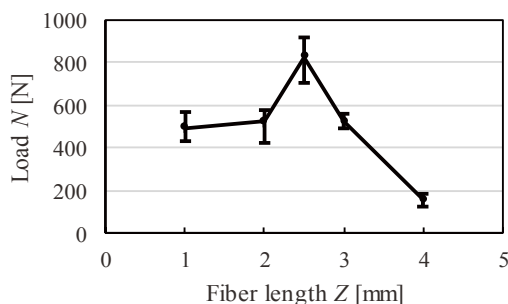
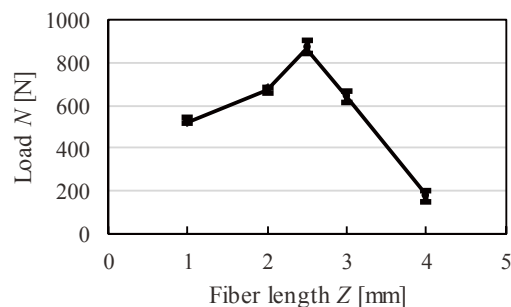


Fig. 23 The relation fiber length and roughness



(a) $t_h=20\text{min}$



(b) $t_h=30\text{min}$

Fig. 22 The relation between Load N and fiber length Z

4.3 繊維断面の等価直径 D_e と曲げ強度の関係

切削条件により繊維断面が大きく変化し、強度に影響があると考え、繊維断面に着目した。半径方向への切り込み量 $R_v=0.05\text{mm}$ 、送り速度 $F=2000\text{mm/min}$ のときの各主軸速度 S と平均直径 D_e の測定結果を図 24 にしめす。また予備実験により、主軸回転速度 $S=10000\text{min}^{-1}$ (切削速度 188m/min) までは加工温度が

80℃以下を維持できることを確認している．さらに半径方向への切り込み量 $R_v = 0.05\text{mm}$ ， $S = 5000\text{min}^{-1}$ のときの各送り速度 F と平均直径 D_e の測定結果を図 25 にしめす．

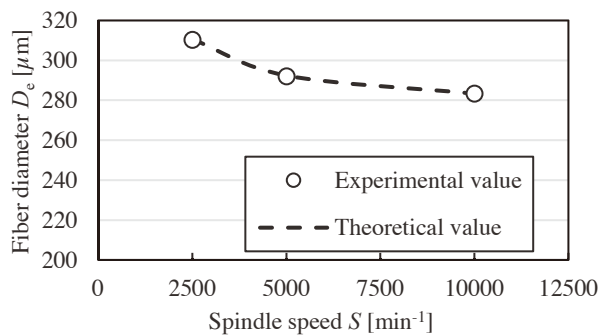


Fig. 24 The relation between spindle speed S and fiber diameter D_e ($F=2000\text{ mm/min}$)

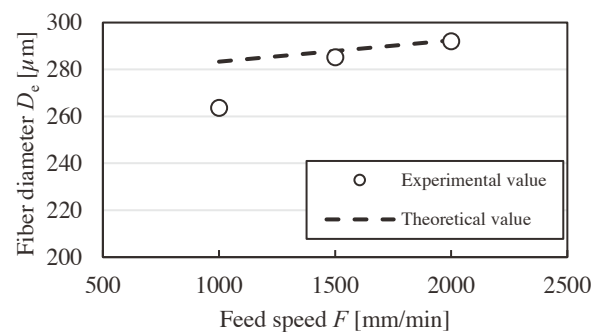
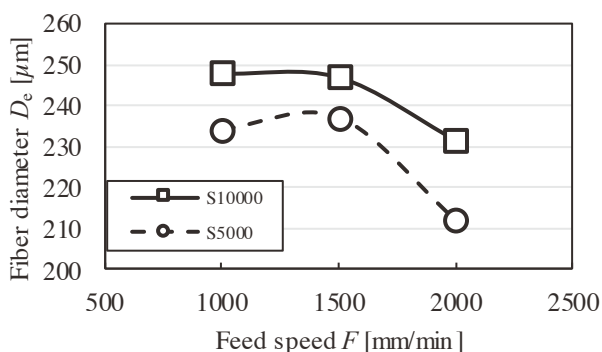
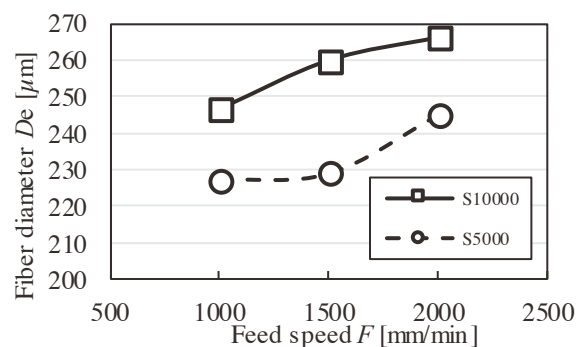


