

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560140

研究課題名(和文)医療用固定具に使用される生分解性ポリ乳酸のクラックレス微細加工技術の構築

研究課題名(英文)Construction of the crack-less micro-cutting technology of the biodegradable polylactic acid material used for a medical-application fixture

研究代表者

加藤 秀治 (KATO, HIDEHARU)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：90278101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：脳外科手術においては生体適合性に優れることや診断画像の改善が可能となるポリ乳酸材料の固定具への適用が期待されている。本研究においては、加工時に材料に生じるマイクロクラックを抑制することを目的とした微細加工法について検討した。基礎的な二次元切削における微細切削挙動を高速ビデオカメラにより詳細に観察した結果、せん断角が一般的なプラスチック材料と同じように極めて大きくなることを明らかとした。さらに、材料の粘弾性特性と加工時の切削温度の測定を実施し、ガラス転移温度に近い切削温度条件となる場合にクラックレスの加工面が創製されることを明らかとした。

研究成果の概要(英文)：In brain surgery, application to the fixture of polylactic acid material is expected, because, it is for polylactic acid producing neither excelling in biocompatibility, nor an artifact. This research is aimed at construction of the micro fabrication method which controls the micro-crack generated on the machined surface.

As a result of detailed observation about the micro-cutting behavior in a fundamental orthogonal cutting using a high-speed video camera, shear angle during cutting of this material showed the same tendency as a plastic material, and shows a very large angle. Moreover, the viscoelastic property and the cutting temperature of material were measured and it showed clearly to create the machined surface of crack-less in case of the cutting-temperature conditions similar to glass transition temperature.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：ポリ乳酸 微細加工 クラックレス ダイヤモンド工具

1. 研究開始当初の背景

近年、外科的治療に使用されるインプラント材料は強度や耐食性に優れており、生体適合性の高いことが求められている。そのため、材料表面に瞬時に強固な不動態膜を形成するチタニウム合金が多用されている。例えば、開頭手術において骨切りした部分は必ず固定する必要がある。その際に固定具として使用される。しかし、金属固定具を使用した場合には骨が自己修復し患部が完治すると、金属固定具が体内に異物として残るため、これを除去するための再手術が必要となり、患者に対して大きな負担を与えてしまう。さらに、MRI や X 線 CT などを用いた術後の経過診断を行う際にチタニウム製固定具による金属磁場の発生や X 線が透過しないことから、診断画像に歪やノイズが生じる問題が指摘されている¹⁾。このため、生体適合性が高いだけでなく、最終的に分解され体内に吸収される生体内吸収性⁵⁾を有し、X 線透過性および磁化しない特性を併せ持つポリ乳酸(以後 PLA と記す。)が有効な材料として期待されている。しかし、形状成形する際には亀裂が入りやすく極めて加工が難しい状況であり、残存クラックが部品の信頼性を損ねている。

2. 研究の目的

本研究では、熱可塑性プラスチック材料である PLA の重要な材料特性を把握するため動的粘弾性特性の把握を行う。また、単結晶ダイヤモンドを用いて二次元切削を行い基礎的な切削特性の検討をする。さらにミーリング加工を行い、切削速度、被削材表面温度が切削特性に及ぼす影響について検討し、クラックレス加工を実現に向けた技術指針を得る。

3. 研究の方法

本実験で使用される PLA 材料は PLA ペレットをテフロンシャーレに入れ、ホットプレス機に加熱機構を利用して溶解し、水で急冷することにより固化したものである。

二次元切削で用いる被削材形状は、外径 48mm、内径 12、板厚 8mm であり、溝幅 1.4mm、溝深さ 2mm の前加工を施したものをを使用した。使用工具は、すくい角 0、5、10° の単結晶ダイヤモンド工具を用いた。図 1 に示すような形で二次元切削を行った。切削条件は切削速度(V) : 1, 2, 3m/s, 送り量(f) : 0.009mm/rev とした。また、PLA は加水分解するため切削環境は乾式とした。切削抵抗は工具動力計(KISTLER 製 9257B)を用いて測定を行った。また、ハイスピードカメラ(KEYENCE 製 VW6000)を用いて、フレームレート 8000fps で切りくずの流出状態を撮影した。その際の切削速度は 1m/s とした。

ミーリング加工の被削材形状は、横幅 10mm、縦幅 15mm、板厚 8mm であり、前加工を施したものをを使用した。使用工具は刃径 1mm の 2 枚刃超硬合金スクエアエンドミルと刃径 3mm の

