

# スマート化金型による竹繊維ベベルギヤ創製

同志社大学 理工学部機械システム工学科 廣垣 俊樹

## 1. はじめに

グローバル化する世界情勢において、先進国の技術開発として資源循環型の持続可能な社会(サステナブル社会)に向けた様々な取り組みがなされてきている。特に近年は、スマートフォンに代表される情報端末機器など製品寿命の短命化が顕著であり、その製品ライフサイクルに同期できる環境対応の新たな技術革新のニーズが益々増大している。スギなどに代表される一般的な木質資源に着目すると成木に何十年の歳月が必要であり、短命化した製品のライフサイクルとの同期が不可能であり、その伐採は地球規模での環境負荷の増大を招くことが判明している。

そこで本研究では、アジア地区、特に日本に多く自生する未利用天然資源の一つである竹の自己成長性に着目する。竹は1~3年程度で成竹する自己成長力を有し、短命化する製品ライフサイクルにも同期でき、地球環境負荷をゼロにできる可能性を秘めている。すなわちその工業製品化は、天然資源の完全循環型のサステナブル生産システム(=100%竹繊維製品は、土に戻せば1年程度で堆肥化し資源循環する)に関わる新しい技術革新に資するものと考えられる。

## 2. 目的

竹は1~3年程度で成竹するが、工業的には竹竿など限られた用途でしか利用がなく、放置竹林の問題などが社会問題化してきている。その主たる要因は、竹が中空であり、さらに工業用の素材として強度の異方性が顕著であることにあった。すなわち維管束(図1の断面)などの天然の強化繊維の比強度は高いが、中空円筒の軸方向にだけ作用するためであった。

そこで先行研究<sup>(1)</sup>では、図2に示すように維管束の分布に合わせてマシニングセンタの数値制御で図中に示すように加工時の温度管理しながら、加工パスとエンドミル回転を精密同期させた切り屑としてファイン竹繊維(維管束の周辺に天然リグニンを十分に残し、その長を均質化した)を抽出し、それらより100%竹繊維(バインダー樹脂は加えない)を金型で適切な温度・圧力・時間で熱圧着した自己接着成形体を創製する手法を提案した。提案する手法で生み出させる製品はオーガニック工業製品となり、図3に示すようなサステナブル生産システムを具現化できるものである。

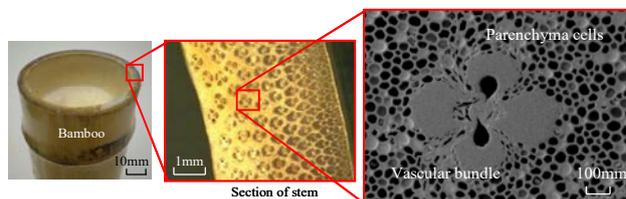


図1 竹断面と維管束の分布

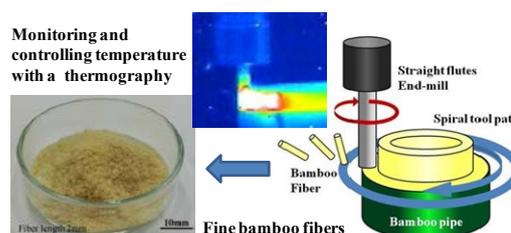


図1 ファイン竹繊維の抽出



図2竹の自己成長力に基づくサステナブル生産システム(竹繊維100%オーガニック製品開発)



図3 オーガニック竹繊維平歯車

さらにその発展研究<sup>(2)(3)</sup>として、基幹機械部品の中でも歯車に着目し、食品機械などのプラスチック歯車の代替と図3に示す竹繊維100%オーガニック平歯車を開発し、エンジニアリングプラスチックと同等の強度と動力伝達特性を有することを示

した。一方、動力伝達軸には平行軸系と直交軸系があり、平行軸系の平歯車だけでは様々な機械への応用展開が難しい問題点が顕在化してきた。その本研究では、2次元的な形状の平歯車よりも3次元的な形状であるベベルギヤを竹繊維100%で成形する技術を確認する。さらにその駆動特性についても検討することで、直交軸系の動力伝達にも対応可能な竹繊維ベベルギヤの技術開発を遂行する。