Fig. 25 The relation between feed speed F and fiber diameter D_e ($S=5000\text{ min}^{-1}$)

すべての切削条件下においても、最大厚さ h は半径方向への切り込み量 R_v が一定のため変化はなかった．図 24 から主軸速度 S が上がるにつれて繊維直径 D_e が小さくなっており、これは一刀当たりの竹に接する時間が短くなることから切断アーク長 L が短くなった．また、図 25 から送り速度 F が上がるにつれて繊維直径が大きくなっていることがわかる．これは送り速度 F を上げることで一刀当たりの切削時間長くなったためこのようになったと考えられる．図 25 から送り速度 $F=1000\text{mm/min}$ のとき理論値と大きく離れていることがわかる．これは送り速度 F が小さいと切削角度が小さくなることから²⁾、繊維の先端が極小となるため破断したと考えられる．また、図 24、25 から 主軸速度 $S=10000\text{min}^{-1}$ ，送り速度 $F=2000\text{mm/min}$ のときの切削条件と主軸速度 $S=5000\text{min}^{-1}$ ，送り速度 $F=1500\text{mm/min}$ のときの切削条件ではおおよそ同じ繊維直径 D_e が抽出できることがわかる．半径方向への切り込み量 $R_v=0.01$ ， 0.1mm とした測定結果を図 26 にしめす．



(a) $R_v=0.01\text{mm}$



(b) $R_v=0.1\text{mm}$

Fig. 26 The relation between feed speed F and fiber diameter D_e .

図 26 (b) は繊維直径 D_e が切削条件から導かれる理論値と同様に増加しているにもかかわらず、図 26 (a) は減少している．これは半径方向への切り込み量 R_v が小さいため、送り速度 F を上げると繊維が破断したためであったと考えられる．各主軸速度 S ，各送り速度 F における繊維直径 D_e は変化した、切断アーク長 L と最大厚さ h のアスペクト比 ($=h/L$) は変化していないため、繊維断面のみ考察をおこなったが、半

径方向切り込み量 R_v における切断アーク長 L と最大厚さ h は大きく変化しており、繊維断面観察後、同切削条件で成形し、強度試験をおこなった。各半径切り込み量 R_v における切断アーク長 L と最大厚さ h のアスペクト比を図 27 に、強度試験結果を図 28 にしめす。また、実際に割れた歯を図 29 に、各半径方向切り込み量の割れた歯の質量 M_t と破断時の許容荷重 N の関係を図 30 にしめす。

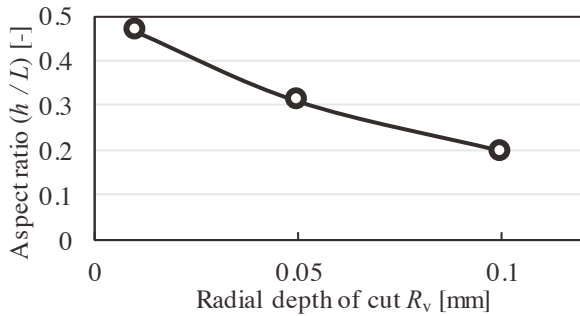


Fig. 27 Fiber diameter aspect ratio due to changes in R_v ($S=5000\text{min}^{-1}$, $F=1000\text{mm/min}$).