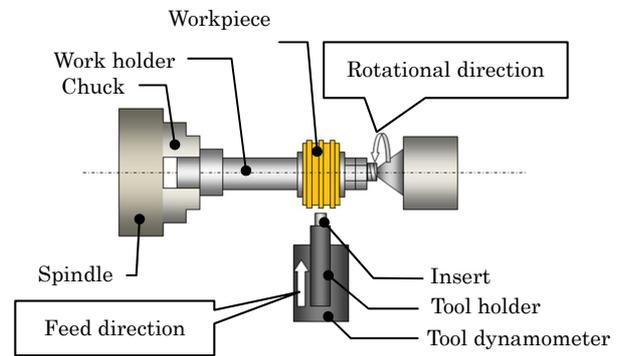


Fig.1 Schematic illustration of orthogonal cutting

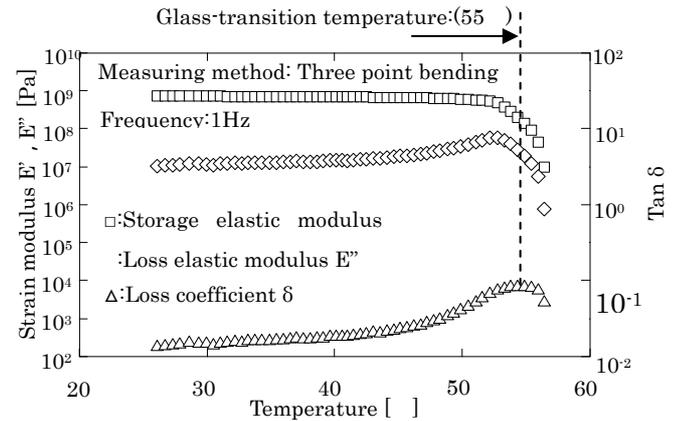


Fig.2 The dynamic viscoelastic behavior of PLA

2 枚刃ダイヤモンド焼結体スクエアエンドミルである。いずれも工具ねじれ角は 30° である。ダウンカットの肩削りで行った。切削条件は、切削速度(V) : 1 から 12m/s まで 1m/s 毎に変化させ、一刃当りの送り量(Sz) : 0.003mm/tooth, 軸方向の切込み量(Ad)と半径方向の切込み量(Rd) : 各々 0.1mm とした。切削環境は二次元切削と同様に乾式で行い、供給圧力 0.2MPa のドライエアーを工具刃先に供給した。

4. 研究成果

4.1 ポリ乳酸の粘弾性特性の把握

熱可塑性プラスチックである PLA の材料特性を把握するため、動的粘弾性挙動を測定した。測定方法は動的粘弾性アナライザを用い、曲げ振動 - 非共振法で行った。図 2 は、PLA 材料の動的粘弾性挙動を測定した結果である。図より、25 から 52 付近までの貯蔵弾性率および損失弾性率はほぼ一定の値を示していることから、この温度領域での PLA 材料の機械的特性は大きく変化しないと考えられる。損失係数は、55 付近で最大値を示した。一般に損失係数は、材料がもつガラス転移温度(Tg)付近で最大値を示すことが知られているため⁷⁾、この温度が PLA の見かけ上のガラス転移温度である。

4.2 二次元切削によるポリ乳酸の切削特性の検討ポリ乳酸の材料特性の把握

図 3 に各切削速度における切削抵抗とすくい角の関係を示す。Fx は主分力, Fy は背分

力を示している。図より、各条件ともに主分力 3N、背分力 1N 程度と非常に低い力で切削が行われている。また、すくい角の増加に伴い主分力と背分力ともに減少傾向を示した。これはすくい角の増加とともに切れ味が良くなり切削抵抗が減少したためと考えられる。しかし、切削速度増加による切削抵抗の減少はわずかであった。図 4 に切削速度 1m/s における各すくい角の切りくず流出の様子を示す。図より、各すくい角においても流れ型の切りくずが生成されている。また、すくい角増加に伴い切りくず流出状況が良好になる。これが、すくい角増加に伴う切削抵抗減少の要因の一つと考えられる。また、本実験で行った速度域において切削抵抗、切りくず厚みに変化は見られないため、切削速度 1 から 3m/s において切削速度が切削特性に与える影響は少ないと考えられる。