### 3. 実用的な価値、実用化の見込など

維管束を代表とする竹繊維の比強度はガラス繊維を凌駕する<sup>(4)</sup>とされており、それらを樹脂母材の強化材とする研究は数多くなされてきている。しかしながら、母材に生分解性樹脂を用いた場合でも様々な強化繊維の界面などの化学的な処理<sup>(5)</sup>により、環境負荷はゼロにはならない。一方、本成形法は竹材をエンドミル加工でファイン竹繊維化し、それらのまわりに残るリグニンに代表される天然接着剤で熱圧着する自己成形であるため、成形品はいわゆる100%天然竹素材のオーガニックであり、廃棄時の環境負荷はゼロである。さらに等方性かつ竹筒厚以上の厚みを有する製品の成形も容易であり、工業用の素材として有用である。

竹材自体は安価であるが、後述のように製品形状への成形には金型による熱圧着すなわち熱拡散(メイラード)反応の時間が必要であり、成形サイクル時間の短縮が大きな課題である。

## 4. 研究内容の詳細

### 4. 1竹繊維ベベルギヤの成形の課題

ファイン竹繊維の自己接着成形の技術は、繊維の回りに存在する僅かなリグニン等の接着成分の作用で成立している。したがって射出成形やプレスや鍛造などに比べ、流動性を有する成分が極めて少ない成形技術である。平板などの単純形状の自己接着成形の場合、熱圧着のための金型内での均一な圧力と温度の確保は比較的容易で、後は熱拡散(メイラード)反応の温度と時間の管理だけの問題である。一方、平歯車の場合は2次元的ではあるが凹凸が多く、金型内での均一な圧力と温度の確保が難しくなることが判明している。本研究では、さらに3次元的な凹凸を有する形状を対象とするため、金型内での均一な圧力と温度の確保が一層難しくなることが予想される。

そこでスマート工場におけるIoT対応の多数のセンサを金型に配置して温度管理を遂行して、その対策を遂行する。

### 4. 2竹繊維ベベルギヤの設計

平歯車としてはモジュール3~5mm程度の竹繊維歯車の成形を遂行した経験<sup>(2)</sup>を有する。したがって、成形の難易度も考慮して図4に示すモジュ

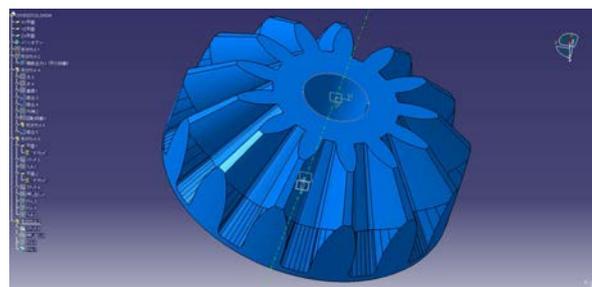


図4 竹繊維ベベルギヤの設計

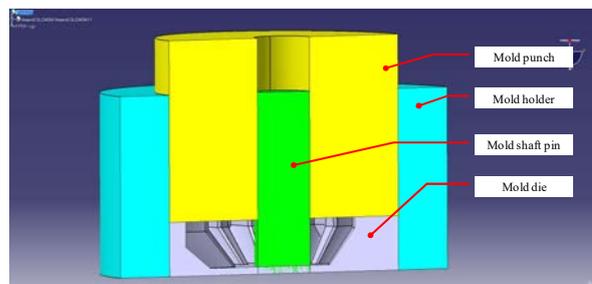


図5 ベベルギヤ金型の設計



図6 試作したベベルギヤ金型の主要部品



図7 金型の加熱・加圧装置

ール5mm、歯数13枚、圧力角20°の歯車の成形を目指す。成形時の加圧性も考慮して外端部にリブ付きの形状とした。

### 4. 2ベベルギヤ金型の設計

歯車は回転する機械要素であるため、その軸芯が重要である。したがって、図5に示すように歯車

にはメインシャフトピンによる穴を設け、そのまわりに金型ダイ、さらにメインシャフトピンをガイドとしたパンチ、そのまわりにホルダーで構成した金型を検討した。パンチとダイの上下面より加圧・加熱を遂行する。加熱用のヒータは多数個で分割配置し、ホルダー外周に多数配置した熱電対と熱流センタの情報に基づき加える熱量を細かく制御する。図6は設計に基づき試作した金型の主要部品を示す。さらに金型の加熱・加圧装置を図7に示す。上下からの加圧は油圧の手動であるが、加熱は小型ヒータを多数配置して制御するようにした。