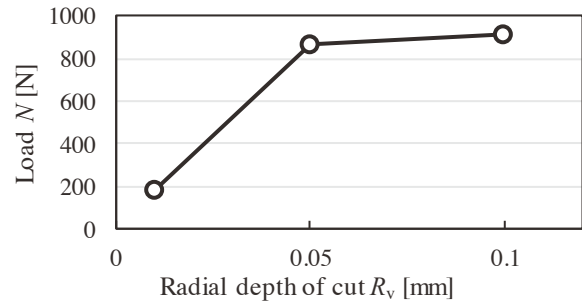


Fig. 28 The relation between Load N and Radial depth of cut R_v ($t_h=30\text{min}$).

図 27 から、半径方向への切り込み量 R_v を小さくすることによって切断アーク長 L が小さく、最大厚さ h が大きくなることでそれぞれの値が近づきアスペクト比が小さくなることがわかる。図 28 から半径方向への切り込み量 R_v が大きいほど（アスペクト比が小さいほど）竹繊維歯車の強度が高くなっていることがわかる。また、図 29 (a) では強度の低い竹繊維歯車はピッチ点より歯先側で破断しているのに対して、図 29 (b), (c) では歯元（特に外端側でその傾向が強い）で破断していることがわかる。これは、半径方向への切り込み量 R_v が大きくなればなるほど切断アーク長 L が長くなり、繊維の断面が細長い三角形のような形をしていることから、表面積が大きいため多くの繊維と自己接着して、その結果として成形後の強度が高くなったと考えられる。また自己接着の度合いにより破断位置が変化する特徴を有することがわかる。また、図 30 から、繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ ではおおそ近似直線式として式 (20) を表すことができる。このことから $Z=2.5\text{mm}$ の場合に限定されるが、歯の曲げ強度試験をおこない破損してしまった場合、破断位置の変化を割れた歯の質量を測定することで定量化して、そこから逆に破断時に生じる歯先の荷重の推定も可能であることがわかる。

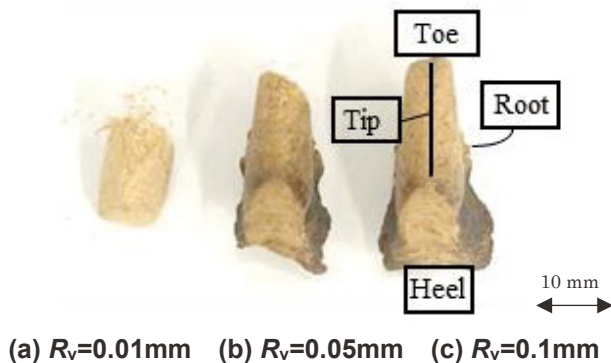


Fig. 29 Broken tooth.

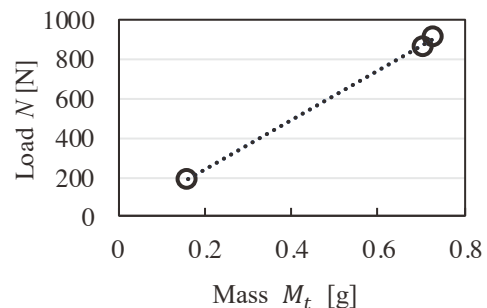


Fig. 30 Relationship between mass m and load N of broken tooth.