4.3 ミーリング加工における切削特性の検討

4.3.1 切削速度が切削特性に及ぼす影響

予備的な摩耗実験において 400m 加工後も工具摩耗は極めて小さく、大きな変化が見られなかった。このため、耐摩耗性による切削特性の把握は極めて難しいと判断し、本節では表面粗さ特性に着目し検討することとした。図 5 は超硬合金工具とダイヤモンド焼結体工具を用いた場合の切削速度の増加に伴う最大高さ粗さの変化を示したものである。同図より超硬合金工具の最大高さ粗さは切削速度 3m/s 付近で $30\mu\text{mRz}$ と急激に上昇し、バラツキも大きくなる結果となった。一方、ダイヤモンド焼結体工具では、超硬合金工具において加工表面が著しく悪化した 3m/s 以上の切削条件で速度の影響を検証しているが、切削速度 6m/s までは $5\mu\text{mRz}$ 以下と低く安定した値を示した。しかし、7m/s 付近を境に表面粗さ及びバラツキが徐々に上昇し、10m/s 付近から最大高さ粗さの上昇に加えバラツキも大きくなる結果となった。次に、両工具における代表的な加工表面の比較を試みた。図 6 は超硬合金工具で切削実験を行った場合の最大高さ粗さに変化が見られる切削速度 2m/s と 3m/s の条件の加工表面を示す。切削速度 2m/s の加工表面(同図(a)参照)を観察すると、規則正しいカッターマークが確認され良好な加工表面が得られていることがわかる。これに比し、3m/s の条件(同図(b)参照)では、ピックフィード上に切りくずの一部が溶着して生じたけだち(同図中矢印参照)が確認できる。一方、図 7 に示すダイヤモンド焼結体工具における代表的な切削速度 6m/s と切削速度 10m/s でも同様な傾向が確認された。最大高さ粗さが安定している低速域の切削速度 6m/s の条件における加工表面(同図(a)参照)において、超硬合金工具の切削速度 2m/s と同様の良好な加工表面が得られている。最大高さ粗さとバラツキ共に最大である高速域の 10m/s(同図(b)参照)の加工表面では、超硬合金工具の切削速度 3m/s

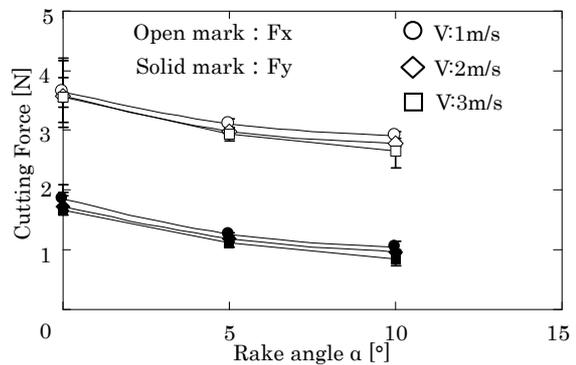


Fig.3 Relationship between rake angle and cutting force

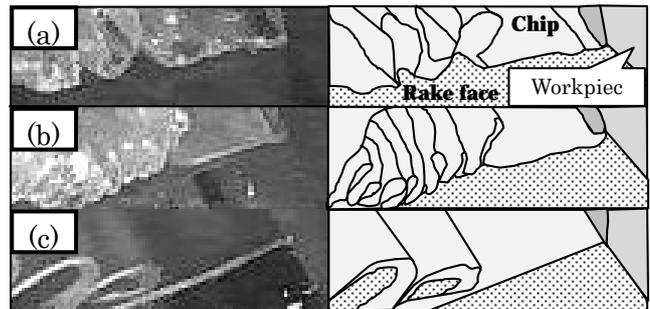


Fig.4 Relationship between rake angle and chip formation; (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 5^\circ$, (c) $\alpha = 10^\circ$

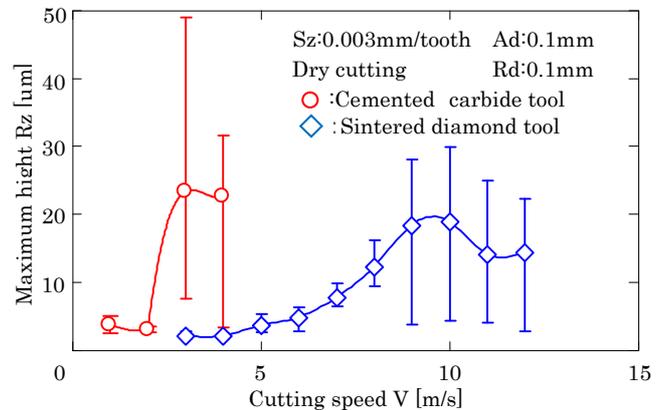


Fig.5 Relation between surface roughness on the cutting speed for cemented carbide tool and sintered diamond tool