#### 4. 3自己接着成形の結果

図8は単純に上下面のヒータ温度を変更した組み合わせの条件における自己接着成形の結果である。特に外端部の歯先やリブ部で不均一な模様が生じ、十分な成形を達成することができなかった。また褐色化の度合いも不十分であり、熱拡散の反応としても温度設定を上げる必要があることもわかった。

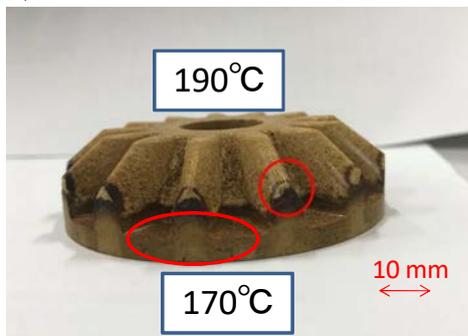


図8 トライアル自己接着成形の結果

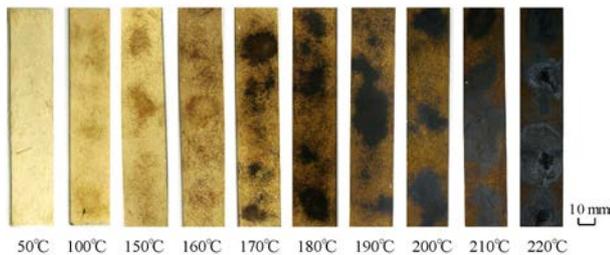


図9 メイラード反応の温度依存性

メイラード反応は熱拡散反応の一種と考えられるので、反応度合いを示すパラメータ  $P$  と温度  $T$  (K)、時間  $t$  (s) の関係<sup>(6)</sup>は、

$$P = T(C + \ln t) \quad (1)$$

$C$  は定数、で表されると考えられる。したがって、時間にも影響されるが、温度  $T$  の影響度合いが大きいものと予想される。そこで厚さ 5mm の短冊状の試験片を成形(圧力 20MPa、時間 10min、冷却時間 30min)し、温度の影響を検討した。結果を図9に示す。温度の影響が顕著であることがわかり、温度を制御の重要性が確認できた。



(a)上面



(b)側面



(c)下面

図10 最適化条件の自己接着成形の結果

そこで上下面とも炭化が生じる上限に近い 200°C 程度まで平均温度を上昇させ、圧力は 20MPa として、図9の結果も参考にして加熱時間 20min とする一方で除冷 30min の条件を導入することで、図10に示すような均質なベベルギヤ(質量 45g)の自己接着成形が可能となることがわかった。現在は式(1)および図9の結果に基づき、試行錯誤でヒータ加熱条件を設定しているが、その自動制御を目指したスマート金型化の成形技術は、竹繊維ベベルギヤの成形に有効な手法となることが判明した。

#### 4. 4 駆動試験装置の開発

一般に歯車の実用化には、単に歯の曲げ強度だけでなく、実駆動時の面圧強度、回転伝達ムラであるかみ合い伝達誤差等の動力伝達特性が求められる。そこで動力伝達特性の評価を目指し、開発した竹繊維ベベルギヤ用の直交軸系歯車試験機の開発を遂行した。その設計組み立て図を