$$N = 1267.2M_t - 17.26 \quad (20)$$

4.4 FEM を用いた破断箇所における主応力の解析

繊維長さ Z 及び形状によって、図 31 に示すように破壊の仕方が異なる。図 31 より繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ より長いとピッチ点より歯先で破断しており、繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ 以下すなわち半モジュール以下だと歯元から破断していた。繊維長さ Z が異なることで破断箇所が異なると、式 (11) における l , b_1 , b_2 が異なり、式 (12) より求まる破断面の歯面で生じる最大曲げ応力が異なる。しかし、式 (12) は単純なモデルであり等荷重分布が前提であるが、ベベルギヤは歯幅方向にモジュールが変化しており等荷重分布における変形とは異なると考えられ、さらにせん断応力 (式(13)) も影響する²²⁾と考えられる。さらに、実験では竹材に比べて十分にヤング率の高い鋼材で歯先を加圧したが、歯幅方向に歯の曲げ剛性が異なるため不等荷重分布となっていると考えられ、また歯幅端の影響も懸念される。そこで、その差異を検証するため、本節ではせん断応力の影響も可能性を探るためも含め FEM を用いて 3 次元での考察で詳細な解析を行った。FEM 解析には Femap (インターメッシュジャパン製) を用いた。また、FEM 解析をするにあたり、ヤング率、ポアソン比及び荷重を以下のように求めた。

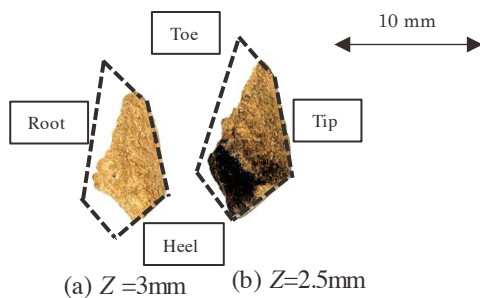


Fig. 31 Broken tooth ($t_h=30\text{min}$)

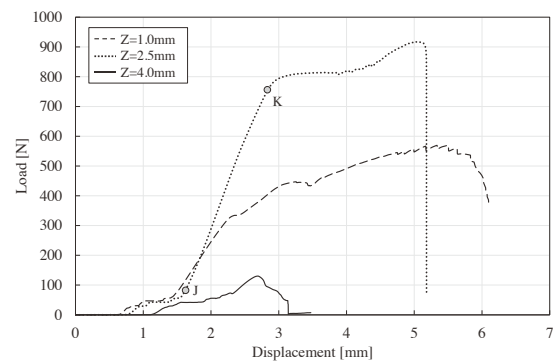
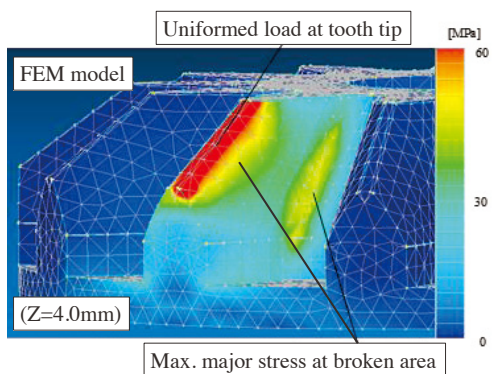
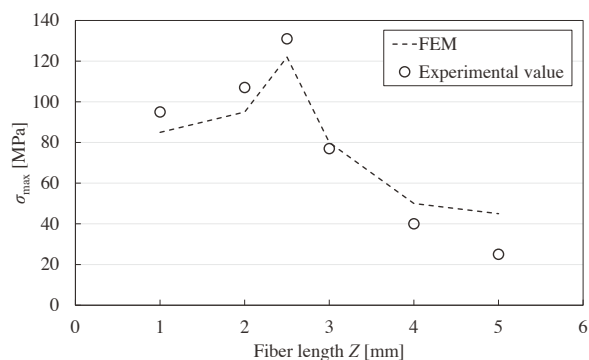