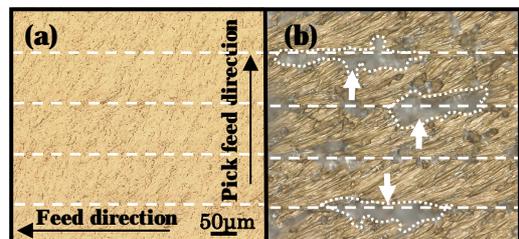


Fig.6 Optical image of finished surface using a cemented carbide tool;(a) 2m/s and (b) 3m/s

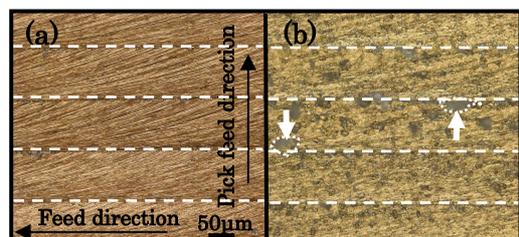


Fig.7 Optical image of finished surface using a sintered diamond tool;(a) 6m/s and (b) 10m/s

と同様なカッターマークにおける乱れとピックフィード上に小さなけだちも確認され、表面状態が悪化していることが確認できる。両工具の粗さの傾向を見てみると特定の切削条件を境に粗さとバラツキが著しく上昇する傾向にある。これは前述した通り、PLAのガラス転移温度が55と低く材料の軟化温度も低いことを考えると、粗さ及びバラツキの上昇には、材料の軟化が関与していることが推測される。切削速度が増加することで切削温度が上昇し、切削温度がPLAの軟化温度に達し、加工表面が著しく悪化したと考えられる。ダイヤモンド焼結体工具が超合金工具と比し、高速域でも最大高さ粗さが安定している理由としては、工具材種の熱伝導率の違いが考えられる。本実験で使用したダイヤモンド焼結体工具(560W/(m・K)8)は熱伝導率が超合金工具(100W/(m・K)8)と比べ約5倍大きく、この違いにより切削温度の上昇が抑制され、けだちなどの現象が発生しにくくなったためと考えられる。以上のことから、PLAの切削加工においてガラス転移温度以下となるような切削速度条件で加工することが望ましく、熱伝導率に優れるダイヤモンド焼結体工具の使用が有効である。

4.3.2 ポリ乳酸の温度依存性の検討

実験は図8に示すように真鍮板裏部に取り付けたシリコンラバーヒーターで加熱する方式とした。PLA材料表面部にK型熱電対を取り付け、温度調節機で温度を調節することで被削材表面温度を制御した。温度制御方法はON-OFF制御となっており、数秒単位で温度が変化する。そこで、PLA表面に熱電対を追加し、測定器を介してPCで表面温度の変化をする周期を測定した。その結果、時間経過に対して表面温度は数秒単位で変化しており、温度の変動は温度調節機に表示される値と同じ挙動を示した。そのため、温度調節機の値が高い部分で切削することにより、設定温度で切削を行うことができると考えられる。そこで、温度コントローラーの値が高い部分で加工することとした。表面温度は40, 47, 51, 55, 62と変化させた。

前章において両工具材種とも特定の切削条件を境に加工表面の悪化が確認された。この要因としては、切削温度が大きく影響していると考えられる。そこで、PLAの表面温度を変化させ加工表面に及ぼす影響について検討することとした。前述に示した通り、被削材であるPLAの温度を変化させることで、強制的に温度環境を変化させ加工を行っている。図9は被削材表面温度を変化させた場合のPLA表面温度の増加に伴う最大高さ粗さの変化を示したものである。測定は返し刃の影響が少ない部分で行った。図より、被削材表面温度が40で最大高さ粗さが5 μ mRzと低く安定した値を示した。しかし、被削材表面温度が47を境に表面粗さ及びバラツキが徐々に上昇し、51で最大高さ粗さとバラツキが最大となった。次に、加工表面の比