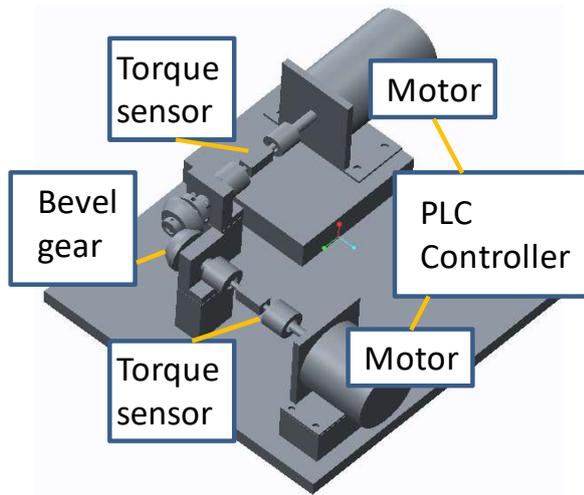


図 11 設計した竹繊維べベルギヤの駆動試験装置

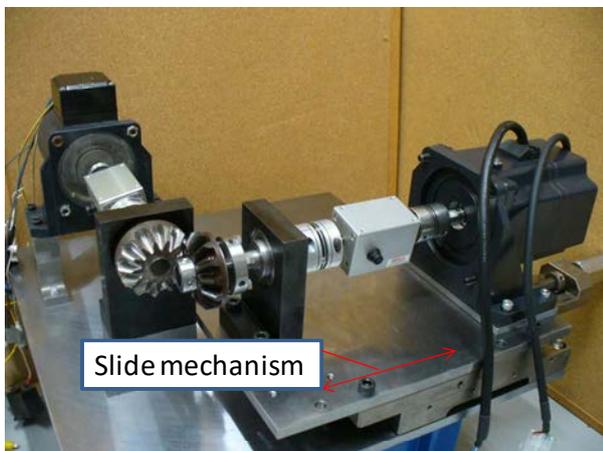


図 12 試作した竹繊維べベルギヤの駆動装置

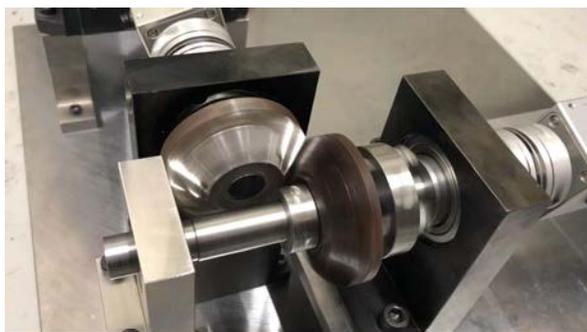


図 13 駆動中の竹繊維べベルギヤ

図 11 に示す。入出力軸ともモータを配置して、動力吸収式とした。駆動時のトルク特性を確保するため、出力軸側はトルクモータとした。また伝達効率も計測可能なように、入出力軸ともにトルクセンサを設置し、これらのシステムを PC ベースの PLC (Programmable Logic Controller) コントローラで制御する方式とした。一般に、プラスチック歯車の駆動時の相手歯車は鋼材などの金属歯車が多い。したがって、被動(出力)側には S45C 鋼製のべベルギヤも試作して準備した。

これらの構想設計に基づき試作した竹繊維べベルギヤの駆動試験装置を図 12 に示す。直交軸系の歯車は、組み立て時の歯当たり調整が不可欠とされ、そのために軸方向のスライド機構が必要である。本装置にも、そのための機構を搭載している。図 13 は竹繊維べベルギヤを 200rpm で駆動している様子である。本例は高速回転対応のための竹繊維べベルギヤ側に両端支持ユニットを取り付けている。初期評価の段階であるが、異音や歯面の損傷はなく、ある程度の範囲で実用的な動力伝達機構としての適用性が確認できた。

## 5. まとめ

完全資源循環型のサステナブル生産システムの構築に向け、スマート金型を用いた 100%竹繊維オーガニックべベルギヤの開発を遂行した。金型のスマート化の有効性を確認し、さらに開発した竹繊維べベルギヤの駆動試験も遂行し、初期評価の段階であるが、異音や歯面の損傷などはなく、新たな動力伝達機構としての可能性を示すことができた。

## 6. 参考文献

- (1) 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, Vo.78, No.787, (2012), 943-952 頁
- (2) 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的研究, 日本機械学会論文集 Vo 1.80, No. 818, (2014), DOI-10.1299/transjsme.2014dsm0309, 1-11 頁
- (3) 廣垣俊樹, サステナブル生産システムに向けた竹繊維歯車の開発, 日本機械学会誌(特集: 起承転結における転のものづくり) Vo.117, No.1147, (2014), 24-25 頁
- (4) 大窪 和也, 高木 均, 合田 公一, グリーンコンポジットとその研究の新展開, 材料, Vo.55, No.4, (2006), 438-444 頁
- (5) 高木 均, バイオコンポジットの現状と将来展望・単一素材から成るグリーンコンポジット・グリーンコンポジットの現状と将来展望 (1)ー, 材料, Vol.59, No.11, (2010), 881-886 頁
- (6) 宮野樺太男, 足立孝夫, 高温 2/1/4Cr-1Mo 鋼の研究, 鉄と鋼, Vol. 13, (1970), 1757-1765 頁