Fig. 32 Load displacement diagram



(a) FEM Model



(b) Relation between fiber length Z and stress σ

Fig. 33 The result of FEM analysis

天然系複合材料では、繊維長さによりヤング率が変化する場合が多い旨²³⁾が報告されており、工業的な繊維ほど均一な強化繊維でなく、成長の過程で繊維の長さにより繊維の実強度が異なるバラツキ特性があると考えられている。そこで、ヤング率の導出にあたり繊維長さの影響はミクロにではなく均一材としてマクロに考慮した。各繊維長さ Z における竹繊維歯車の歯の曲げ強度試験 (図 10) により荷重変位線図を求め、

その結果から繊維長さ毎に同定した．得られた荷重変位線図を図 32 にしめす．図 32 より繊維長さの違いにより破断の様子が異なることがわかる．ヤング率は図 32 中の直線部（例えば JK）の傾きより同定し（繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ のときヤング率 7.44GPa ），各繊維長さにおける破断荷重を FEM 解析（図 33(a)）における歯先荷重とした．ただし繊維長さ Z 毎に歯先変位から歯幅方向の等価剛性を求め，その逆比で変化する荷重分布とするようにした．また，ポアソン比は先行研究¹⁰⁾における引張試験の結果を基に 0.3 一定とした．また，実験値として加熱時間 $t_h=30\text{min}$ で強度試験をおこなった結果を用いて許容荷重 N に対して割れた歯面を測定し，式 (12) より破断面の歯面で生じる最大曲げ応力の算出をおこなった．

上記により求めた繊維長さと破断箇所の FEM 解析の主応力（最大主応力）および実験値の荷重と式 (12) から求めた最大曲げ応力を図 33(b)にしめす．図 33(a)より，歯元付近の主応力は歯幅方向に一定ではなく，応力集中や形状の複雑さの影響が生じていることがわかる．図 33(b)において，繊維長さ $Z=3\text{mm}$ 以下では破断箇所が歯元に近く，実験値と FEM により求めた主応力がほぼ一致することがわかる．同様な成形方法の竹繊維 100%平歯車を対象とした歯の曲げ強度に関する先行研究¹¹⁾の検討において，せん断応力の影響が生じる場合には刃先側で破断し，その影響が小さく曲げ応力の影響が支配的になれば歯元側で破断することが判明している．したがって，半モジュール（本論文の場合は繊維長さ $Z=2.5\text{mm}$ ）以下の破断には曲げ応力が大きく影響していたことが考えられる．一方，繊維長さ $Z=3\text{mm}$ を超えると歯先に近い箇所で破断するため，FEM によって求めた破断箇所の主応力が実験値を超えせん断応力の影響等が定性的に示唆されている．

また，繊維長さ Z と破断箇所の主応力の関係より，繊維長さ Z をベベルギヤの代表とするモジュールを外端部（本試作だと $m=5$ ）とするとその半モジュール程度，かつ繊維断面の形状のアスペクト比を大きく確保することで，歯の曲げ強度が改善することも判明した．

5 結 言

竹繊維 100%での自己接着に基づくグリーンベベルギヤの成形において適切な切削条件，成形条件を解明し，繊維長さと歯の曲げ強度との関係を検討した．結果を以下にまとめる．

- A) 竹繊維ベベルギヤの自己接着に用いる繊維長さは，平歯車の場合と同様に半モジュール程度（本論文の場合は外端部のモジュールの代表値として $Z=2.5\text{mm}$ ）のとき，繊維の強化効果と成形性の両立により歯の曲げ強度の極大値をしめすことがわかった．
- B) 竹繊維ベベルギヤの自己接着のためのメイラード反応は拡散反応に基づく焼き色パラメータで定量化でき，繊維長さ，加熱温度，加熱時間から同定できることがわかった．
- C) 成形に用いる竹繊維の断面形状に着目すると，アスペクト比が小さくその断面が細長い三角形のような形状において成形時に良好な自己接着となり，歯の曲げ強度が高くなることがわかった．
- D) ベベルギヤは竹繊維の自己接着の成形体としては複雑な形状であり，繊維の長さや断面形状により成形時の熱伝達の均一性が異なることから繊維長さによって強度が異なり，破断箇所も異なる．繊維長さを半モジュール程度，繊維断面形状のアスペクト比を大きく確保することで，歯の曲げ強度が改善する．

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 (2017), 903.
- 2) Chen, Y. K., Proceedings of the 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, MCI, Paris (1999), 735.