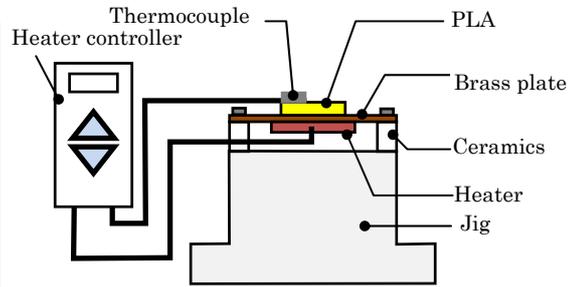


Fig.8 Schematic diagram of experimental apparatus

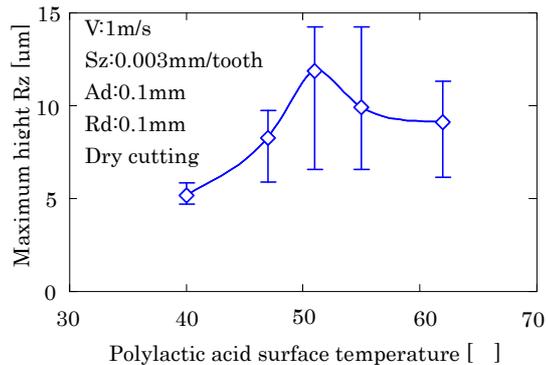


Fig.9 Relation between surface roughness on the polyactic acid surface temperature for cemented carbide tool

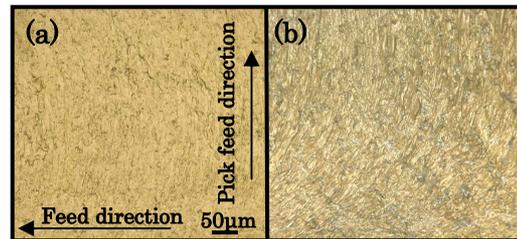


Fig.10 Comparison of the finished surface Optical image; (a)40 and (b)51

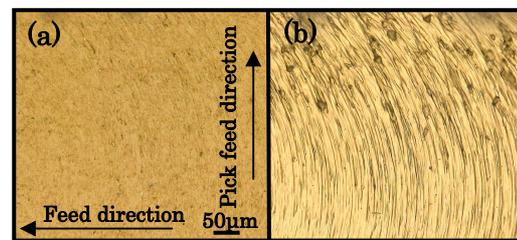


Fig.11 Comparison of the finished surface Optical image; (a) 2m/s and (b) 3m/s

較を試みた。図10に被削材表面温度を変化させた場合に最大高さ粗さに変化が見られる40と51の加工表面を示す。加工表面の観察は表面粗さの測定箇所と同様とした。表面温度40(同図(a)参照)の加工表面ではカッターマークが確認でき良好な加工表面が得られている。また、47では一部に表面層の流動が確認できた。一方、表面温度51(同図(b)参照)では、表面層の流動による加工表面の悪化が確認できる。また、表面温度が55, 62の場合でも同様の傾向となった。ここで、前章の切削速度の影響の検討を行った際の表面状態が大きく変化した2m/sと

3m/s の加工表面を図 11 に示す。切削速度 2m/s(同図(a)参照)では、カッターマークが確認でき良好な加工表面が得られている。切削速度 3m/s(同図(b)参照)では、表層部が流動しており加工表面が悪化していることがわかる。この傾向は被削材表面温度を変化させ切削を行った場合と類似した傾向を示すことが明らかである。本実験は実際の切削温度とは異なっているもののガラス転移温度よりも低い温度で表面軟化による加工表面が悪化することが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

加藤秀治, ダイヤモンド工具・cBN 工具の高速加工条件下における加工技術, 日刊工業新聞社・機械技術, 査読無, Vol.60, No.6, (2012) pp. 36 -39

加藤秀治, 医療用材料における高速微細加工の試み, 日刊工業新聞社・機械技術, 査読無, Vol.61, No.4, (2013)pp.28 -31.

Hideharu KATO, Kazuhiro SHINTANI, Muneki NAKAMURA, Hiroaki SUGITA, 査読有, A Study on the High-Efficiency Cutting of Austenitic Stainless Steel Using an HfN-Type Coated Tool, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.6, No.6, (2012) pp.829-840.

〔学会発表〕(計 2 件)

加藤直人, 加藤秀治, 新谷一博, 医療用材料に使用するポリ乳酸のミーリング加工に関する研究, 精密工学会, 2012 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, pp. 49 -50, 2013 年 11 月 23 日, 福井大学

北村明大, 加藤秀治, 小島翔太, 池永訓昭, 杉田博昭, 超弾塑性特性を有するチタニウム合金を対象とした小径ボールエンドミル工具によるミーリング加工に関する研究 - 最適切削速度の検討 -, 一般社団法人日本機械学会, 2013 年度年次大会講演論文集, No.s132023, 2013 年 9 月 9 日, 岡山大学津島キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤秀治 (KATO HIDEHARU)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：90278101

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

新谷一博 (SHINTANI KAZUHIRO)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：80139758

森本喜隆 (MORIMOTO YOSHITAKA)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：00290734

大澤 敏 (OHSAWA SATOSHI)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号：50259636