- 3) 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 (2003), 186.
- 4) 上野拓, 歯車工学, 共立出版, (1972), 183.
- 5) 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 (1985), 2161.
- 6) Hirogaki, T., Aoyama, E., Katayama, T. and Iwasaki, S., Design systems for gear elements made of cotton fiber-reinforced plastics, *Composite Structures*, 66, (2004), 47.
- 7) Kosaka, T., Nakatani, H., Osaka, K. and Sawada, Y., *Proceedings of Third International Workshop on Green Composites*, (2005), 158.
- 8) 野辺弘道, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, サステ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書, 52, 1 (2001), 68.
- 9) Ogawa, K., Hirogaki, T., Aoyama, E., Taniguchi, M. and Ogawa, S., Fabrication of Binder-free Green Composite Using Bamboo Fibers Extracted with a Machining Center, *Key Engineering Materials*, 447 (2010), 760.
- 10) 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 (2012), 943.
- 11) 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).
- 12) Kawabata, T., Hirogaki, T., Aoyama, E. and Nobe, H., Driving performance of natural fiber gears made from only bamboo fibers extracted with a machining center, *International Journal of Automation Technology*, 14, 2 (2020), 280-293.
- 13) 森浩司, 高木均, 第 34 回 FRP シンポジウム講演論文集, (2005), 109.
- 14) 近藤伸亮, 相馬雅之, 梅田靖, エコデザインジャパンシンポジウム論文集, (2002), 154.
- 15) 高木均, 田倉隆輝, 原洋平, 越智真治, 三澤弘明, 仁木龍祐, 爆砕法により取り出した竹繊維の引張強度特性, 材料, 52, 4 (2003), 353.
- 16) Hirogaki, T., Aoyama, E., Huynh, M., Nakamura, Y., Ogawa, K. and Nobe, H., Hot Press Fabrication of Hemisphere Shell Product Made of Bamboo Fibers Extracted with a Machining Center, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, 9, 3 (2015), JAMDSM0044.
- 17) 藤井透, 竹の基礎科学と高度利用技術, 第 1 版, (2008), 91.
- 18) Ogawa, K., Hirogaki, T., Aoyama, E., Taniguchi, M. and Imamura, H., Bamboo Fibers Extraction Method Using a Machining Center, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2, 4 (2008), 550.
- 19) 廣垣俊樹, 中川平三郎, 小堀由高, 喜田義宏, 垣野義昭, レーザを用いた機上熱処理システムに関する研究(レーザ焼き入れ後の焼戻し), 精密工学会誌, 68, 12 (2002), 1595.
- 20) 田中豪, 末竹規哲, 内野英治, 色情報を考慮したカラー画像のモノクロ変換, 電子情報通信学会論文誌, J90-A, 8 (2007), 673.
- 21) 中山一雄, 切削機構に関する研究 (第 4 報) (切削条件が切削機構に及ぼす影響), 精密機械, 24, 286 (1958), 674.
- 22) 廣垣俊樹, 青山栄一, 片山傳生, 杉村和哉, 岩崎伸哉, 矢倉古典, 布基材フェノール樹脂積層材料を用いた歯車における歯の曲げ疲労強度の算定法, 日本機械学会論文集 (C 編), 70, 700 (2004), 228.
- 23) 柴田信一, 曹勇, 福本功, プレス成型によるケナフ繊維と生分解性樹脂の複合材料作製と曲げ弾性率の検討, 日本機械学会論文集 (C 編), 72, 714 (2006), 376.